Hightech-Lösungen der **PHOTONIK** für den Schutz von Umwelt und Ressourcen

# LICHT

als Schlüssel zur
globalen ökologischen
**NACHHALTIGKEIT**

Eine Studie von

Messe München

SPECTARIS
Verband der Hightech-Industrie

in Kooperation mit

Fraunhofer ILT

Fraunhofer LIGHT & SURFACES

Tematys
Exploration of photonics markets

# Die Photonik als Treiber für die globale Nachhaltigkeit

## VORWORT MESSE MÜNCHEN

Als am 16. Mai 1960 der US-Amerikanische Physiker Theodore Maiman den ersten Laser in Betrieb nahm, hätte er sich wohl nicht träumen lassen, welche Entwicklung diese Technologie bis zum Jahr 2019 nehmen wird.

Die Reaktionen waren damals verhalten, eine Lokalzeitung berichtete gar von der Erfindung eines „Science-Fiction-Todesstrahls". Es war nicht ersichtlich, welchen Nutzen der Laser haben soll. Heute ist er aus vielen Industrien, wie etwa der Medizin oder der Fertigung, nicht mehr wegzudenken.

Eine ähnliche Entwicklung erfuhr das Thema Nachhaltigkeit: Der sächsische Hauptmann Hans Carl von Carlowitz kritisierte im 18. Jahrhundert das auf kurzfristigen Gewinn ausgerichtete Denken seiner Zeit und forderte einen sorgsameren Umgang – allem voran mit der Ressource Holz. Daraus entwickelte sich der Begriff „Nachhalt". Noch lange galt das Wort sowie dessen Bedeutung jedoch als sperrig und schlecht kommunizierbar. Inzwischen ist der Begriff zu einem globalen Megatrend herangewachsen.

Wie gewinnbringend Photonik für den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen eingesetzt werden kann – das beleuchtet die vorliegende Studie aus allen Blickwinkeln. Vom reduzierten Materialverbrauch bis hin zur Energieeinsparung – die Beispiele und Zahlen, die im Rahmen der Studie erarbeitet wurden, zeigen deutlich: Die Photonik ist ein Treiber für die globale Nachhaltigkeit und trifft somit einen Nerv der Zeit.

Dr.
**REINHARD PFEIFFER**
Stellvertretender Vorsitzender
der Geschäftsführung
Messe München GmbH

Wie enorm sich die Anwendungen rund um Laser und Photonik seit 1960 weiterentwickelt haben, das zeigt die LASER World of PHOTONICS, die Weltleitmesse für optische Technologien. Alle zwei Jahre trifft sich die Branche bei uns auf dem Messegelände München zur weltweit größten Photonikmesse und dem parallel laufenden World of Photonics Congress. Nachhaltigkeit wird dort etwa im Kontext von Elektromobilität vorgestellt – die nicht ohne Lasertechnologie auskommt: von der Batteriefertigung über den Leichtbau bis hin zur Cockpit-Teilefertigung. Davon können sich Besucher in unserem größten Ausstellungsbereich, Lasersysteme für die Fertigung, überzeugen. Auch Lösungen aus den Bereichen Imaging und Sensorik tragen zu Umweltschutz bei, etwa in Form von kleinen, feldtauglichen Sensoren, die im Gewässer- und Bodenschutz und bei Smart Farming eingesetzt werden können.

Viele unserer Aussteller gehören zu den Unternehmen, die Pionierarbeit bei der Verknüpfung von Photonik und Nachhaltigkeit leisten. Als Messegesellschaft ist es uns ein besonderes Anliegen, diesen eine Plattform für ihre Innovationskraft zu liefern, sei es in der Industrie oder in der Wissenschaft.

Dr. Reinhard Pfeiffer

# Licht und Innovationen im Wettlauf mit dem Klimawandel

## VORWORT SPECTARIS

Der Schutz des Klimas ist eine der wichtigsten Herausforderungen unserer Zeit. Die ersten Vorboten der dramatischen Folgen der durch Menschen verursachten Erderhitzung lassen erahnen, welchen Preis wir alle zahlen, wenn wir zu spät oder zu zaghaft handeln. Der Preis bemisst sich in Wohlstandsverlust, Migrationsbewegungen, Extremwetter oder Artensterben, um nur einige Auswirkungen zu nennen. Dabei sind die Technologien zur Begrenzung des Temperaturanstiegs teilweise schon vorhanden. An dieser Stelle sei schon gesagt: Die Photonik, also die technische Anwendung des Lichts, ist dazu ein wichtiger Schlüssel.

Mit dem Pariser Klimaschutzübereinkommen wurde das Ziel definiert, den Anstieg der Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius, besser 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Das Ziel erfordert Verhaltensänderungen jedes Einzelnen sowie staatliche Maßnahmen. Doch das alleine wird nicht ausreichen. Zusätzlich benötigt werden technische Innovationen, die es ermöglichen, ökologische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte des Klimaschutzes miteinander zu vereinigen und damit eine Akzeptanz von allen Seiten zu erreichen.

## 3 MRD. TONNEN WENIGER $CO_2$:

Das ist das erwartete, alleine aus einigen Beispielfällen resultierende indirekte Klimaschutzpotenzial der Photonik im Jahr 2030, angefangen von der Photovoltaik, über energiesparende Beleuchtung bis hin zur Waldbrandfrüherkennung. Keine der Anwendungen könnte ihre Klimaschutzwirkung ohne die Photonik entfalten.

Der hohe Einspareffekt zeigt, welches enorme Potenzial innovative Technologien zur Erzeugung, Verstärkung, Formung, Übertragung und Nutzbarmachung von Licht haben.


Dr.
**BERNHARD OHNESORGE**
Geschäftsführer
Carl Zeiss Jena GmbH
Vorsitzender
Fachverband Photonik
SPECTARIS e. V.

**JÖRG MAYER**
Geschäftsführer
SPECTARIS e. V.

Als Schlüsseltechnologie bietet die Photonik für unzählige Anwendungsfelder Hightech-Lösungen, die aufgrund ihrer Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten oder Wirkungsweisen maßgeblich zur Nachhaltigkeit beitragen können, etwa durch einen verringerten Stromverbrauch, $CO_2$-Ausstoß oder Düngemitteleinsatz, durch die Einsparung von Material oder aufgrund neuer Recyclingprozesse und Technologien für den Umweltschutz.

Mit der vorliegenden Publikation möchten wir dieses Potenzial, diese Vielfältigkeit und die Innovationsfreude der Photonik als „Enabler" für Nachhaltigkeit verdeutlichen. Sie ist auch als Plädoyer zu verstehen, die hohe Bedeutung der Photonik durch engagierte Forschung, Forschungsförderung und innovationsfreundliche Rahmenbedingungen zu unterstützen.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre und wir wünschen uns, dass die gemeinsamen Anstrengungen zum Schutz des Klimas und der Umwelt zum Erfolg führen.

Dr. Bernhard Ohnesorge
Jörg Mayer

# Inhalt


Seite

Executive Summary → 9

Photonik als „Enabler“ für den Klima- und Umweltschutz → 12

3 Milliarden Tonnen weniger $CO_2$:
Der globale Klimaschutzbeitrag der Photonik → 18

Anwendungsbeispiele deutscher Hightech-Lösungen
zur ökologischen Nachhaltigkeit … → 31

- … im Bereich Umweltschutz und Recycling → 32
- … in der Stadtentwicklung → 46
- … im Bereich Mobilität → 48
- … bei der Energieerzeugung und -speicherung → 62
- … in der industriellen Produktion → 68
- … in der Land- und Forstwirtschaft → 80

Die Autoren, Herausgeber und Studienpartner → 86

Bildnachweis → 93

Impressum → 94

# Licht als Schlüssel zur globalen ökologischen Nachhaltigkeit

*„Die Photonik schafft es, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz konstruktiv miteinander zu verbinden. Dies geschieht einerseits durch Effizienzsteigerung der Fertigungsprozesse und andererseits durch die Herstellung optimierter Komponenten für die Energiewende insbesondere mittels Präzisionsabtrag mit Ultra-Kurzpuls-Lasern oder mittels Additiver Fertigungsverfahren. Die hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Kriterien optimierten Komponenten finden sich u. a. in der Solar-, Batterie- oder Windkrafttechnik wieder."*

Prof. Dr.
**REINHART POPRAWE**
Leiter des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT/RWTH Aachen University – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT

Dr.
**STEFAN TRAEGER**
Vorstandsvorsitzender JENOPTIK AG

*„Licht manifestiert sich in immer mehr Bereichen unseres Lebens und ist immanent mit dem Thema Nachhaltigkeit verbunden. Photonische Technologien ermöglichen nachhaltige und ressourcenschonende Produktionsprozesse, moderne Beleuchtungsmethoden tragen dazu bei, die Umwelt zu schonen. Es lassen sich zig Beispiele finden, bei denen photonische Technologien anderen Verfahren in Sachen Nachhaltigkeit weit überlegen sind. Das ist eine Seite dieser Medaille. Bedeutend sind aber auch die Anwendungen, die wir heute noch gar nicht kennen oder nur erahnen und damit das enorme Potenzial, das Licht in sich trägt. Dieses zu erschließen, dafür ist Nachhaltigkeit ein entscheidender Treiber."*

*„Die Photonik hat es uns ermöglicht, die Gefahren des Klimawandels zu erkennen. Sie gibt uns die Werkzeuge an die Hand, unsere Lebenswelt zu erhalten. Jetzt kommt es darauf an, unsere Möglichkeiten klug zu nutzen.“*

Dr.
**BERNHARD OHNESORGE**
Geschäftsführer
Carl Zeiss Jena GmbH

Prof. Dr.
**ANDREAS TÜNNERMANN**
Leiter des
Fraunhofer-Instituts für
Angewandte Optik und
Feinmechanik IOF

Foto: Anne Günther/FSU

*„Inline-fähige photonische Sensoren in der industriellen Produktion steigern Prozesssicherheit und -effizienz und senken damit nachhaltig den Energie- und Ressourceneinsatz.“*

*„Messen mit Licht macht Emissionen sichtbar und verrät, wo Infrastruktur schwächelt. Belastungen lassen sich so minimieren und Ressourcen schonen.“*

Prof. Dr.
**KARSTEN BUSE**
Leiter des Fraunhofer-Instituts
für Physikalische Mess-
technik IPM

Dr.
**ANDREAS NITZE**
Geschäftsführer
Berliner Glas KGaA
Herbert Kubatz GmbH & Co.

*„Technologien mit Licht sind heute unverzichtbar und leisten einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Zukunft. Sie unterstützen die Klimaforschung, ermöglichen ressourcenschonende Fertigungsverfahren und treiben die Entwicklung in der Medizintechnik maßgeblich voran.“*

Dr.
**WILHELM KAENDERS**
Vorstand
TOPTICA Photonics AG

*„Die neuen Möglichkeiten der Quantentechnologie im Bereich der Sensorik und Präzisionsmetrologie stellen uns einen riesigen Werkzeugkasten für die Erfassung von Umweltveränderungen (Klimawandel, Landhebung, Gezeiten, Strömungen, Vulkane, Erdbeben, etc.) zur Verfügung. Sie erlauben uns in bisher unerreichter Empfindlichkeit aus dem All, aber auch von der Erdoberfläche aus, globale Veränderungen erstmals wahrzunehmen und quantitativ zu messen."*

*„Lasertechnologie kann die nachhaltige Landwirtschaft entscheidend voranbringen. Die Photonik ermöglicht sehr präzise zu arbeiten. Mit robusten Prozessen kann der Einsatz von Lasern die Unkrautbekämpfung revolutionieren."*

Dr.
**DIETMAR KRACHT**
Geschäftsführender
Vorstand des
Laser Zentrum Hannover e. V.

# Executive Summary

## Herausforderung Klimaschutz

Die Photonik – also die technische Anwendung des Lichts – ermöglicht es, den Einsatz von Rohstoffen, Materialien und Prozessen ökologisch deutlich vorteilhafter zu gestalten.

Sonnenlicht wird dank der Photonikforschung sehr effizient in elektrische Energie umgewandelt. Und auch die Umkehrung, die Lichterzeugung aus elektrischem Strom, gelingt dank der großen Entwicklungsfortschritte der Photonik heute sehr viel effizienter als noch vor wenigen Jahren. In der globalen Kommunikation liefert die Photonik mit Glasfasernetzen die Grundlage für eine verlustarme Übertragung riesiger Datenmengen über Länder- und Kontinentgrenzen hinweg. Die Photonik zeichnet auch verantwortlich für die Gewinnung von Daten mittels Bildsystemen und optischen Sensoren. Alle diese optischen Technologien arbeiten äußerst energieeffizient und emmissionsfrei und tragen damit entscheidend zur Erreichung der Ziele des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit bei. Bereits dreimal wurden Lösungen der Photonik mit dem höchstdotierten Umweltpreis Europas, dem deutschen Umweltpreis, ausgezeichnet.

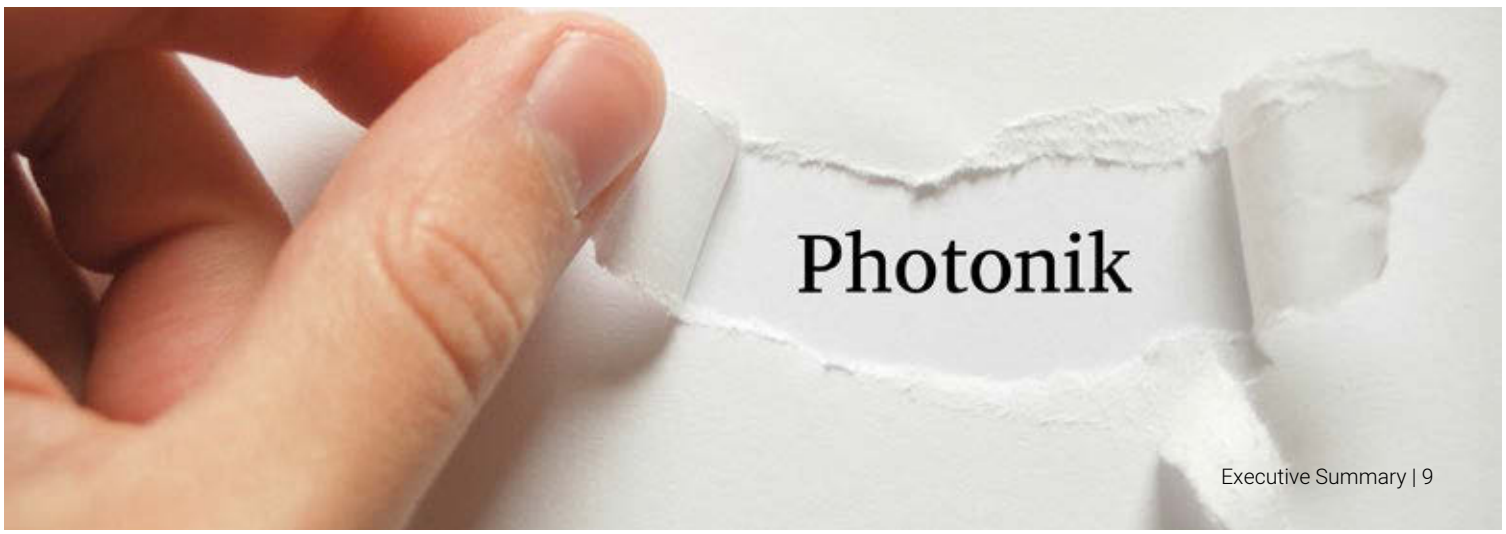
### INNOVATIONEN IN VIELEN BEREICHEN

Das Potenzial der photonischen Technologien ist in vielen Anwendungsfeldern vielversprechend. Im Bereich des Klimaschutzes werden heute satellitenbasierte Laser entwickelt, die global online die Verteilung, Entstehung und Adsorption von Treibhausgasen vermessen. Dabei ergeben sich auch Perspektiven, lokale Ereignisse in der Klimaänderung zeitnah zu erfassen. Landgestützte optische Systeme zur Waldbrandfrüherkennung kommen verstärkt zum Einsatz, pseudosatellitengestützte Systeme stehen in den Startlöchern.

Der Anteil der Sekundärproduktion (Recycling) von Metallen und anderen Werkstoffen, etwa aus Autos oder Mobiltelefonen, kann mithilfe berührungsloser, extrem schneller und präziser photonischer Verfahren deutlich ansteigen. So werden derzeit beispielsweise Verfahren zur Zerlegung und Sortentrennung der Werkstoffe in Handys mit „LIBS“ (Laser-induced breakdown spectroscopy) entwickelt, Systeme zum sortenreinen Metallrecycling sind bereits im Einsatz.

