

Zukunftstechnologie Photonik

Licht als Innovator



Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:
Amt der Oö. Landesregierung
Direktion Präsidium, Oö. Zukunftsakademie
Kärntnerstraße 10-12, 4021 Linz
Tel.: +43 732 7720 14402
E-Mail: zak.post@ooe.gv.at
www.ooe-zukunftsakademie.at
DVR: 0069264
Auflage: Jänner 2018

Redaktionsteam:

Mag.^a Dr.ⁱⁿ Reingard Peyrl, MSc (Projektleitung)
DIⁱⁿ Judit Asztalos
DI Dr. Klaus Bernhard

Titelfoto: tiero - stock.adobe.com

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Editorial	4
1. Grundlagen der Photonik	5
1.1. Beleuchtung und Displays	6
1.2. Energie- und Umwelttechnik	7
1.3. Informations- und Kommunikationstechnologie	8
1.4. Life Science und Gesundheit	9
1.5. Industrielle Produktion und Qualitätsmanagement	10
2. Entwicklungen mit Zukunftspotenzial	12
2.1. Visible Light Communication	12
2.2. Holographie	13
2.3. Quantencomputer	15
2.4. Terahertz-Technologien	16
2.5. Nanobots	17
3. Potenziale und Empfehlungen	19
3.1. Weltmarktentwicklung und oberösterreichische Potenziale	19
3.2. Empfehlungen für Oberösterreich	22
Quellen- und Literaturverzeichnis	24

Editorial

Licht als essenzieller Baustein unseres Lebens wird als selbstverständlich angesehen. Aus dem Physikunterricht wissen wir, dass Licht sowohl **Teilchen als auch Welle** ist und dadurch besondere Eigenschaften aufweist. Aber, um es mit den Worten eines unbekanntes Verfassers bzw. einer unbekanntes Verfasserin auszudrücken:

„Wir alle wissen, was Licht ist; aber es ist nicht einfach zu sagen, was es ist.“

Besonderheiten des Lichts:

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

(vgl. BM für Bildung und Forschung (D), 2011)

Diese Eigenheiten von Licht, die daraus resultierenden Anwendungsmöglichkeiten, chemischen Reaktionen und physikalischen Abläufe bergen teilweise **noch ungeahnte Zukunftspotenziale**. Angefangen von der Entschlüsselung der natürlichen Photosynthese in den grünen Teilen von Pflanzen über Licht-WLAN, Holographie und Mikroskopie bis hin zu komplexer Lasertechnologie. Die faszinierende Reise des Lichts ist gegenwärtig noch lange nicht zu Ende und wir können zu Recht gespannt sein, welche revolutionären und disruptiven Veränderungen dadurch auf uns zukommen.

Im vorliegenden Themenreport sollen einige der derzeit vielversprechendsten optoelektronischen Technologien vorgestellt werden, die sich im Grenzraum zwischen Gegenwart und Zukunft befinden.

1. Grundlagen der Photonik

Zur Erklärung des **Begriffs Photonik** finden sich in der Off- und Online-Literatur verschiedene Definitionen, die die Lehre über die Nutzbarmachung des Lichtes mit dem weiten Anwendungsspektrum in Verbindung bringen. Das Wort selbst ist eine Kombination aus dem Begriff Photon (Lichtteilchen) und der griechischen Nachsilbe -ik, die soviel bedeutet wie „Kunde von“ bzw. „Lehre von“.

In Anlehnung an die Elektronik arbeitet die Technologiewissensplattform ITWissen.info die besonderen Spezifika der Photonik heraus: *„Die Photonik ist eine moderne Technologie bei der Licht und Photonen die Trägerrolle für die Daten und Informationen in optischen Medien übernehmen, so wie es der Strom und die Elektronen in der Elektronik tun. Die Photonik steht für die optische Signalerzeugung, für die Verarbeitung, Aufbereitung und Speicherung von optischen Pulsen und für die optische Übertragung. Der wesentliche Unterschied in der Übertragung von Licht liegt in den quantenphysikalischen Effekten, die in die optische Verarbeitung und Übertragung hineinspielen.“*

In den wissenschaftlichen Studien wird zumeist die grundsätzliche Definition der europäischen Plattform Photonics21 herangezogen, in der die Photonik als *„die Wissenschaft und die Technologie bezeichnet wird, die Licht nutzbar macht. Sie umfasst die Erzeugung von Licht, die Detektion von Licht und das Lichtmanagement durch Führung, Manipulation und Verstärkung und nicht zuletzt den Nutzen und Vorteil von Licht für die Menschheit.“*

Die Photonik hat in **verschiedenen Anwendungsbereichen** Einzug gehalten, die in diesem Report, angelehnt an die Photonics21-Gliederung bzw. die Statistiken der globalen Weltmarktanteile, vereinfacht dargestellt in fünf Sektoren aufgegliedert werden:

- ❖ Beleuchtung und Displays
- ❖ Energie- und Umwelttechnik
- ❖ Informations- und Kommunikationstechnologie
- ❖ Life Science und Gesundheit
- ❖ Industrielle Produktion und Qualitätsmanagement

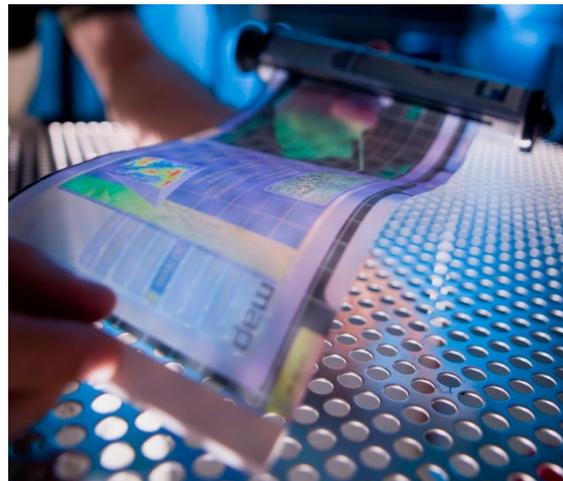
1.1. Beleuchtung und Displays

Die Umstellung von herkömmlichen Glühlampen und Energiesparlampen zu lichtemittierenden Dioden (LEDs) ist durch gesetzliche Vorgaben und verbesserte Technik samt günstigeren Preisen gegenwärtig im Gange. Darüber hinaus sind die zukünftigen Entwicklungen von Hochleistungs-LEDs und **organischer Leuchtdioden (OLEDs)** vielversprechend und weitere Anwendungsfelder zu erwarten. Abseits der hohen Energieeffizienz zeichnen sich LEDs dadurch aus, dass die spektrale Zusammensetzung variabel und durch intelligente Steuerungen an die jeweilige Umgebungssituation anpassbar ist. Dies ist nicht nur im Wohn- und Arbeitsumfeld von Bedeutung, sondern insbesondere auch für die Automobilindustrie – blendfreies Fernlicht ist nur durch intelligente LED-Technologie möglich. Der technologische Sprung zu OLEDs lässt viel Neues erwarten, stellt er doch eine völlig neue Art des Lichtes da. Die herkömmlichen LED-Punktlichtquellen können damit durch flexible leuchtende Dünnschichtbauelemente ergänzt werden, die flächiges und diffuses Licht liefern. Transparente Lichtfolien auf Fensterflächen und leuchtende Tapeten sind bereits in naher Zukunft zu erwarten.

Die **Vorteile von OLEDs** im Überblick:

- ❖ große Helligkeit bei geringem Energieverbrauch
- ❖ geringes Gewicht und Volumen
- ❖ potenziell einfache Herstellungsverfahren
- ❖ große Farbvariabilität und neue Designmöglichkeiten
- ❖ Stabilität und lange Lebensdauer
- ❖ flexibel, transparent, flächig

Auch die Ausgestaltung und Verwendungsmöglichkeiten von Displays werden durch diese Eigenschaften revolutioniert. Von Head-up-Displays, wie sie in der Automobilindustrie zu sehens Einzug finden bis hin zu rollbaren E-Paper, von zwei- und dreidimensionalen Visualisierungen (z.B. „Virtual Reality“ oder Hologramme) bis hin zu großflächigen Anzeige- und Bedienoberflächen reicht das visionäre Spektrum zukünftiger Anwendungen.



Biegsames Display

Quelle: Wikimedia Commons / U.S. Army RDECOM

1.2. Energie- und Umwelttechnik

(Organische) Leuchtdioden tragen durch ihre Energieeffizienz zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele bei. Sehr großes Potenzial wird aber durch optoelektronische Technologien nicht nur bei der Energieeinsparung gesehen, sondern auch seitens der erneuerbaren Energieerzeugung durch den Einsatz von organischen Solarzellen. **Organische Photovoltaik**, heute noch ein Nischenbereich, wird zukünftig die direkte solare Stromerzeugung dominieren, da sie gegenüber derzeitigen PV-Zellen deutliche Vorteile besitzt. Auch hier ist es die Flexibilität der organischen Halbleitertechnologie, die ungeahnte neue Anwendungsmöglichkeiten bieten wird. Großflächig hergestellte leichtgewichtige Solarzellen, die in unterschiedlichste Konsumgüter, von der Kleidung bis zum Alltagsgegenstand, integriert werden können bis hin zur transparenten Photovoltaik, die auf beliebigen Flächen aufgetragen werden kann. Durch neue ebenfalls durch Photonik beeinflusste Fertigungsverfahren werden Herstellungskosten zunehmend verringert mit gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrades.

Eine weitere Möglichkeit zur alternativen Energieerzeugung stellt die **künstliche Photosynthese** dar, die die interdisziplinäre Forschung in den nächsten Jahren weiter herausfordern wird. Durch die Implementierung neuer photonischer Technologien, wie laserspektroskopischer Methoden, sind neue Erkenntnisse in der Photosyntheseforschung zu erwarten.

Zum Bereich „Green Photonics“ zählen auch Sensoren und die damit im großen Stil möglichgewordene analytische Überwachung von Umweltzuständen. Herausforderungen sind mit neuen Sensoren verbunden, die etwa Mikroorganismen detektieren oder zur Reinigungsoptimierung beitragen. Auch bei der drahtlosen Übertragung der Sensordaten besteht weiterer Forschungsbedarf.

Einen weiteren Baustein zur Überwachung bzw. zum Monitoring von Klimaveränderungen und Umwelteinflüssen stellt die **Fernerkundung** dar. Vom Laserscanner, über zahlreiche Sensoren, möglichst leichten und kleinen (Satelliten-)Bauteilen bis hin zu Hyperspektralkameras, 3D-Bildverarbeitungssystemen und Datenübertragungen über große Entfernungen – nichts davon wäre ohne Photonik möglich.

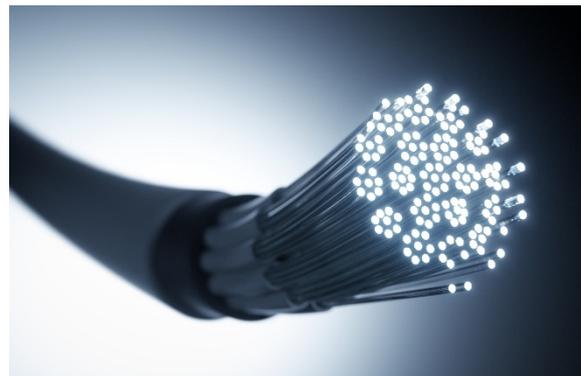


Terrestrischer Laserscanner
Quelle: Wikimedia Commons / Ekrem Canli

1.3. Informations- und Kommunikationstechnologie

Durch die Überlagerungsfähigkeit von Licht ist es ein ausgezeichneter Informationsträger, in dem Daten unterschiedlicher Frequenzbänder und Polarisierungen zeitlich und räumlich dicht gepackt werden können ohne Wechselwirkungen einzugehen. Das **Prinzip optischer Kommunikation** beruht auf drei Komponenten: dem Sender, dem optischen Signalpfad und dem Empfänger. Der Sender wandelt ein elektrisches Signal in helle und dunklere Lichtimpulse um, die unabhängig von der Länge der Übertragungsstrecke nahezu verlustfrei durch einen optischen Signalpfad, einem Faserbündel aus Quarzglas oder Kunststoff, gesendet werden. Eine Photodiode als Empfänger wandelt die Lichtimpulse wieder in das elektrische Signal zurück.

Glasfaserbasierte Informations- und Kommunikationsnetze sind wichtigster Bestandteil moderner Datenübertragungen und damit Fundament des heutigen Internets. Um **hohe Datenübertragungsraten** bis zur Endkundin bzw. zum Endkunden gewährleisten zu können, steht unter dem Motto „**fiber to the home**“ die Glasfaseranbindung einzelner Häuser im Mittelpunkt zukünftiger Bestrebungen. Damit könnten im gegenwärtigen System Datenübertragungsraten von 100 MBit/s sichergestellt werden.



Glasfaserkabel

Quelle: psdesign1 - stock.adobe.com

Das darüberhinhaus bestehende Zukunftspotenzial von Licht als Informations- und Kommunikationstechnologie zeigt die Visible Light Communication mit der Datenübertragungsraten im Bereich von **Gigabytes** pro Sekunde möglich sein sollen (siehe Kapitel 2.1.).

Aber nicht nur in der Datenübertragung über große Entfernungen auch im Klein- und Kleinstbereich sind die Photonik-Forschungen vielversprechend. Optische Übertragungsverfahren sind in der Lage auch die Geschwindigkeiten für Prozessoren und Hochleistungsrechner zu erhöhen („**optische Computer**“). Mit Hilfe der integrierten Optik sollen Datenverbindungen realisiert werden, die eine schnellere Datenübertragung und weitere Miniaturisierung ermöglichen.

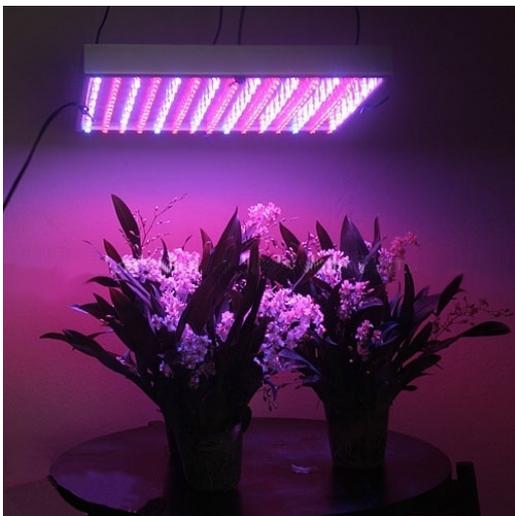
Die nächste High-tech-Stufe stellt der **Quantencomputer** dar, der auf quantenmechanischen Prinzipien beruht und die Rechenleistung gegenwärtiger Supercomputer um ein Vielfaches übertreffen soll (siehe Kapitel 2.3.).

1.4. Life Science und Gesundheit

Die Entwicklung immer leistungsfähigerer **Lichtquellen** wie Laser und LEDs, **Detektoren** sowie Fortschritte in der **Datenauswertung** führten schon in den letzten Jahren zu völlig neuen praktischen Anwendungen im Bereich der Life Sciences und Medizintechnik. Ein Beispiel von vielen ist die vor etwa 5 Jahren eingeführte Augenoperationstechnik für den grauen Star, bei der die Behandlung anstatt mit dem Skalpell mit einem mikrometergenau geführten Femtosekundenlaser, einem speziellen Ultrakurzpulslaser, durchgeführt wird. Von der Laserbehandlung, die mittlerweile Standard an vielen Augenkliniken wurde, profitieren besonders die durch den demographischen Wandel zahlreicher werdenden älteren Menschen.

Photonik ist daher bereits jetzt ein unverzichtbarer Bestandteil der modernen Medizintechnik mit intensiven Forschungen und einem jungen, aber aufstrebenden Markt. Besondere Stärken zeigen die Anwendungen der Photonik in der **berührungsfreien Analyse**, worunter etwa Untersuchungen von lebenden Geweben (wie Hautuntersuchungen auf maligne Strukturen, Analyse von Zellkulturen) zu verstehen sind. In Verbindung mit neuen Datenverarbeitungsmethoden werden auch Anwendungen der Diagnose im Körperinneren revolutioniert, wie die wesentlich nebenwirkungsärmere und weniger unangenehme Darm- und Magenspiegelung mit einer verschluckbaren Kapsel belegt. Bei Operationen von Gehirntumoren bieten fluoreszierende Farbstoffe die Möglichkeit, erkranktes Gewebe durch Eigenleuchten zu identifizieren und so die Erfolgsrate wesentlich zu steigern.

Auch die **pharmazeutische Wirkstoffentwicklung** wird von Fluoreszenzverfahren fundamental beeinflusst. Neue Nanomaterialien sind bereits heute in der Lage, die zelluläre Wirkung der neu entwickelten Substanzen besser als mit klassischen chemischen Methoden nachzuweisen. Künftig wird es kaum ein Medikament geben, an dessen Entwicklung nicht biophotonische Verfahren mitgewirkt haben.



LED-Leuchten für optimiertes Pflanzenwachstum
Quelle: Wikimedia Commons / Sunshine 117

Im Bereich der Life Sciences versprechen **Schnelltests** von Werkstoffen, wie die Prüfung von Nähten von Lebensmittel- oder Medikamentenverpackungen oder die Kontrolle der Beschichtungsdicken von Tabletten rasche, kostengünstige und sichere Kontrollen bei der Qualitätssicherung.