In der Agrarwirtschaft wird die lokal und temporal aufgelöste Analyse von Wachstumszuständen durch Photonen zur exakten lokalen Dosierung von Düngemitteln und Herbiziden eingesetzt. An der Beseitigung unerwünschten Beikrauts durch Laser wird geforscht. Auch in der Energiegewinnung, bei der Steigerung der Effizienz von Solarzellen, in der Energiespeicherung und -wandlung, bei belastbaren und sicheren Batteriezellen sowie bei kompakten elektrischen Antrieben für die Elektromobilität tragen die photonischen Technologien zu einer effizienten Fertigung entscheidend bei. Optische Verfahren zum Verschleiß- und Korrosionsschutz mit umweltfreundlichen Werkstoffen sind bereits im Einsatz. Die Fertigung kompakter Hochleistungselektronik wird durch Werkstoffadaptierte Fügeverfahren hoch reproduzierbar.

Im Bereich der Dünnschichttechnologie eignen sich Laser besser als jedes andere Werkzeug für die wirtschaftliche und umweltfreundliche Erzeugung und Modifikation extrem dünner, funktionaler Schichten – beispielsweise für Photovoltaik oder Elektronik. Bei der Herstellung regenerativ erzeugter Energie wie beispielsweise Windenergie ermöglichen photonische Verfahren höhere Effizienzen und längere Lebensdauern.



Die Optimierung von Verbrennungsprozessen sowohl klassischer fossiler Brennstoffe wie auch die Entwicklung entsprechender Turbinen für regenerierbare Energieträger werden insbesondere durch Laser-Auftragsverfahren höchst-temperaturfester Werkstoffe und Präzisionsbohrungen für optimierte Kühlströmungen ermöglicht. Der $CO_2$-Ausstoß kann so systematisch reduziert werden.

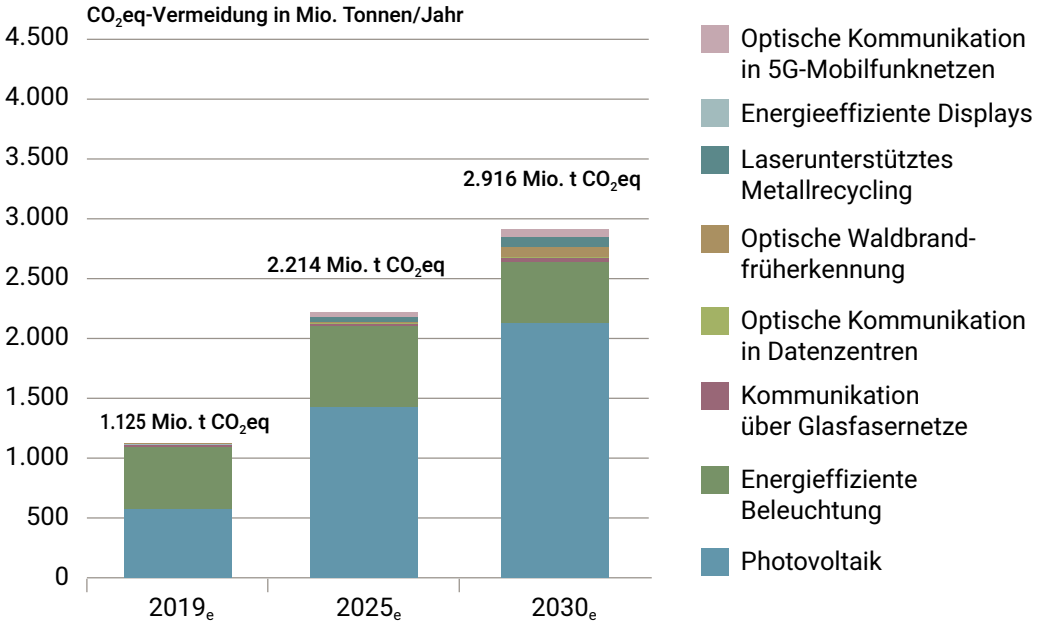
Der „3D-Druck" ermöglicht völlig neue Designfreiheit in der gesamten Produktionstechnik. Leichtbau, Kollisionssicherheit und Crashverhalten, Stabilität, Recycelbarkeit, Integration von Sensorik sind keine Zielkonflikte mehr. Mit einer hochpräzisen Prozesskontrolle lassen sich zudem in Echtzeit verfügbare Messergebnisse nutzen, um die laufende Produktion anzupassen und Ausschussanteile zu minimieren.

**Anwendungsbeispiele von Lösungen der Photonik zur ökologischen Nachhaltigkeit**

| Lösung der Photonik | Anwendungsbereich | Nachhaltigkeitseffekt |
|---|---|---|
| Energieeffiziente Beleuchtung | Beleuchtung | Energieeinsparung |
| Energieerzeugung durch Photovoltaik | Energiespeicherung und -erzeugung | Reduktion von Treibhausgasemissionen |
| Lasertechnik in der Photovoltaik: Nachhaltige Stromerzeugung durch effiziente Solarzellen | Energiespeicherung und -erzeugung | Reduzierung der Produktionskosten für Module und Steigerung der Wirkungsgrade von Solarzellen |
| Laserverfahren für nachhaltige Energiespeicher | Energiespeicherung und -erzeugung | Reduzierung der Produktionskosten für Module und Steigerung der Wirkungsgrade von Solarzellen |
| Optische Kommunikationstechnik in Datenzentren | Information, Kommunikation, Unterhaltung | Energieeinsparung |
| Optische Kommunikationstechnik in 5G-Mobilfunknetzen | Information, Kommunikation, Unterhaltung | Energieeinsparung |
| Energieeffiziente Displays | Information, Kommunikation, Unterhaltung | Energieeinsparung |
| Kommunikation über Glasfasernetze | Information, Kommunikation, Unterhaltung | Energieeinsparung |
| Laser gegen unerwünschtes Beikraut | Land- und Forstwirtschaft | Vermeidung von Herbiziden |
| Optische Früherkennung von Wald- und Flächenbränden | Land- und Forstwirtschaft | Reduktion von Treibhausgasemissionen, Schutz von Mensch und Natur |
| Effiziente Turbomaschinen für die Flugzeugtechnik durch laserbasierte Verfahren | Mobilität | Steigerung der Energieeffizienz, Einsparung von Gewicht, Kraftstoff und Emissionen |
| Lasertechnik im Leichtbau | Mobilität | Reduzierung der für Mobilität notwendigen Energie, insbesondere in der Elektromobilität |
| Extremer Leichtbau für optische und mechanische Komponenten durch Additive Fertigung | Mobilität | Reduktion von Masse im Transportwesen, auch in der Raumfahrt, dadurch verringerter Energie- und Treibstoffverbrauch |
| Laserverfahren für Hochleistungsbatterien im Automobilbau | Mobilität | Effizienzsteigerung der Fertigungsverfahren von Hochleistungsbatterien, dadurch deutliche Kostenreduktion und Erhöhung der Kundenakzeptanz von Elektromobilität |
| Erhalt von Verkehrsinfrastrukturen durch Laserscanning zum Monitoring von Großstrukturen | Mobilität | Ressourcenschonender Umgang mit Rohstoffen und Energie zur Erstellung und zum Unterhalt von Verkehrsinfrastrukturen |
| Laserspektroskopie zur Abgasmesstechnik | Mobilität | Verbesserte Motorenentwicklung durch neue und hochgenaue Messverfahren, dadurch Verringerung von schädlichen Emissionen (z.B. Lachgas) |
| Fertigung mit dem Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen | Produktion | Umweltfreundliche und wirtschaftliche Beschichtung, Reparatur oder Fertigung von Bauteilen |
| Fertigung mit Additive Manufacturing | Produktion | Gewichtsoptimierung für den Leichtbau sowie ressourcensparende Herstellung komplexer oder von Bauteilen in kleinen Losgrößen, Ressourceneffizienz |
| Laser-Funktionalisierung von Oberflächen | Produktion | Energieeffiziente Funktionalisierung und Optimierung von Bauteilen, Vermeidung umweltschädlicher Zusatzstoffe |
| Digitale Holografie in der Produktionskontrolle | Produktion | Vermeidung von Ausschuss, Optimierung der Herstellungsprozesse |
| Metallrecycling der Zukunft: Metalle und Legierungen per Laser vermessen und sortieren | Umweltschutz und Recycling | Wiedergewinnung wertvoller Materialien, Energieeinsparung |
| Laserstrahl-Reinigen | Umweltschutz und Recycling | Vermeidung von Reinigungsmitteln und unnötigen Abfällen, Energieeinsparung |
| Recycling von Mobiltelefonen und Computerelektronik: Urban Mining mit Lasertechnologie | Umweltschutz und Recycling | Wiedergewinnung wertvoller Materialien, Energieeinsparung |
| Maßgeschneiderte Lasertechnik für Klimaforschung im Weltraum | Umweltschutz und Recycling | Umwelt- und Klimaforschung |
| Erdbeobachtungssatellit mit optischen Hochleistungsgittern im All | Umweltschutz und Recycling | Umwelt- und Klimaforschung |

Quelle: Studie „Licht als Schlüssel zur globalen ökologischen Nachhaltigkeit", Messe München, SPECTARIS, Fraunhofer ILT

**Indirektes Klimaschutzpotenzial der Photonik,** dargestellt anhand ausgewählter Beispiele




Quelle: SPECTARIS/TEMATYS

## AUF DEM WACHSTUMSPFAD

Berechnungsbeispiele zu verschiedenen Einsatzgebieten verdeutlichen ausschnittweise das enorme Potenzial der Photonik. Einige Bereiche stehen dabei noch am Anfang ihres Wachstumspfades, so etwa die optische Waldbrandfrüherkennung, das lasergestützte Metallrecycling oder die optische Kommunikation in 5G-Mobilfunknetzen. Andere konnten bereits in der Vergangenheit in einem erheblichen Maße zum Klimaschutz beitragen und haben doch weiterhin ein enormes Potenzial. Man denke etwa an die Substitution der Glühbirne durch Energiesparlampen, was nur ein erster Schritt hin zur jetzigen „LED-Lichtrevolution" war. Oder an die Photovoltaik sowie die Kommunikation über Glasfasernetze. Beide Technologien sind bereits weit verbreitet, dennoch steigt der Anteil der Photovoltaik am Energiemix weiter, ebenso wie der Ausbau der Breitbandnetze voranschreitet. Und auch in Technologiefeldern, in denen die Photonik ihre Nachhaltigkeit bereits unter Beweis gestellt hat und das Marktumfeld durch ausgereifte Produkte und einer Marktsättigung gekennzeichnet ist, stehen neue, noch effizientere Lösungen bereits in den Startlöchern. Ein Beispiel dafür sind LED-Fernseher, die in kürzester Zeit die „energiefressenden" Röhrenfernseher ersetzt haben und für deren Ersatz beispielsweise die perspektivisch energieärmeren OLED- oder Quantum-Dot-Displays vor der großflächigen Markteinführung stehen.

Alleine aus den für diese Studie kalkulierten acht beispielhaften Berechnungen resultiert bereits heute ein indirekter Klimaschutzbeitrag von 1,13 Mrd. Tonnen $CO_2$eq. Es wird erwartet, dass sich das Potenzial bis zum Jahr 2030 mehr als verdoppelt und der Wert vermiedener $CO_2$eq-Emissionen auf rund 3 Milliarden Tonnen pro Jahr steigt. Damit trägt die Photonik maßgeblich zum Erreichen der globalen Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens bei: Die dank der Photonik vermiedenen Treibhausgasemissionen entsprechen mind. 11 Prozent des dort verankerten Zielwertes einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 °C im Vergleich zum Beginn des Industriezeitalters.

Das ist nur ein kleiner Ausschnitt des Lösungsbeitrags der Photonik zur ökologischen Nachhaltigkeit, was die vielen weiteren Anwendungsbeispiele dieser Studie zeigen. Das tatsächliche Potenzial ist noch sehr viel größer.

## DIE ZUKUNFT DER PHOTONIK

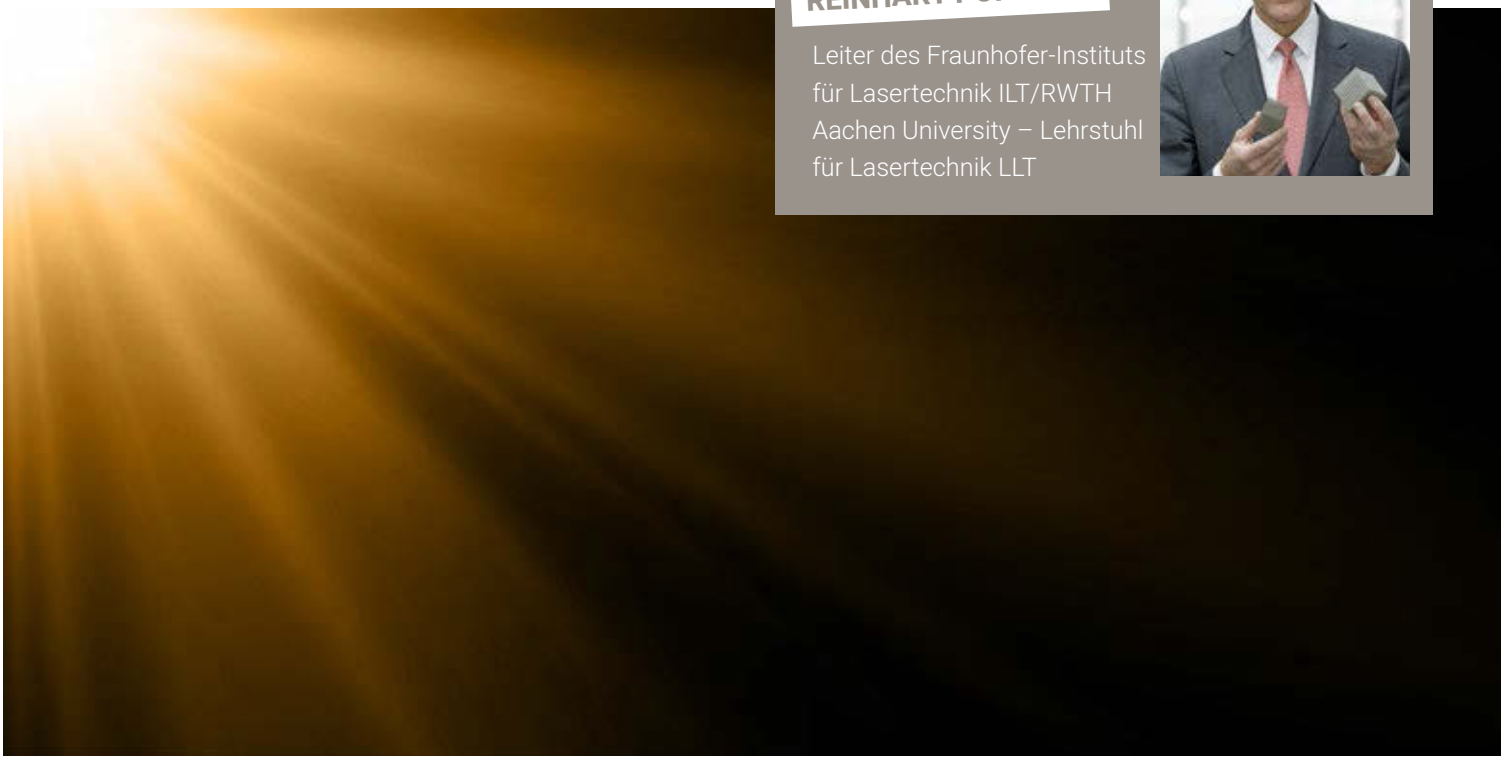
Die Zukunft der Photonik hat gerade erst begonnen. Mit der vorliegenden Publikation sollen das Potenzial, die Vielfältigkeit und die Innovationsfreude der Photonik als Schlüsseltechnologie für Nachhaltigkeit verdeutlicht werden. Zunächst werden in einer Einführung die Entwicklung der Photonik, deren Anwendungsfelder und ihr Lösungsbeitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit beschrieben. Es folgen Berechnungsbeispiele für ausgewählte konkrete Technologiefelder, anhand derer die bereits erfolgte Reduktion und das Potenzial einer künftigen $CO_2$-Vermeidung verdeutlicht werden sollen. In einem weiteren Kapitel werden dann deutsche Hightech-Lösungen aus Industrie und Forschung vorgestellt, die im Detail zeigen, wie breit gefächert die Photonik ist und warum sie ein wichtiges Bindeglied zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz darstellt.

Die Studie ist auch als Plädoyer zu verstehen, die hohe Bedeutung der Photonik durch engagierte Forschung, Forschungsförderung und innovationsfreundliche Rahmenbedingungen zu unterstützen.