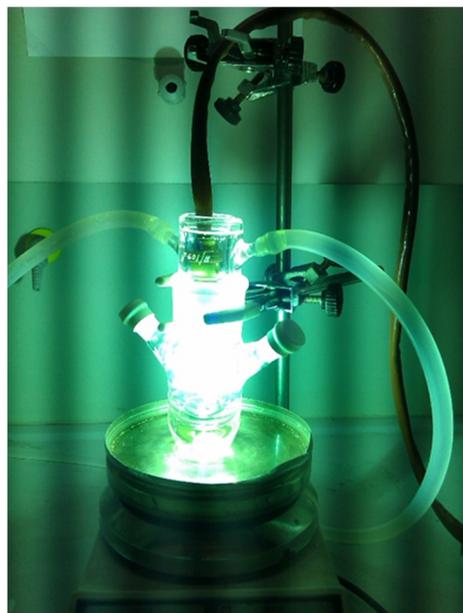
Im Zuge des weltweiten Bevölkerungswachstums und dem Wunsch nach möglichst frischen Lebensmitteln in Großstädten werden bereits seit Jahren die Chancen des „**Vertical Farmings**“ in Verbindung mit künstlicher Beleuchtung diskutiert. Aller-

dings standen bislang den Vorteilen wie der Flächensparnis sowie einem geringen Einsatz an Wasser und Pflanzenschutzmitteln die großen benötigten Energiemengen entgegen. LED-Leuchten, die speziell die von den Pflanzen für das Wachstum benötigten Wellenlängen erzeugen, benötigen jedoch nur mehr einen Bruchteil der früheren Energiemenge, und tragen zu einem Aufschwung dieser Technologie bei.

1.5. Industrielle Produktion und Qualitätsmanagement

Schon alleine der Umstand, dass laut deutschem Bundesamt für Bildung und Forschung knapp 20 Prozent des weltweiten Stromverbrauchs für die **Beleuchtung** eingesetzt werden, zeigt die Bedeutung und umgekehrt auch die Zukunftspotenziale dieser Sparte auf. Im Vergleich zu herkömmlichen Lichtsystemen besitzt die LED-Technologie (siehe auch Kapitel 1.1.) eine Reihe von Vorteilen wie hohe Energieeffizienz, große Farbvielfalt, Stabilität, lange Lebensdauer, Brillanz und neue Designmöglichkeiten. Um diese etwa in Richtung Energieeffizienz auszunützen, entstehen neue Geschäftszweige, die von der Produktion **intelligenter Lichtmanagementsysteme** (zum Beispiel in Smart-City-Anwendungen) bis hin zu optimierten Kühlern und Gehäusen reichen.

Licht ermöglicht und beschleunigt zahlreiche organische als auch anorganische chemische Reaktionen. Es ist rückstandslos und leicht herstellbar. Trotz dieser vorteilhaften Eigenschaften von Licht als „Reaktand“ oder „Katalysator“ werden bislang großtechnisch nur wenige chemische Synthesen unter Lichteinfluss durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung von Benzylchlorid aus Toluol und Chlor, das zur Herstellung von Farben und Kunststoffen verwendet wird. Das in die Gasphase eingestrahlte intensive Licht spaltet Chlor in reaktive Bestandteile, ein Prinzip, das auch für eine Reihe anderer chemischer Reaktionen eingesetzt werden kann. Die LED-Technologie schafft die Voraussetzung, dass auch größere Reaktoren gleichmäßig mit Licht einer gewünschten spektralen Eigenschaft bestrahlt werden und unterstützt somit eine künftige **industrielle Photochemie**.



Photochemischer Reaktor

Quelle: Wikimedia Commons / Masohe

Viele organische Substanzen treten in zwei (oder sogar mehr) Formen auf, die sich nur in ihrer räumlichen Anordnung – ähnlich wie die linke und rechte Hand – unterscheiden. Aufgrund der großen chemischen Ähnlichkeit ist eine Trennung dieser „chiralen“ Moleküle meist schwierig. Eine **optische Hightech-Pinzette** kann wirksame Moleküle von den fast identi-

schen aber unwirksamen bzw. sogar schädlichen Molekülen abtrennen, was insbesondere im Bereich der Agrochemikalien und Pharmazie Vorteile verspricht.

Die schon seit mehreren Jahrzehnten zu beobachtende immer weitere Verbreitung der Lasertechnologie in der Metallverarbeitung erlebt durch die Erfindung des **Ultrakurzpulslasers** einen weiteren Schub. Die ultrakurzen Pulse ermöglichen eine Kaltbearbeitung, d.h. außerhalb der zu bearbeitenden Zone erfolgt kein Wärmeeinfluss auf das Werkstück. Damit können auch Kunststoffe, Keramiken und viele Metalle bis hin zu komplexen Verbundsystemen wie Solarzellen optimal bearbeitet werden.

Bei der **Qualitätskontrolle** punkten photonische Verfahren durch ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, die Robustheit sowie der Zerstörungs- bzw. Berührungsfreiheit. Ein konkretes Beispiel ist die Prozessoptimierung, bei der durch Infrarotspektroskopie die momentanen Reaktionszustände exakt ermittelt werden. Dadurch wird die Qualität der Produkte erhöht, zusätzlich bringen Energieeinsparungen sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile, sodass sich Mehraufwendungen durch die zu installierende Messtechnik rasch amortisieren.

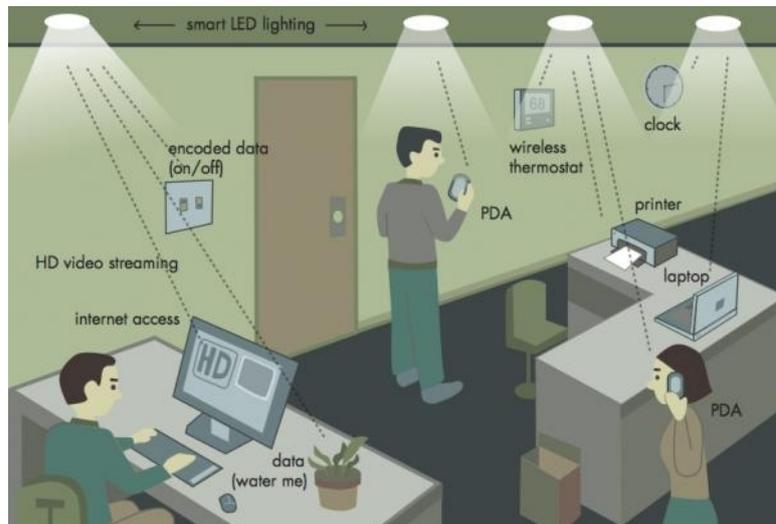
2. Entwicklungen mit Zukunftspotenzial

Welches Entwicklungspotenzial die Photonikforschung birgt, soll anhand von **ausgewählten Beispielen** ersichtlich und greifbar gemacht werden. Im folgenden werden vielversprechenden Zukunftstechnologien aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen beschrieben, deren Realisierung ohne photonische Komponenten und Systeme nicht möglich ist.

2.1. Visible Light Communication

Die Visible Light Communication (VLC) wurde 2003 erstmals vorgestellt. Synonym dazu wird sie heute auch als **Lifi** („**light fidelity**“) bezeichnet, in Anlehnung an den eingebürgerten Begriff Wifi („**wireless fidelity**“) für Drahtlosnetzwerke.

Ähnlich einer Fernbedienung, die Infrarotwellen zur Datenübertragung nutzt, ist es durch LED-Technologie möglich auch größere Datenmengen durch den Raum zu schicken. Einerseits können Lichtsignale mit unterschiedlichen Wellenlängen gleichzeitig verschickt werden ohne sich zu überlagern, andererseits ist ein extrem rasches Ein- und Ausschalten von LEDs möglich.



Verschiedene VLC-Anwendungen

Quelle: Wikimedia Commons / Alejosemejagp

Forscher/innen gelang es mit Hilfe winziger Modulatoren Dateninformationen aus dem Stromnetz bei Bedarf zu verstärken und sie an Lichtquellen zu übertragen. Über ein spezifisches Lichtmuster, dem raschen Flankern der LEDs, können die Daten an verschiedenste Endgeräte übertragen werden, die über einen Empfänger für sichtbares Licht verfügen müssen. Das menschliche Auge nimmt das **schnelle Ein- und Ausschalten der LEDs** nicht wahr. Im Laborversuch konnten bereits Übertragungsraten von 224 Gigabit/s erreicht werden. Licht, das keine Dateninformationen beinhaltet, beeinflusst das System nicht – außer es würde gebündelt auf den Lichtempfänger auftreffen.