# Photonik als „Enabler“ für den Klima- und Umweltschutz

Licht fasziniert die Menschen seit dem Beginn ihrer Geschichte. Wahrscheinlich liegt das daran, dass das Sehen wohl der früheste, der erste und damit als höchst bedeutend wahrgenommene Sinn unserer Existenz ist.

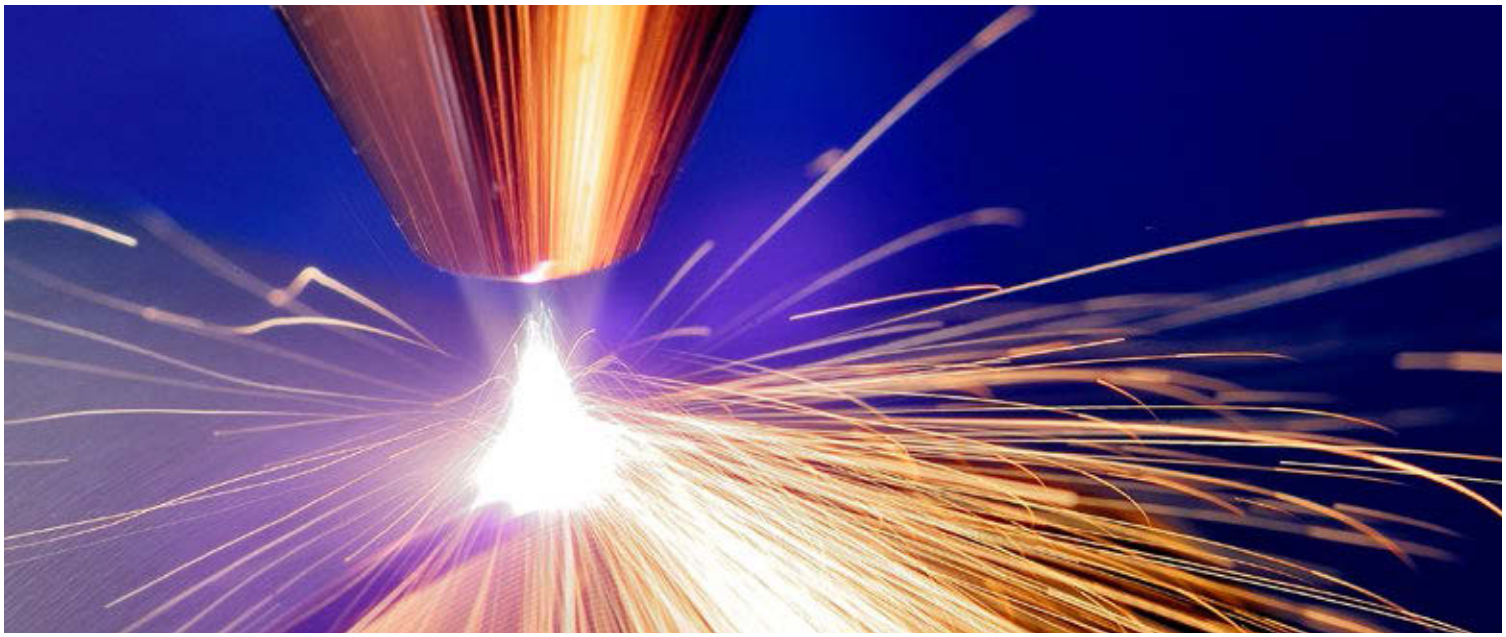
Prof. Dr.
**REINHART POPRAWE**
Leiter des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT/RWTH Aachen University – Lehrstuhl für Lasertechnik LLT



Da sind Farben, Gegenstände, Schönheit, und Wärme, all diese wundervollen und lebensgestaltenden Elemente, die wir über das Licht wahrnehmen. Es ist also kein Wunder, dass das Licht eine so besondere, so hohe Bedeutung in unserem Leben hat.

Neben diesen höchst individuellen Aspekten hat nun die wissenschaftliche Erforschung des Lichtes besonders in den letzten Jahrzehnten Einfluss auf unser praktisches Leben gewonnen. Wenn morgen alle Lichtquellen, alle Laser und Sensoren abgeschaltet würden, wäre es nicht nur dunkel, es würde praktisch kein einziger menschengemachter Prozess unseres normalen Alltages mehr funktionieren.

Aber was sind die wirklichen, die fundamentalen Gründe für die Bedeutung und den anhaltenden Erfolg der photonischen Technologien in unseren gesellschaftlich relevanten Prozessen? Licht und damit Photonen sind die einzige masselose Energie. Diese besondere Eigenschaft erlaubt es ihnen nicht nur, sich mit Lichtgeschwindigkeit auszubreiten. Werden Photonen stimuliert erzeugt, also zu einem Laserstrahl gebündelt, entsteht die höchste Qualität von Energie im gesamten Universum quasi höchster Ordnung. Das Maß der Unordnung reduziert sich auf null; die gesamte Energie ist gebündelt in nur einem Zustand. Diese thermodynamische Ausnahmeerscheinung verbunden mit der Masselosigkeit erlaubt die physikalisch höchst denkbare dynamische Flexibilität und die Wandlung in andere Energieformen niedrigerer Qualität wie elektrische Energie, mechanische Energie oder Wärmeenergie.



Photonen – besonders in Form von Laserstrahlung – sind daher nicht nur faszinierend in der Konsequenz ihrer Erscheinung und der damit verbundenen Bedeutung für unser natürliches Dasein. Vielmehr können wir damit praktisch alle denkbaren physikalischen Prozesse auslösen und antreiben und das mit dem höchst möglich denkbaren Wirkungsgrad.

## DIE VIELFALT DER BEARBEITUNGSVERFAHREN: „ENABELING TECHNOLOGIES“

Aus den physikalischen Eigenschaften der Energieform „Licht“ und „LASER“ folgt, dass alle denkbaren Prozesse, die in unserem Leben eine Rolle spielen, über Photonen mit maximaler Präzision betrieben werden können. Ferner ermöglicht die Masselosigkeit höchste Dynamik in der Positionierung, was bei entsprechender Skalierung der Leistung zu einer neuen Dimension der Fertigungsgeschwindigkeit führt. Eine weitere Konsequenz der Masselosigkeit ist die Verschleißfreiheit des „Werkzeuges Licht“, was in der Automatisierung zu quasi beliebig wählbaren Betriebszeiten führt. Aus diesen Gründen gibt es auch heute schon sehr viele Prozesse, die in den letzten Jahrzehnten zur Anwendungsreife entwickelt und in unsere täglichen gesellschaftlich relevanten Prozesse umgesetzt wurden.

Die Entwicklung geeigneter Strahlquellen ist wesentliche Voraussetzung für den Erfolg der Anwendung von Photonen. Das richtige Licht für die jeweilige Anwendung wird mit dem Credo „Tailored Light“ beschrieben, dabei sind die Eigenschaften der Quelle hinsichtlich räumlicher, zeitlicher und spektraler Qualität auf die jeweilige Anwendung abzustimmen. Die Analogie mit elektrischer Energie liegt nahe, auch hier wird für jede Anwendung die passende Kombination aus Spannung und Strom im jeweiligen Netzgerät bereitgestellt. Beim Licht allerdings ist die Zahl der Freiheitsgrade der Energie noch um einiges größer, was die Vielfalt der Quellen, die noch bessere Adaptierbarkeit der Energie an die jeweils gewünschte Wirkung erklärt und damit das noch größere Spektrum des Anwendungspotenzials.

Bereits in dem Jahrzehnt der Erfindung des Lasers wurde das Schneiden mit Laserstrahlung für Metalle entwickelt und industriell umgesetzt. Dieses Trennverfahren zeichnet sich nicht nur durch höchste Qualität sondern besonders durch Flexibilität und Steuerbarkeit aus, was die Eigenschaft des automatisierbaren individuellen Schnittes mit sich brachte. Beliebig designte Konturen können per Knopfdruck in reale Produkte übertragen werden und das mit Geschwindigkeiten, die mit anderen Verfahren nicht im Entferntesten erreichbar sind.

Bei den Schmelzverfahren sind es die Fügetechnologien Schweißen und Löten, die besonders in der Metall- und Kunststoffverarbeitung schnell Einzug gehalten haben. In der Halbleitertechnik wird durch Annealing kristallines Silizium zum relevant benötigten amorphen Gefüge gewandelt. Auch in der Kondensation von Materie zu Kristallen werden

Laser zur Steuerung des Zeit-Temperaturverlaufes bei der Erstarrung mit neuen Qualitäten der Präzision eingesetzt. Aus diesen Eigenschaften erklären sich auch die Anwendungen in der Verarbeitung von Leichtbauwerkstoffen wie CFK und GFK sowie die Fügeverbindungen dieser Werkstoffe mit Metallen und Keramiken, generell die Verbindung artungleicher Werkstoffe.

Viele Verfahren in der Oberflächentechnik profitieren von der hohen Steuerbarkeit von Licht in Raum und Zeit: so das Härten kohlenstoffhaltiger Stähle und das Verdichten metallischer Oberflächen zu höchster Korrosions- und Verschleißfestigkeit („shot peening"). Auch das Umschmelzen dünner Randschichten und die Glättung der Oberfläche infolge der Grenzflächenspannung wurden entwickelt und führten zum Laserpolieren, was bei Dielektrika wie Glas zu Präzision im atomaren Bereich führt.

Das Aufschmelzen dickerer Schichten zum Verschleißschutz wurde über das Auftragschweißen weiter zur Additiven Fertigung entwickelt. Zusätzlich zu Reparatur und Instandsetzungsanwendungen lag der Fokus des Interesses der Industrie beim Rapid Prototyping. Hierzu wird neben dem Auftragschweißen insbesondere das Laser-Powder-Bed-Fusion-Verfahren eingesetzt. Mit der systematischen Erhöhung der Produktivität konnte das „3D-Drucken" nicht nur zur Erzeugung von Design- und Funktionsmustern bzw. Prototypen eingesetzt werden. Vielmehr liegt ein großer Teil der Wertschöpfung im Rapid Manufacturing – also der additiven Herstellung individualisierter oder komplexer Bauteile in kurzer Zeit und zu erschwinglichen Kosten der Serienfertigung. Vorreiterverfahren in Kunststoffen, die Stereolithografie, bekamen so eine völlig neue Relevanz in der Produktionstechnik. Bauteile aus Materialien bis in den Metall- und Keramikbereich konnten mit Sinter- oder anderen 3D-Druckverfahren gefertigt werden. Aktuelle Entwicklungen arbeiten an der Skalierung der Systemtechnik zur Eignung in der Serienfertigung über 50.000 Stück, wovon eine Revolution der Produktionstechnik erwartet wird. Eine Variante des Auftragschweißens stellt das „EHLA-Verfahren" (Extremes Hochgeschwindigkeits-Laser-Auftragschweißen) dar. Hier werden mit makroskopisch relevanten Flächenraten Beschichtungen ermöglicht, die umweltschädliche, chemische Verfahren wie die Verchromung obsolet machen.

Mit dem Laserabtragen lassen sich Bohrungen mit extrem hohen Schachtverhältnissen in allen denkbaren Materialien präzise herstellen. Darauf aufbauend wurde das abtragende Verfahren „photonic milling" entwickelt, also die Möglichkeit, direkt aus dem Design im Computer erzeugte individuelle Freiformflächen per Knopfdruck in sub-Mikrometer-Präzision herzustellen. Diese wiederum in allen Werkstoffen umsetzbare Technologie ermöglicht die Serienfertigung individueller Produkte mit Losgröße 1. Der Oberbegriff lautet

„Digital Photonic Production“, also die additive, subtraktive oder strukturierende Fertigung individueller Bauteile direkt aus dem Computerdesign ohne jedes Werkzeug, ohne Zwischenschritte in der Produktion. Neben der Anwendung kontinuierlicher Laserstrahlung erweisen sich Laser mit ultrakurzen Pulsen (UKP-Laser) dabei als besonders vorteilhaft für das Abtragen und Schneiden, Bohren, Strukturieren oder Polieren. Sie eröffnen vielfältige Einsatzgebiete – etwa bei der Bearbeitung von temperaturempfindlichen Werkstoffen oder bei Aufgaben in der hochpräzisen Materialbearbeitung.

Nicht unerwähnt bleiben darf die berührungslose Messtechnik, die über die Erweiterung zur Analytik nicht nur in Alltag und geometrischen Anwendungen sondern besonders auch in der Sortentrennung und der medizinischen Diagnostik Einzug gefunden hat. Von der Möglichkeit, einzelne Zellen zu positionieren (Laser-Pinzette, Nobelpreis 2018) bis zum „Bio-printing“, der Vision des Druckens kompletter Organe, bietet die Biotechnologie viel Anwendungspotenzial für den Laser. Auch die Entwicklung kurzwelliger kohärenter Quellen im Bereich „EUV“ (Extreme Ultra-Violett) zur Zelldiagnostik oder gar Röntgenlaser zur Therapie einzelner Zellen im organischen Verband sind in der Entwicklung.

## DIE ANWENDUNGSFELDER IN UNSEREN GESELLSCHAFTSRELEVANTEN MEGATRENDS

Unsere Gesellschaft steht heute vor den Herausforderungen der Megatrends wie Mobilität, Energie, Kommunikation, Klimaschutz, Sicherheit und Gesundheit. Schnelle und wirkungsvolle Lösungen sind hier gefordert.

Die Photonik bietet Lösungsansätze für die Herausforderungen, die sich durch diese Megatrends ergeben. In vielen Fällen profitiert davon die Umwelt – auch bei Lösungen, die nicht ausschließlich für den Klimaschutz entwickelt wurden. Oder umgekehrt: Bei all diesen Megatrends spielt das Thema Nachhaltigkeit immer eine große oder sogar die Hauptrolle, da der Klimaschutz auf alle anderen Megatrends einwirkt, quasi diesen übergeordnet ist. Lösungen, die klimaschädlich sind, finden heutzutage keine Akzeptanz. Die Photonik schafft es also, Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz konstruktiv miteinander zu verbinden. Mit den beschrieben Möglichkeiten der extrem effizienten und effektiven Anwendungsmöglichkeiten und Verfahren der photonischen Technologien erscheinen diese Herausforderungen annehmbar. In einigen Bereichen wurden bereits hervorragende Lösungen erarbeitet und umgesetzt.

So ist offensichtlich, dass mit der Entwicklung der Leuchtdiode als Ersatz thermischer Lichtquellen die weltweite Beleuchtung in ihrer Effizienz in wenigen Jahren um Größenordnungen gesteigert und so der Energieverbrauch und damit die Umweltbelastung entsprechend verringert werden konnten. Diese Errungenschaft ist mit Auslöser und Motivation für diese Studie. Hier soll nun aufgezeigt werden, welches Potenzial der photonischen Technologien – neben diesem offensichtlichen Beispiel und anderen mittlerweile für jedermann klar sichtbaren Einsatzfeldern wie der Photovoltaik (Solarzellen) – weiter ausgeschöpft werden kann oder noch ungehoben auf die Anwendung wartet.

Im Bereich des Klimaschutzes werden heute satellitenbasierte Laser entwickelt, die analog zu einem GPS-System global online die Verteilung, Entstehung und Adsorption von Treibhausgasen vermessen. Dabei ergeben sich auch Perspektiven, lokale Ereignisse in der Klimaänderung zeitnah zu erfassen, wie beispielsweise Waldbrände oder Vulkanausbrüche. Die Regulierung und Gestaltung einer nachhaltig umweltfreundlichen Atmosphäre erscheint greifbar nah. Die Kreislaufwirtschaft leidet heute unter absolut unzureichendem Recycling, was sich in einfachen Bereichen wie bei Kunststoffverpackungen durch logistische Maßnahmen lösen lässt. Anders verhält es sich bei den Gütern die kom-

plex produktionstechnisch hergestellt werden. Besonders der hohe Integrationsgrad von Funktionalitäten in Produkten bedingt Materialvielfalt in höchst kompakter Form. Am Beispiel von Autos oder Mobiltelefonen wird dies schnell deutlich. Ein umfassendes Recycling der Werkstoffe aus diesen Produkten ist trotz ihrer extremen Verbreitung und der wachsenden Märkte bis auf Stahl nicht vorhanden. Die technischen Möglichkeiten sind allerdings besonders durch berührungslose extrem schnelle und präzise photonische Verfahren gegeben. So werden derzeit beispielsweise Verfahren zur Zerlegung und Sortentrennung der Werkstoffe in Handys mit „LIBS" (Laser-induced breakdown spectroscopy) entwickelt.