Große Vorteile dieser Übertragungsweise sind die **hohen Übertragungsgeschwindigkeiten** und die **geringe Fehleranfälligkeit**. Auch aus Datenschutzsicht ist das Lifi dem herkömmlichen WLAN überlegen: die Signale sind nicht manipulierbar und gehen nicht durch Wände, was das Abfangen der Daten weitgehend unmöglich macht. Die Reichweiten der Lifi-

Übertragung sind dadurch aber auch eingeschränkt: jedes Empfangsgerät muss in Sichtweite einer Lichtquelle sein.

Die Anwendungsbereiche von Lifi sind überall dort, wo eine LED-Lichtquelle vorhanden ist. Die Palette reicht von Highspeed-Internet aus Straßenlaternen bis zu kommunizierenden Fahrzeugscheinwerfern. Auch in sensiblen Bereichen, in denen Datenübertragungen über Radiofrequenzen verboten sind, kann Licht-WLAN angewendet werden (z.B. in Krankenhäusern, Flugzeugen).

Experten/innen rechnen mit einem Durchbruch der VLC in den **nächsten 5 bis 15 Jahren**. Gegenwärtige Forschungen beschäftigen sich zunehmend mit – für das Auge ungefährlichen – Infrarotsignalen zum Aufbau eines Lifi, da diese das Potenzial haben auch durch Wände gehen zu können.

2.2. Holographie

Hologramme sind **dreidimensionale Darstellungen** eines Objekts, das heißt, man kann sie im Unterschied zu einem Foto aus verschiedenen Richtungen betrachten. Außerdem fehlt ein Schärfentiefebereich, außerhalb dessen die Abbildung unscharf wird, sodass der Betrachter jedes Teil eines Hologramms, auf den er seine Augen fokussiert, scharf sieht. Bei der Holographie wird zur Aufnahme von Objekten neben den in der Fotografie verwendeten Eigenschaften des Lichts Frequenz (Farbe) und Amplitude (Intensität) auch die **Phase** aufgezeichnet. Zur Erstellung eines Hologramms wird kohärentes¹ Licht meist im sichtbaren Bereich, wie es auch Laser erzeugen, verwendet.



Hologramm des Aufbaues eines Autos
Quelle: videodoctor- stock.adobe.com

Anwendung finden holographische Bauelemente gegenwärtig in Barcodescannern, Laserscannern und in Head-up-Displays, da sie gegenüber herkömmlichen optischen Elementen leichter, wegen der nicht notwendigen Krümmung wesentlich flacher und zugleich sehr transparent und exakt sind. Auch Echtheitszertifikate auf Geldscheinen, in Pässen oder auf Tickets enthalten oft holographische Elemente, da sie nur sehr schwer zu kopieren sind. Mit Hilfe der holographischen Interferometrie untersuchen Ingenieure/innen auch kleinste Bewegungen oder Verformun-

¹ Kohärenz bezeichnet die Eigenschaft von Wellen, dass es zwischen zwei Wellenzügen eine feste Phasenbeziehung gibt. Gewöhnliche Lichtquellen senden im Gegensatz zu z. B. Lasern kein kohärentes Licht aus.

gen von Bauteilen, die unter Belastung stehen. In der Archäologie können Hologramme von archäologischen Fundstücken am Computer weiterverarbeitet werden. Damit entfallen Aufwand und Risiko beim Transport. In der Medizin wird an Verfahren zur dreidimensionalen Gesichtsprüfung mit Holographie geforscht, da bei Operationen im Gesicht sorgfältige Planungen notwendig sind. Ebenfalls von Bedeutung für chirurgische Eingriffe ist die Entwicklung befindliche holographische Endoskopie.

Die Röntgenholographie ermöglicht hochaufgelöste Abbildungen von Nanostrukturen und spielt sie eine bedeutende Rolle in der Speicherung von Daten mittels magnetischer Nanowirbel, sogenannter Skyrmionen, welche als Hoffnungsträger einer effizienten **Speichertechnik der Zukunft** gelten. Der Vorteil von **holographischer Datenspeicherung** gegenüber herkömmlichen Methoden ist, dass man die Informationen im gesamten Volumen des Objekts aufnehmen kann und nicht nur auf dessen Oberfläche. Ein kommerzielles Produkt gibt es hier aber noch nicht.

Neue Anwendungsfelder könnte die **Wifi-Holographie** aufdecken. Mikrowellenstrahlung von Mobiltelefonen, WLAN-Routern oder Bluetooth-Geräten, welche an Objekten in der Umgebung absorbiert und gestreut wird, kann zur automatisierten Detektion und Verfolgung von Objekten innerhalb von Gebäuden, vor allem im Kontext von Industrie 4.0, dienen. Es könnten damit auch 3D-Scans von Gebäuden oder Strukturen erstellt werden um z.B. verschüttete Personen nach Erdbeben oder Lawinen zu lokalisieren.

Neben der Erzeugung von Hologrammen mittels kohärenten Lichts ermöglichen Hochleistungsrechner die Generierung der Interferenzmuster, die in den jeweiligen Hologrammen gespeichert sind. Damit entfällt der zeit- und kostenintensive Aufnahmeprozess und insbesondere bewegte holographische Bilder sind mit dieser Methode greifbar geworden. Zur Realisierung von **holographischen Displays** müssen jedoch noch einige Hürden überwunden werden. Beispielsweise müssen die Pixelgrößen unter einem Mikrometer liegen, wodurch viele Billionen Pixel² nötig wären, um vernünftige Bildschirmgrößen zu produzieren. Außerdem stellt die **riesige Datenmenge** eine noch zu überwindende technische Herausforderung für die gesamte Kette der 3-D-Bildgebung dar.

Vor kurzem wurde eine Methode entwickelt, mit der sich **helle, farbintensive Hologramme** anfertigen lassen, welche **ohne Laser**, mit normalem Weißlicht betrachtet werden können. Das neu entwickelte Hologramm absorbiert im Gegensatz zu bisherigen Projektionen keine Lichtanteile, sondern lenkt sie um. Damit hat es einen großen Vorteil gegenüber herkömmlichen farbigen Hologrammen, die sowohl für die Herstellung als auch die Darstellung einen Laser benötigen. Die Forscher glauben, dass ihre Hologramme etwa auf Geldscheinen oder Kreditkarten die bisherigen Sicherheitshologramme ersetzen könnten.

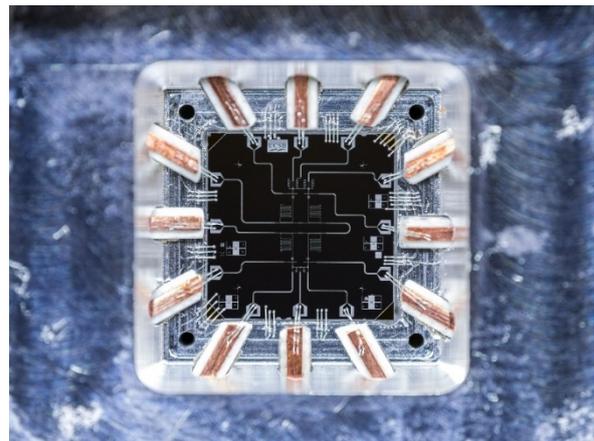
² Heutige Bildschirme haben einige Millionen bis zu ca. 100 Millionen Pixel, also eine Million Mal weniger als für holographische Displays nötig wäre.

2.3. Quantencomputer

Quantencomputer nutzen als Rechen- und Speichereinheiten sogenannte **Qubits** (Quantenbits). Im Unterschied zu den Bits der herkömmlichen Computer, die entweder den Wert Null oder Eins haben, können Qubits **unendlich viele Mischzustände** zwischen Null und Eins annehmen. Außerdem können sich mehrere Qubits in einem verschränkten Zustand befinden. Durch diese beiden Phänomene kann die Rechenleistung eines Quantencomputers einen sehr hohen Grad an Parallelität erreichen, sodass er die von herkömmlichen Computern weit übertrifft.

Zur Realisierung von Quantencomputern werden vorwiegend folgende physikalische Objekte als Qubits erforscht:

- ❖ Ionen in Ionenfallen: Hierbei werden einzelne Ionen durch elektromagnetische Felder im Vakuum wie an einer Perlenkette aufgereiht. Die Qubits werden dabei durch jeweils zwei langlebige Zustände der einzelnen Ionen gebildet. Die Manipulation der Qubits erfolgt über Laser, die mit den einzelnen Ionen wechselwirken.
- ❖ Einzelne Elektronen oder neuerdings alternativ Elektronenlöcher in Halbleitern werden über äußere Magnetfelder manipuliert.
- ❖ Bei Supraleitersystemen (sogenannte SQUIDs, engl. superconducting quantum interference devices) erfolgt die Manipulation der Qubits über die angelegte Spannung und das Magnetfeld.
- ❖ Da Photonen keine Ladung besitzen, können sie nicht über elektromagnetische Kräfte wechselwirken und brauchen deshalb einen Mittler, um ihre mitgeführten Informationen verarbeiten zu können. Dazu wird ein einzelnes Atom in einem Resonator, bestehend aus zwei Spiegeln in einem Abstand von einigen Zehntelmillimetern, verwendet. Die Zustände der Qubits sind in die Polarisation (Schwingungsrichtung der Lichtwelle) der Photonen kodiert.



Ein supraleitendes Transmon Qubit

Quelle: Michael Fang/Josephson Junction Quantum Computing at UCSB

Anders als in digitalen Computern können äußere Einflüsse nicht so leicht gedämpft werden, weil sie sich auf einem sehr niedrigen Energieniveau abspielen. Je höher die Anzahl an verschränkten Qubits, desto höher ist auch die Fehlerrate. Inzwischen wird an Quantencomputern mit einer Fehlerkorrektur, der sogenannten **Quantenkorrektur**, gearbeitet.

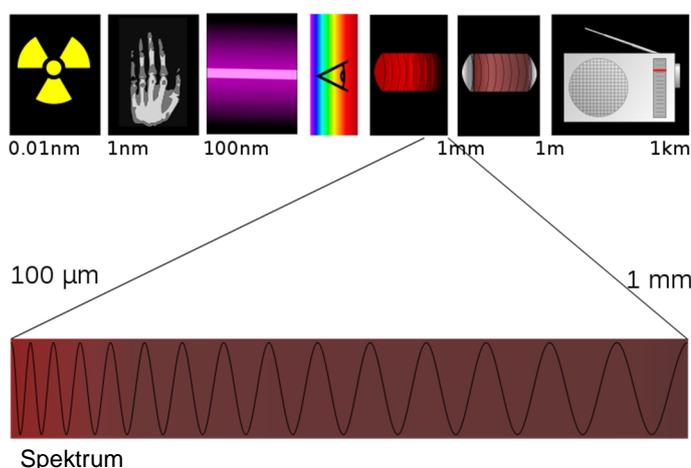
Bereits ein System mit etwa fünfzig Qubits würde die Rechenleistung eines heutigen Superrechners übersteigen. Ein voll funktionsfähiger, programmierbarer Quantencomputer wurde bislang mit fünf Qubits realisiert. In Experimenten gelang es bereits mehr als 20 Qubits miteinander zu verschränken, doch die Forscher sind sich einig, dass es noch einige Jahre vielleicht sogar Jahrzehnte dauert, bis es universelle Quantencomputer gibt. Sie werden die klassischen Computer nicht ersetzen, sondern sie für spezielle Probleme ergänzen.

Große IT-Konzerne, wie Google, IBM und Microsoft aber auch Geheimdienste haben das große Potenzial erkannt und investieren in diese Technologie. Denn Quantencomputer könnten **komplexe Optimierungsaufgaben** lösen, **große Datenmengen** analysieren oder bestehende **Verschlüsselungsmethoden** knacken. Außerdem könnten sie helfen bisher nicht lösbare Problemstellungen in Physik oder Chemie zu bearbeiten oder in anderen Gebieten wie der Materialforschung oder Medikamentenentwicklung völlig neuen Wegen zu folgen. Damit könnten Quantencomputer einer der bedeutendsten Technologietreiber des 21. Jahrhunderts werden.

2.4. Terahertz-Technologien

Die Terahertzstrahlung ist wie sichtbares Licht, Röntgen-, UV-, Infrarot-, und Radiostrahlung eine **elektromagnetische Welle**, die im Spektrum zwischen Infrarot und den Mikrowellen liegt und einen Frequenzbereich von etwa 0,3-10 THz aufweist.

In Hinblick auf viele technische Anwendungen wie Sicherheitstechnik, Medizin, chemische Analyse, Qualitätssicherung in der Produktion hat Terahertzstrahlung sehr **günstige physikalische Eigenschaften**, da sie viele Materialien wie beispielsweise Kleidung oder Kunststoff sowie organisches Gewebe durchdringt und bildgebende Verfahren ermöglicht. Aufgrund der geringen Energie der Photonen wirkt sie im Gegensatz etwa von Röntgenstrahlung nicht ionisierend, sodass keine Strahlenbelastung von Menschen oder Tieren sowie keine Veränderung von biologischen Proben auftreten.



Aufgrund der technischen Schwierigkeiten der Herstellung von Terahertzsendern und -empfängern begann die technische Nutzung dieses Spektralbereiches in der Praxis erst vor wenigen Jahren insbesondere durch den auch in der Öffentlichkeit diskutierten Einsatz von **Körperscannern** auf Terahertzwellenbasis auf Flughäfen.

Durch die rasche Entwicklung neuer und immer leistungsfähigerer und kleinerer Terahertzsender und -empfänger sowie Datenverarbeitungsroutinen werden in naher Zukunft **viele neue technische Anwendungen** entstehen.

Als Weiterentwicklung der voluminösen Körperscanner führten flexible Detektoren auf Basis der Kohlenstoff-Nanoröhrchen-Technologie zur Entwicklung von erste Prototypen von **tragbaren Terahertzscannern**, von denen sich die Sicherheitstechnik, aber auch die Medizin völlig neue Analyse- und Diagnosemöglichkeiten erhofft. Für den Blick in das Körperinnere können künftig möglicherweise die sehr teuren Magnetresonanztomographen durch Terahertzscanner ersetzt oder zumindest in vielen Anwendungen ergänzt werden.

Ein wesentlicher Bestandteil der Terahertz-Technologie werden leistungsfähige **Terahertzlaser** sein, die Wellen mit hoher Intensität und Kohärenz aussenden, und somit Basis für einen optimalen Sender darstellen. Auf Basis eines Terahertzlaser wurde bereits ein ultraschnelles 3D-Mikroskop entwickelt, mit dem das Innere lebender Organismen in Realzeit abgebildet wird, wodurch neue Chancen für Forschung und medizinische Praxis entstehen.

Die Eigenschaft der Terahertzwellen, organisches Material zerstörungsfrei zu Durchleuchten könnte in der Zukunft auch vielfältige und kostengünstige Anwendungen in der Qualitätsüberwachung in der **Lebensmittel- sowie der pharmazeutischen Industrie** ermöglichen.

Die im Verhältnis zu den derzeit im Kommunikationssektor (WLAN, 5G etc.) verwendeten Mega- und Gigahertzfrequenzen höheren Frequenzen im Terahertzbereich erlauben die drahtlose Übertragung von wesentlich mehr Informationen. Sollten die noch vorhandenen technischen Herausforderungen gelöst werden, könnten in einigen Jahren sogar Übertragungsraten von einem **Terabyte pro Sekunde** und mehr Realität werden.

2.5. Nanobots

Im Bereich der Nanobots oder Naniten verschmilzt die Nanotechnologie mit der Photonik. Es handelt sich dabei um **künstliche Maschinen in der Größenordnung von Molekülen**, deren Einsatzgebiete von der Medizin über die Produktion und Überwachung bis hin zur Weltraumforschung reichen sollen.

Sie werden zur Illustration oft als kleine Robotermaschinen mit Greifarmen dargestellt. Es wird aber an unterschiedlichsten Ausformungen experimentiert: die nanometergroßen Roboter werden etwa der menschlichen DNA nachempfunden oder haben Bakterien und Viren zum Vorbild. Die gerichtete Bewegung von Nanobots kann über molekulare Motoren erfolgen, die z.B. bei Lichteinfluss deren Molekülstruktur verändern und damit eine Richtungsänderung initiieren. Andere werden über ein Magnetfeld in Bewegung versetzt, finden per Fernsteuerung oder Rotation ihren Weg.



Illustrierte Nanobots in der Medizin
Quelle: freshidea – stock.adobe.com

Die Optoelektronik ermöglicht diese **extreme Miniaturisierung**. Für Forscher/innen sind optoelektronische Bauteile in der Größe von fünf Nanometern denkbar, danach stören beginnende Quanteneffekte die Informationsverarbeitung.

Mit Hilfe von **Nanobots in der Medizin** sollen zukünftig z.B. Arterien von Verstopfungen befreit und so Schlaganfälle verhindert werden. Aber auch die Überwachung von Krebstumoren während einer Chemotherapie oder des Augeninnendrucks bei Patienten/innen mit grünem Star sind aktuelle Forschungsfelder. Die kleinen Roboter könnten auch Medikamente zu bestimmten Zellen im Körper bringen und so nebenwirkungsfrei zur Heilung beitragen. Die Zukunftsvision der Wissenschaftler/innen besteht aus einer Minimierung operativer Eingriffe mit gleichzeitiger Erhöhung schmerzfreier und narkosefreier Behandlungen durch optoelektronische Miniaturwunder.