In der Agrarwirtschaft wird die lokal und temporal aufgelöste Analyse von Wachstumszuständen durch Photonen zur exakten lokalen Dosierung von Düngemitteln und Herbiziden eingesetzt.

In der Medizin und in der Medizintechnik haben die photonischen Technologien längst eine Schlüsselrolle erreicht. Die Vielfalt der Verfahren und Prozesse wird in Zukunft sowohl die „smarte Medizin" als auch die „individualisierte Medizintechnik" systematisch vorantreiben.

Auch in der Energiegewinnung wie bei der Steigerung der Effizienz von Solarzellen sowie in der Energiespeicherung und -wandlung wie bei belastbaren und sicheren Batteriezellen und kompakten elektrischen Antrieben für die Elektromobilität tragen die photonischen Technologien zu einer effizienten Fertigung entscheidend bei. Verschleiß- und Korrossionsschutz mit umweltfreundlichen Werkstoffen sind bereits demonstriert. Die Fertigung kompakter Hochleistungselektronik wird durch Werkstoff-adaptierte Fügeverfahren hoch reproduzierbar. Im Bereich der Dünnschichttechnologie eignen sich Laser besser als jedes andere Werkzeug für die wirtschaftliche und umweltfreundliche Erzeugung und Modifikation extrem dünner, funktionaler Schichten – beispielsweise für Photovoltaik oder Elektronik. Bei der Herstellung regenerativ erzeugter Energie wie beispielsweise Windenergie ermöglichen photonische Verfahren höhere Effizienzen und längere Lebensdauern.

Die Optimierung von Verbrennungsprozessen sowohl klassischer fossiler Brennstoffe wie auch die Entwicklung entsprechender Turbinen für regenerierbare Energieträger – u. a. Wasserstoff und Chemo-fuels – werden insbesondere durch Laser-Auftragsverfahren höchst-temperaturfester Werkstoffe und Präzisionsbohrungen für optimierte Kühlströmungen ermöglicht. Der $CO_2$-Ausstoß kann so systematisch reduziert werden.

Der „3D-Druck" ermöglicht völlig neue Designfreiheit in der gesamten Produktionstechnik. Leichtbau, Kollisionssicherheit und Crashverhalten, Stabilität, Recycelbarkeit, Integration von Sensorik sind keine Zielkonflikte mehr. Mit einer hochpräzisen Prozesskontrolle lassen sich zudem in Echtzeit verfügbare Messergebnisse nutzen, um die laufende Produktion anzupassen und Ausschussanteile zu minimieren. „Industrie 4.0", die systematische Kombination von Produktionsverfahren mit „Big Data" und die Entwicklung entsprechender Algorithmen bis hin zur „Künstlichen Intelligenz" lassen sich gerade mit „DPP" (Digitaler Photonischer Produktion) wegen ihrer systematischen Unabhängigkeit von Individualisierungsgrad und Losgrößen hervorragend verbinden.

Neue Designs und neue Funktionalitäten von Produkten und Komponenten werden durch die photonischen Verfahren zu Lösungen der Herausforderungen der heute relevanten Megatrends beitragen. Produktivität, Qualität und Designfreiheit versprechen den Akteuren aus der Industrie bei voller Ausschöpfung Marktführerschaft in ihren jeweiligen Branchen.

## AUSBLICK

Die Analyse der Bedeutung der Photonik, wie wir sie heute kennen, weiter entwickeln und anwenden, zeigt, dass hier die Zukunft gerade erst begonnen hat. Ein Ende der Wirksamkeit weiterer Forschung ist nicht in Sicht: Im Gegenteil, das Spektrum der Anwendungen – besonders in Verbindung mit dem immer wichtiger werdenden Aspekt der Nachhaltigkeit – wird immer breiter.

Abschließend soll aber im Ausblick auch ein visionärer, heute nicht wirklich begründbarer Aspekt der Photonik nicht fehlen: Die Quantentechnologie. Das Denken unserer westlich orientierten Kulturen ist immer noch wesentlich durch das mechanische Weltbild geprägt. Eine Erweiterung erfolgte durch die Computertechnik und die mit ihr verbundene Informationstechnologie. Die Digitalisierung unserer Gesellschaften schreitet fort und zieht auch in die Fertigungstechnik und Produktion ein. Die photonischen Technologien spielen dabei eine Schlüsselrolle und ermöglichen viele relevante Innovationen.

Wie geht es weiter? Die Volkswirtschaftswissenschaften und die Sozialwissenschaften zeigen uns schon lange, dass es in unserer Existenz keine Determinierbarkeit im klassischen Sinne, keine auf Basisgesetze zurückführbare Kausalität wie in der Mechanik gibt. Die Komplexität und die Nichtlinearität der Wirkung von Ereignissen lassen eine umfassende, Zukunft-beschreibende Modellierung solcher Systeme nicht zu.

Auch in den „exakten" Wissenschaften, in der Physik, die ja die wissenschaftliche Grundlage aller unserer Technologien darstellt, sind solche Phänomene entdeckt und beschrieben worden. Die Quantennatur der atomaren Welt enthält Zustände, die besetzt und gleichzeitig unbesetzt sein können, was dann nur noch mit Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden kann. Dies ist in unserem mechanischen Weltbild nicht vorstellbar. Intuitiv allerdings ist schnell nachvollziehbar, dass unser Leben viel mit Wahrscheinlichkeiten und dadurch hervorgerufenen Veränderungen zu tun hat. Quantencomputer „rechnen" nicht mehr sequenziell, sondern überlagern Quantenzustände und ermitteln so den Lösungszustand. Die Mächtigkeit ist dabei so groß, dass mit weniger als hundert Quantensystemen (z. B. Atomen) die Zahl aller Atome im ganzen Universum beschrieben werden kann.

Auch die Perspektive der Quantenkommunikation ist vielversprechend, können so doch möglicherweise abhörsichere Kommunikationskanäle entwickelt werden. Durch Quantenimaging können mit verschränkten Photonen materielle Bereiche zugänglich gemacht und damit analysiert werden, die so nicht zugänglich sind, was vielleicht eines Tages in der Medizin zu völlig neuen Möglichkeiten führt. Wird die Quantentechnologie fundamental neue Erkenntnisse bringen? Um zum Ausgangspunkt zurückzukehren: Könnte sie maßgebliche Beiträge zur gesellschaftlichen Entwicklung liefern? Im technisch-wissenschaftlichen Bereich sehen wir dieses Potenzial schon heute: so könnte man als Vision die Vorhersagbarkeit der atmosphärischen Veränderungen, Treibhausgasentwicklung und Wetter über bisher unerreichbare Zeitskalen formulieren. Damit wäre eine völlig neue und zuverlässige Basis für Nachhaltigkeit gegeben. Verschiedene Szenarien ergriffener Maßnahmen könnten simuliert werden und so die Vorhersage erwünschter Wirkungen entscheidend einkreisen. Das wäre wirklich nachhaltiges Handeln.

Neben den technischen Perspektiven wären möglicherweise eines Tages auch die Konsequenzen soziologischer, volkswirtschaftlicher und gegebenenfalls sogar politischer Handlungen mit solchen Simulationen sehr viel besser abschätzbar.

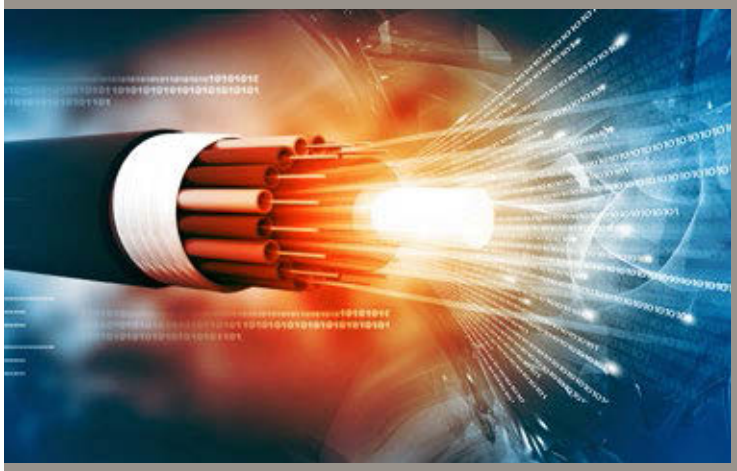
Die Geschichte der photonischen Technologien erscheint noch lange nicht zu Ende.