Ein weiteres zukunftssträchtiges Anwendungsbeispiel für Nanobots ist **intelligenter Staub (= „Smart Dust“)**. Vernetzte Mikrosysteme, bestehend aus einem Sensor, einem optischen Sender bzw. Empfänger und einer eigenen Stromversorgung, sollen eine großflächige Überwachung und Echtzeit-Datensammlung ermöglichen. Vor allem im Umweltbereich scheinen die Anwendungsbereiche schier endlos - von der Waldbrand- und Chemikalienausbreitung, über Erdbebenvorhersagen und Verkehrsüberwachungen bis zum Energieverbrauchsmonitoring. Aber auch zur Überwachung von Produktionsprozessen soll der intelligente Staub eingesetzt werden. Neben den noch bestehenden technologischen Herausforderungen ist auch die Datenschutzfrage zu klären.

3. Potenziale und Empfehlungen

Die Photonik wird von der Europäischen Kommission als **eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien** („Key Enabling Technologies“, KETs) für Wettbewerbsfähigkeit und Wachstum angesehen. KETs sind *„wissensintensiv und durch hohe Forschungs- und Entwicklungsintensität, schnelle Innovationszyklen, hohen Kapitalaufwand und hochqualifizierte Arbeitskräfte gekennzeichnet. Sie ermöglichen Innovationen bei Prozessen, Waren und Dienstleistungen und sind von systemischer Bedeutung für die gesamte Wirtschaft.“* (Europäische Kommission, 2009)

3.1. Weltmarktentwicklung und oberösterreichische Potenziale

Die globale Bedeutung und das zukünftige Potenzial photonischer Produkt wird durch eine Gegenüberstellung des photonischen Weltmarktvolumens samt Prognose für das Jahr 2020 ersichtlich.

Lag das Weltmarktvolumen der Photonik im Jahr 2005 noch bei 228 Mrd. Euro pro Jahr, hat es sich bis 2015 nahezu verdoppelt und wird im Jahr 2020 über 600 Mrd. Euro betragen. Es fällt auf, dass in fast allen angeführten Bereichen mit **steigenden Absatzvolumina** zu rechnen ist. Die Wachstumskurve hat sich lediglich im Beleuchtungsbereich seit der Verbreitung der LED-Technologie abgeflacht und auch im Kommunikationsbereich werden bis 2020 weniger große Sprünge erwartet. Dies könnte sich durch neue Funkstandards in der Informations- und Kommunikationstechnik bzw. durch neue Technologien wie der Visible Light Communication (siehe Kapitel 2.1.) durchaus auch ändern. Als Wachstumsbranche in den nächsten Jahren wird die Energietechnik angesehen, was auf sehr erfolgreichen Forschungsergebnissen im Bereich der organischen Photovoltaik fußt und durch die Bestrebungen in Richtung Energiewende politische Unterstützung findet.

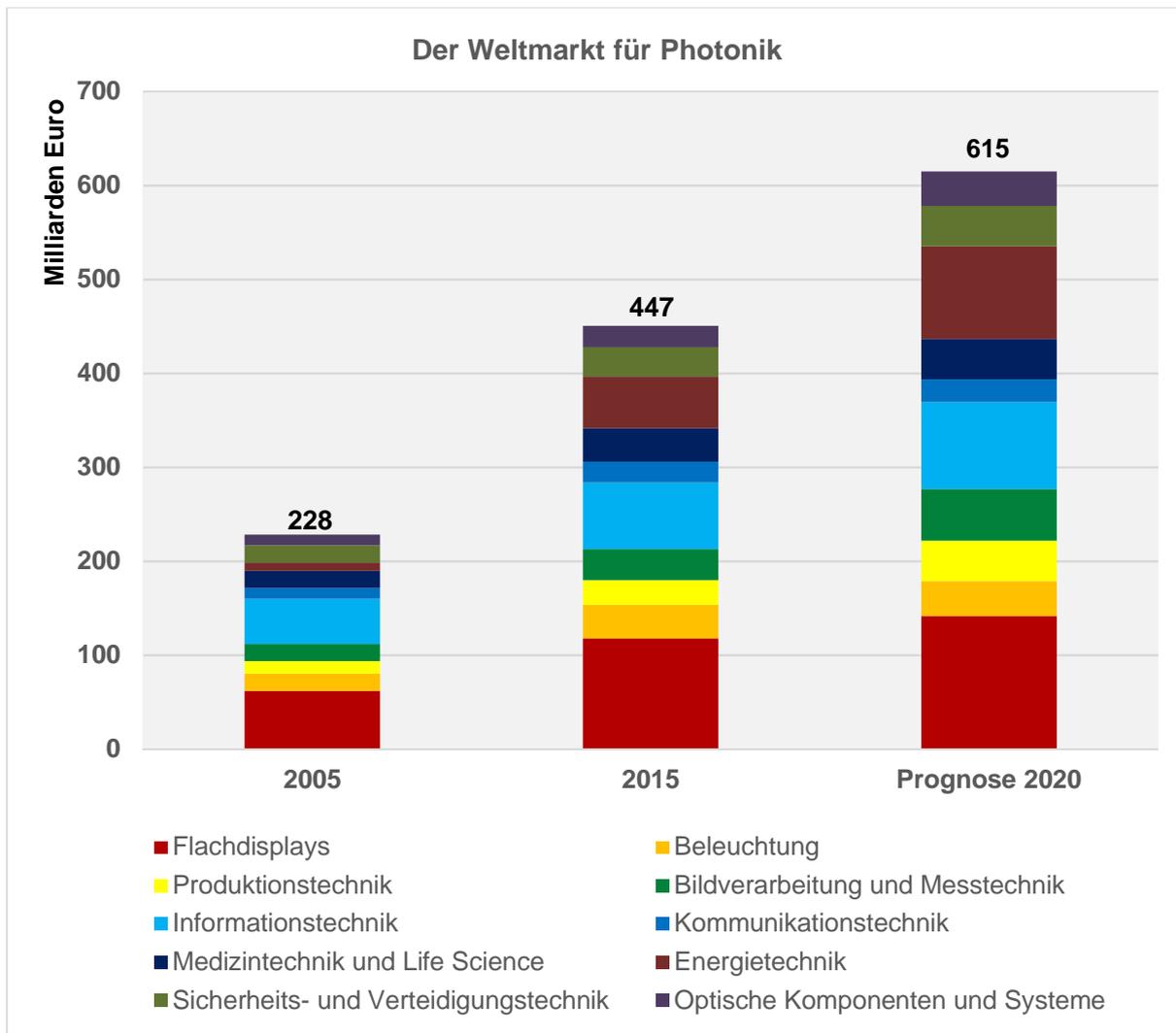


Abb. 1: Weltmarktanteile für photonische Bereiche 2005, 2015 und Potenzialabschätzung 2020

Auf Grund der Bewertung der Photonik als künftige Schlüsseltechnologie fördert die Initiative „PhotonicSensing“ im Rahmen des Horizon 2020 Programmes der Europäischen Union innovative anwendungsbezogene Forschungsvorhaben im Zeitraum 2016-2021. Die von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft koordinierte transnationale Ausschreibung zielt auf den Schwerpunkt optische Sensortechnologien für die klinische, medizinische, sicherheitstechnische und industrielle Praxis und ermöglicht das Suchen nach potentiellen Kooperationspartnern in diesen Ländern.

Von den dort gelisteten 28 Partnerunternehmen in 9 Partnerländern stammen zwei aus Österreich. Aus Oberösterreich ist die im Linzer Science Park angesiedelte **RECENDT** – Research Center for Non Destructive Testing GmbH gelistet, die neuartige zerstörungsfreie Analysen für verschiedenste industrielle Bereiche (Metallverarbeitung, Pharma, Lebensmittel u.a.) anbietet. Gesellschafter dieser seit 2009 eigenständigen GmbH sind die Upper Austrian

Research GmbH, die Johannes Kepler Universität Linz sowie die FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs GmbH.

Die Entwicklung **flexibler organischer Solarzellen** stellt einen weiteren, international bekannten Schwerpunkt an der Johannes Kepler Universität dar. Auch in der **Medizintechnik** ist der Standort mit der FH Oberösterreich und den Clusteraktivitäten in einer guten Position die photonischen Wachstumsmärkte bedienen zu können. Für das Industrieland Oberösterreich sind die zukünftigen Potenziale in der **Lasertechnik** für die industrielle Fertigung hochrelevant und Forschungsaktivitäten sollten in diesen Bereichen weiterhin gefördert und vertieft werden. Das Netzwerk Photonics Austria bietet österreichweit eine Plattform für Lichttechnologien in denen gegenwärtig neben der bereits erwähnten RECENDT GmbH die Fronius International GmbH in Pettenbach, das Oö. Laserzentrum in Gmunden und die TRUMPF Maschinen Austria GmbH & Co KG in Pasching oberösterreichische Partner sind.

Um weitere **aktuelle heimische Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten** zu erfassen, wurde eine Suche oberösterreichischer Patente durchgeführt, die vom 1.1.2015 bis 1.11.2017 angemeldet oder erteilt wurden. Da sich der Bereich Photonik in einer größeren Anzahl von IPC-Notationen³ widerspiegelt, wurden über die von der EU-Kommission in einer Studie zu den Key Enabling Technologies angeführten Notationen hinaus auch noch zusätzlich Begriffe wie „Licht“, „Wellenlänge“, „Opti*“, „Spektr*“ als Suchbegriffe verwendet. Als Ergebnis wurden insgesamt in diesem Zeitraum von fast zwei Jahren in Oberösterreich **neun Patente** beantragt bzw. erteilt. Die darunter befindlichen vier erteilten Patente (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Institution/Firma	Titel	Publikation
Universität Linz	Vorrichtung zur Abgasanalyse einer Verbrennungskraftmaschine mithilfe einer laserinduzierten Plasmaspektroskopie	AT 517982 A1 2017-06-15
LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH	Verfahren zur Herstellung eines Objektes für optische Anwendungen aus einer Aluminiumbasislegierung	AT 518456 A1 2017-10-15
Primetals Technologies Austria GmbH, Linz	Instrumentierung einer Seitenwand einer Stranggießkokille mit Lichtwellenleitern	AT 518569 A1 2017-11-15
Hueck Folien Ges.m.b.H., Baumgartenberg	Sicherheitselement mit Farbkippeffekt (für Banknoten, Wertdokumente und Datenträger.)	AT 517320 A1 2016-12-15

Insgesamt zeigt sich aus der Analyse der Patente das Bild, dass oberösterreichische Firmen und Forschungseinrichtungen die Zukunftspotenziale der Photonik bereits erkennen, besonders im Zusammenhang mit schon bestehenden Kernkompetenzen wie der Metallverarbeitung. Steigerungsfähig erscheint noch die **Zusammenarbeit von Universitäten und Fachhochschulen mit heimischen Unternehmen** sowie Forschungen zu ganz **neuartigen und möglicherweise besonders zukunftssträchtige Zweigen** wie beispielsweise der Holographie oder den Terahertz-Technologien.

³ Die Internationale Patentklassifikation (International Patent Classification, abgekürzt IPC) ist ein weltweit einheitliches Klassifikationssystem für Patente.

3.2. Empfehlungen für Oberösterreich

Unser Nachbarland Deutschland setzt bereits seit einigen Jahren sehr stark auf die Schlüsseltechnologie Photonik, was sich in speziellen Forschungs- und Förderschwerpunkten niederschlägt. In Österreich gibt es hingegen nur eingeschränkte Möglichkeiten in den unterschiedlichen Themenfeldern der Photonik, insbesondere im Bereich Lifescience und Gesundheit, zu nationalen Forschungsförderungen zu gelangen. Dies könnte eine Chance sein, dass das Land Oberösterreich durch **maßgeschneiderte Programme für die hiesige Wissenschafts- und Unternehmenslandschaft** eine nationale Gunstregion für photonische Forschungsaktivitäten werden kann.

Photonikforschung benötigt neben fachlichem Know-how auch teure **High-end-Infrastrukturen**, insbesondere in Form von Reinraumlaboren und hochsensiblen Gerätschaften. Vor allem für kleinere und mittlere Unternehmen bzw. Forschungsinstitute stellt dies eine maßgebliche Hürde dar. Ein vereinfachter Zugang zu öffentlich-finanzierten Forschungsinfrastrukturen würde unterstützend wirken.

Um das Leistungspotenzial im Bereich Photonik zu steigern, sind **qualifizierte Wissenschaftler/innen und Arbeitskräfte** nötig. Das bedeutet, neben der grundlegenden Forcierung der MINT-Fächer (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik) ist die Bewusstseinsbildung für diesen noch relativ neuen Wissenschaftsbereich zentral. Es empfiehlt sich bereits Schulkinder auf die faszinierende Welt der Optoelektronik aufmerksam zu machen. Durch Kinder- und Jugendinitiativen in Oberösterreich könnten etwa mittels eigener Photonik-Experimentierstationen zahlreiche Kinder und Jugendliche erreicht werden.

An der Johannes Kepler Universität gibt es in unterschiedlichen Bereichen exzellente Photonikforschung, etwa am Institut für Organische Solarzellen, am Institut für Mikroelektronik und Mikrosensoren und zahlreichen anderen. Durch einen eigenen Studiengang im Bereich Optoelektronik könnte das **Sichtbarmachen** dieser Schlüsseltechnologie ebenfalls unterstützt werden. Die Fachhochschulen Oberösterreich sind mit ihren unterschiedlichen Ausrichtungen prädestiniert die Vielfalt der photonischen Forschungen interdisziplinär zu lehren und zu verbreiten.

Das Zusammenspiel verschiedener Wissenschaftszweige etwa der Elektronik oder der Medizintechnik mit der Photonik birgt großes Potenzial, weshalb **bereichsübergreifende Kooperationen und Plattformen** zukünftig verstärkt unterstützt werden sollten. Die oberösterreichische Wirtschaftsagentur Business Upper Austria bietet mit ihrem Clusternetzwerk beste Voraussetzungen zur Intensivierung interdisziplinärer Vernetzung zwischen Forschung und innovativen Unternehmen in Oberösterreichs Stärkefeldern (z.B. Mechatronik, IKT, Medizintechnik, Energie- und Umwelttechnologien). Dies würde auch eine thematische Fokussierung mit sich bringen, um bestehende Kompetenzen sinnvoll zu bündeln.

Das **vielfältige Angebot von Photonics Austria** – der österreichischen Plattform für Lichttechnologien sollte durch das Land Oberösterreich verstärkt genutzt werden. Neben der Vermittlung von Kooperationspartnern und Infrastrukturen, wird auch ein spezieller Experimentierkasten für Schulen, der „Photonics Explorer“, mit fachspezifischer Fortbildung der Lehrkräfte angeboten. Besonders im stark fragmentierten österreichischen Photoniksektor ist die bundesländerübergreifende Zusammenarbeit zu fördern, um Standortkonkurrenzen zu vermeiden.

Nicht zuletzt zeigt ein Vergleich mit der Anzahl an Patentanmeldungen in anderen Bundesländern, dass manche Firmen im Bereich Lichttechnik sehr aktiv sind. Wie die NÖN am 19.4.2017 schreibt, haben beispielsweise zwei Lichtsysteme-Hersteller aus Niederösterreich und Vorarlberg im Jahr 2016 jeweils über 50 Patente angemeldet. Es wird daher angeregt, insgesamt die Chancen auf den Schutz geistigen Eigentums durch **Patentierung** verstärkt zu nützen.

Die Schlüsseltechnologie Photonik ist Teil der oberösterreichischen Forschungs- und Unternehmenslandschaft. Durch gezielte Unterstützungen seitens des Landes sollte angestrebt werden, die nationale und internationale Sichtbarkeit auf diesem Technologiesektor zu erhöhen, um am wachsenden Zukunftsmarkt erfolgreich partizipieren zu können und Oberösterreich als Innovationsstandort zu festigen.

Quellen- und Literaturverzeichnis

BM für Bildung und Forschung (D), 2011: Photonik Forschung Deutschland

https://www.bmbf.de/pub/Photonikforschung_in_Deutschland.pdf

BM für Bildung und Forschung (D) u.a., 2013: Photonik Branchenreport 2013

http://www.photonics21.org/download/UT_130503_Photonik_Branchenreport_Lesemodus.pdf

BM für Bildung und Forschung (D) u.a., 2015: Photonics Industry Report 2015

http://www.photonics21.org/download/Brochures/Industry_Report_Update_2015_Charts.pdf

BM für Bildung und Forschung (D), 2017: Forschungsfelder

<http://www.photonikforschung.de/forschungsfelder/>

Bieker H., 2014: Neues passives Kühlsystem funktioniert auch bei Sonnenschein

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/news/2014/neues-passives-kuehlsystem/>

BM für Verkehr, Innovation und Technologie, 2017: Photonic Cooling – Effizientere Gebäudekühlung durch Nutzung von Photonik

<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/photonic-cooling.php>

Deeg, J, 2017a: Der Traum von der täuschend echten Abbildung.

<http://www.spektrum.de/news/der-traum-von-der-taeuschend-echten-abbildung/1453825>

Deeg, J, 2017b: Hologrammtechnik vom Schmetterling inspiriert

<http://www.spektrum.de/news/hologrammtechnik-vom-schmetterling-inspiriert/1483837>

de Swaaf K., 2016: Robotertechnik: Auch Maschinen können heilen.- in Der Standard, Online-Ausgabe

<http://derstandard.at/2000028479767/Robotertechnik-Auch-Maschinen-koennen-heilen>

Diehl R., 1996: Photonik – die Zukunft der Informationstechnik

<http://www.spektrum.de/magazin/photonic-die-zukunft-der-informationstechnik/823133>

Europäische Kommission, 2009: Current situation of key enabling technologies in Europe.- Commission Staff Working Document, SEC 2009/1257

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SEC:2009:1257:FIN:EN:PDF>

Europäische Kommission, 2012: Eine europäische Strategie für Schlüsseltechnologien – Eine Brücke zu Wachstum und Beschäftigung.- Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, 21. S.

<http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2012/DE/1-2012-341-DE-F1-1.Pdf>

Europäische Kommission, 2016: Förderprogramm Photonic Sensing

<https://photonicsensing.eu/>

Fügemann F., 2017: Forscher bringen molekularen Motor unter Kontrolle

<https://www.presstext.com/news/20170918023>

Franz, W., 2017: Die Zukunft der Speichertechnik.

<http://www.computerwelt.at/news/hardware/storage/detail/artikel/122389-die-zukunft-der-speichertechnik/>

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, 2017:

<https://www.iof.fraunhofer.de/>

Future for all, 2017: Nanobots

<http://futureforall.org/nanotechnology/nanobots.html>

Gorgeous Group Limited, 2017: The LED light source used in agriculture

<https://www.saving-star.com/led-light-source-farming/>

Haase J., 2017: Diese neue Technologie macht dein Internet 100 mal schneller

<https://www.welt.de/kmpkt/article163038110/Diese-neue-Technologie-macht-dein-Internet-100-Mal-schneller.html>

Hoffbauer L., 2017: LiFi – Internet durch Licht

<http://lifi-technik.de/>

Holl, P.M. und Reinhard, F., 2017: Holografie mit dem WLAN-Router

<https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/33897/>

Honey C., 2016: Nanobots – Kleine Ärzte, die man schlucken kann

<https://www.golem.de/news/nanobots-kleine-aerzte-die-man-schlucken-kann-1601-118515.html>

Initiative Photonik 2020 (Hrsg.), 2009: Memorandum Photonik 2020

http://www.photonikforschung.de/fileadmin/MEDIENDATENBANK/SERVICE/Publikationen/Memorandum_Photonik_2020.pdf

ITWissen.info, 2012: Photonik

<http://www.itwissen.info/Photonik-photonics.html>

ITWissen.info, 2015: Smart Dust

<http://www.itwissen.info/Smart-Dust-smart-dust.html>

Jaeger L., 2017: Quantencomputer – Die nächste Revolution in der Informationstechnologie des 21. Jahrhunderts?

<https://scilogs.spektrum.de/beobachtungen-der-wissenschaft/quantencomputer-die-naechste-revolution-in-der-informationstechnologie-des-21-jahrhunderts/>

Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, 2012: Potenzialstudie – Photonik / Optische Technologien am Wirtschaftsstandort Wien

<https://www.wien.gv.at/wirtschaft/standort/pdf/photonic.pdf>

Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH u.a., 2016: PhATINEA – Photonik & IKT in Österreich. Analyse des Innovationsökosystems.- im Auftrag von BM für Verkehr, Innovation und Technologie

<https://iktderzukunft.at/resources/pdf/phatinea-endbericht.pdf>

Kahle C., 2015: Smart Dust: Kompletter Computer auf 1 Kubik-Milimeter geschrumpft

<http://winfuture.de/news,86683.html>

Konitzer F., 2017: „Der Rest ist Ingenieursarbeit“.

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/news/2017/der-rest-ist-ingenieursarbeit/>

Lammer D., 2016: Nanobots – Der nächste Schritt in der Evolution des Menschen?

<http://de.dice.com/nachrichten/nanobots-biotechnologie-medizin-naechster-schritt-in-evolution/>

Lossau, N., Die Welt, 2015: Terahertz-Wellen spüren Plastiksprengstoff auf

<https://www.welt.de/wissenschaft/article142197509/Terahertz-Wellen-spueren-Plastiksprengstoff-auf.html>

Max-Planck-Gesellschaft, 2016: Quantenlogik mit Photonen

<https://www.mpg.de/10636194/quantengatter-quantencomputer-photon>

meinbezirk.at, 2013: Neue Lasertechnik für Augen-OPs am Akh Linz
<https://www.meinbezirk.at/linz/lokales/neue-lasertechnik-fuer-augen-ops-am-akh-linz-d546448.html>

Meusers R., 2015: Superschnelles Internet aus der Deckenlampe
<http://www.spiegel.de/netzwelt/web/lifi-superschnelle-dateneruebertragung-per-licht-a-1064718.html>

Mondal S. B. u.a., 2014: Real-time Fluorescence Image-Guided Oncologic Surgery
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4245053/>

Niederösterreichische Nachrichten, 2017: ZKW auch im Jahr 2016 nö. Patentkeiser.
<http://www.noen.at/erlaufstal/wieselburg-zkw-auch-im-jahr-2016-noe-patent-kaiser/45.556.426>

ORF Science, 2010: Nanobots in der Medizin
<http://sciencev1.orf.at/science/news/15381>

Photonics21, 2011: Photonics – Our Vision for a Key Enabling Technology of Europe
http://www.photonics21.de/download/FinalEditionPhotonics21VisionDocument_InternetVersion.pdf

Nationales Patentamt, Online Auskunftssystem:
<http://seeip.patentamt.at/NPatentSuche>

Photonics21, 2017:
<http://www.photonics21.org/>

Photonics21 (Projektkoordination), 2017: Market Research Study Photonics 2017
http://www.photonics21.org/download/Brochures/Market-Research-Report_Photonics21_Internet.pdf

Photonics Austria, 2017:
<http://www.photonics-austria.at/>

Photonics Online, 2014: New terahertz detector-design-could-revolutionize-medical-imaging
<https://www.photoniconline.com/doc/new-terahertz-detector-design-could-revolutionize-medical-imaging-0001>

Photonics Online, 2016: Terahertz radiation a useful source for food safety
<https://www.photoniconline.com/doc/terahertz-radiation-a-useful-source-for-food-safety-0001>

Photonics Online, 2015: New filter could advance terahertz data transmission
<https://www.photoniconline.com/doc/new-filter-could-advance-terahertz-data-transmission-0001>

phys.org/news , 2017-08
<https://phys.org/news/2017-08-tiny-terahertz-laser-imaging-chemical.html>

phys.org/news, 2017-9
<https://phys.org/news/2017-09-ultra-fast-3d-microscope.html>

Pluta W., 2017: Quantencomputer: „Wir sind im Moment auf dem Niveau eines Röhrencomputers“.
<https://www.golem.de/news/quantencomputer-wir-sind-im-moment-auf-dem-niveau-eines-roehrencomputers-1706-128355.html>

Presstext, 29.09.2017: Optische Hightech-Pinzette verbessert Medikamente
<https://www.presstext.com/news/20170929002>

Programmausschuss für das BMBF-Förderprogramm Optische Technologien, 2010: Agenda Photonik 2020
http://www.photonikforschung.de/fileadmin/MEDIENDATENBANK/SERVICE/Publikationen/Agenda_Photonik2020_11-2010_bf_abA7.pdf

Raabe N., 2016: „Vor fliegendem intelligentem Staub müssen wir keine Angst haben“
<https://www.srf.ch/sendungen/einstein/vor-fliegendem-intelligenten-staub-muessen-wir-keine-angst-haben>

Römer G., 2016: Lasst Daten leuchten.- in PM-Magazin 08/2016, S. 70-73

Rüschemeyer G., 2017: Pack die Sonne in den Tank
<http://www.faz.net/aktuell/wissen/leben-gene/wann-gelingt-die-kuenstliche-photosynthese-15127765.html>

Scharf R., 2016: Flexibler Quantencomputer.
<http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/news/2016/flexibler-quantencomputer/>

Sutter J. D., 2010: „Smart dust“ aims to monitor everything.- CNN Labs
<http://edition.cnn.com/2010/TECH/05/03/smart.dust.sensors/index.html>

Swiss Nano-Cube, 2017: Zukunftsvisionen – Nanobots

<http://www.swissnanocube.ch/wissenschaft-forschung/zukunftsvisionen/nanobots/>

Verband Deutscher Mascannerschienen- und Anlagenbau e.V., 2014: Photonik – mit Licht in die Zukunft.- VDMA Nachrichten 03/14, Sonderdruck

<http://photonik.vdma.org/documents/433966/0/Fokus-Technik-Photonik/2f605389-78fb-4a4a-af39-a41329f34864>

Voss-de Haan, P., 2000: Lexikon der Physik. Holographie.

<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/holographie/6859>

Wikipedia, 2017: Holographie.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Holografie>

Wikipedia, 2017: Photonik

<https://de.wikipedia.org/wiki/Photonik>

Wikipedia, 2017: Qubit.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Qubit>

Wissenschaft aktuell, 2016: Flexibler Terahertz-Scanner

https://www.wissenschaft-aktuell.de/artikel/Flexibler_Terahertz_Scanner1771015590260.html