*„Wenn morgen alle Lichtquellen, alle Laser und Sensoren abgeschaltet würden, wäre es nicht nur dunkel, es würde praktisch kein einziger Menschen-gemachter Prozess unseres normalen Alltags mehr funktionieren."*

Prof. Dr. Reinhart Poprawe

# 3 Milliarden Tonnen weniger $CO_2$:

Der globale Mindestbeitrag der Photonik
zum Klimaschutz anhand ausgewählter Beispiele



## INNOVATIONEN ZUM SCHUTZ DES KLIMAS

Die Photonik bietet für unzählige Anwendungsfelder Hightech-Lösungen, die aufgrund ihrer Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten oder Wirkungsweisen maßgeblich zur Nachhaltigkeit beitragen können. Anhand einiger Beispiele soll im Folgenden ausschnittweise das enorme Potenzial und die Vielfältigkeit dieser Schlüsseltechnologie verdeutlicht werden. Einige Bereiche stehen dabei noch am Anfang ihres Wachstumspfades, so etwa die optische Waldbrandfrüherkennung, das lasergestützte Metallrecycling oder die optische Kommunikation in 5G-Mobilfunknetzen. Andere konnten bereits in der Vergangenheit in einem erheblichen Maße zum Klimaschutz beitragen und haben doch weiterhin ein enormes Potenzial, so etwa die Photovoltaik, LEDs oder die Breitbandkommunikation über das Glasfasernetz.

Und auch in Technologiefeldern, in denen die Photonik ihre Nachhaltigkeit bereits längst unter Beweis gestellt hat und das Marktumfeld durch ausgereifte Produkte und einer Marktsättigung gekennzeichnet ist, stehen neue, noch effizientere Lösungen bereits in den Startlöchern. Ein Beispiel dafür sind LED-Fernseher und deren potenzielle Nachfolger, OLED- oder Quantum-Dot-Displays.

Alleine aus den in diesem Kapitel dargestellten acht Beispielen resultiert bereits heute ein indirekter Klimaschutzbeitrag von 1,3 Mrd. Tonnen $CO_2$eq pro Jahr. Es wird erwartet, dass sich das Potenzial bis zum Jahr 2030 mehr als verdoppelt. Mit einer globalen $CO_2$-Einsparung von insgesamt 2,9 Mrd. Tonnen, davon 1,8 Mrd. Tonnen zusätzlich seit 2018, trägt die Photonik im Jahr 2030 zu 11 Prozent zum 1,5-Grad-Klimaschutzziel und zu 22 Prozent zum 2-Grad-Pfad des Pariser Klimaabkommens bei.

In dieser Studie werden nur solche Technologien betrachtet, die noch nicht oder nur teilweise erschlossen sind (im Sinne einer Verbreitung/Marktdurchdringung). Verglichen wird die Nutzung der Technologie im jeweiligen Jahr mit einem Zustand, in dem es diese Technologie nicht gibt (hypothetisch oder real).

## KLIMASCHUTZPOTENZIAL IM JAHR 2030

**–2,92 Mrd. Tonnen $CO_2$eq im Jahr 2030**

entspricht einem Beitrag von

**11 % zum Zielwert des Pariser Klimaschutzabkommens**

zur Verringerung der Treibhausgas-Emissionen ggü. 2019

Potenzialberechnung anhand ausgewählter Beispiele

Quelle: SPECTARIS/TEMATYS/era energy research

Tematys
Exploration of photonics markets

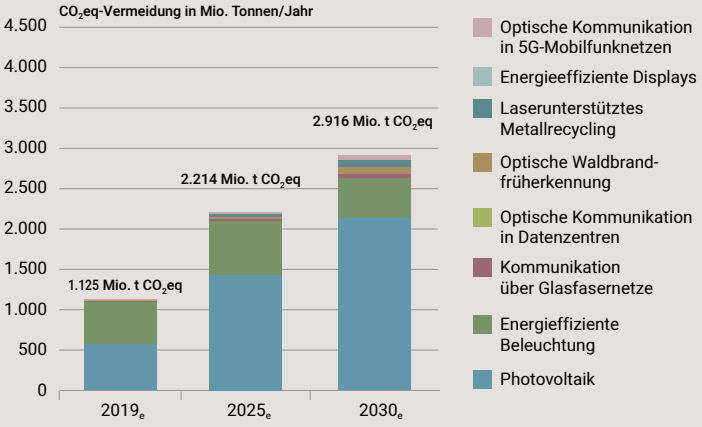
### TEMATYS

Das französische Marktforschungs- und Beratungsunternehmen TEMATYS mit Sitz in Paris hat sich auf Studien und Strategien in den Bereichen Optik, Photonik, Sensorik, Bildgebung, Werkstofftechnik und deren Anwendungsmärkten spezialisiert.
Die hier dargestellten Berechnungsbeispiele wurden von TEMATYS unter Berücksichtigung zahlreicher Studien, anderer Quellen sowie nach Gesprächen mit Branchenexperten kalkuliert.

Ausführliche Hinweise zur Berechnung finden Sie hier: www.spectaris.de/fileadmin/download/greenphotonics

Doch das ist nur ein Ausschnitt des Lösungsbeitrags der Photonik zur ökologischen Nachhaltigkeit, was die vielen weiteren Anwendungsbeispiele dieser Studie zeigen. Das tatsächliche Potenzial ist enorm und noch sehr viel größer, lässt sich nur nicht exakt vorhersagen.

**Indirektes Klimaschutzpotenzial der Photonik,**
dargestellt anhand ausgewählter Beispiele




Quelle: TEMATYS

## BERECHNUNGSBEISPIELE

**$CO_2$-Vermeidung durch:**


Photovoltaik → Seite 20
Energieeffiziente Beleuchtung → Seite 21
Optische Kommunikation in Datenzentren → Seite 22
Glasfaserkommunikationsnetze → Seite 23
Energieeffiziente Displays → Seite 24
Optische Waldbrandfrüherkennung → Seite 25
Laserunterstütztes Metallrecycling → Seite 26
Optische Kommunikation in 5G-Mobilfunknetzen → Seite 27


Quellenangaben der Berechnungen siehe Seite 28 – 30

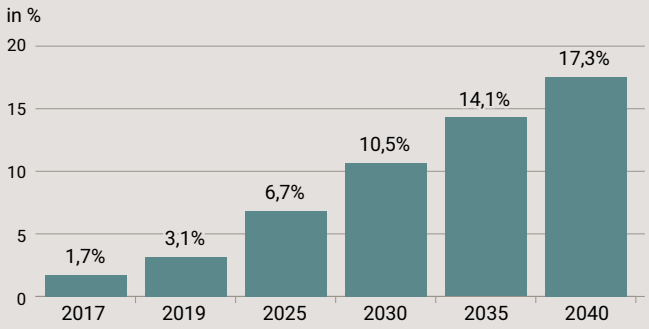
## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH PHOTOVOLTAIK

Die Erkenntnis, dass die Klimaschutzziele ohne den Ausbau des Anteils erneuerbarer Energien nicht erreichbar sind, ist inzwischen in den Köpfen angekommen. Die einfachste Solartechnologie ist die thermische Solartechnologie, bei der Sonnenenergie umgewandelt und Wärme gesammelt wird. Am vielversprechendsten jedoch ist die Photovoltaik, die aus Sonnenlicht Strom erzeugt.

Die starke Verbreitung dieser Technologie im letzten Jahrzehnt hat zu einer schrittweisen Senkung der investiven Kosten und der Betriebskosten geführt. Die Internationale Agentur für erneuerbare Energien geht daher davon aus, dass die Photovoltaik ab 2020 überall wettbewerbsfähig zu fossilen Energieträgern sein wird [1]. Nicht nur aus diesem Grund wird erwartet, dass ihr Anteil am globalen Energiemix auch in Zukunft weiterhin sehr stark zunehmen wird. Weltweit setzen Länder auf den massiven Ausbau der Photovoltaik. Laut Berechnungen der Internationalen Energieagentur (IEA) sollen im Jahr 2040 mehr als 17 Prozent des weltweit produzierten Stroms aus der Photovoltaik stammen [2].

Die Auswirkungen auf den Klimaschutz sind dabei erheblich: Bereits heute entspricht die mithilfe von Photovoltaik erzeugte Energie nach TEMATYS-Berechnungen einer äquivalenten jährlichen Einsparung von rund 569 Millionen Tonnen $CO_2$. Aufgrund der weiterhin steigenden Verbreitung dieser Technologie wird sich dieser Effekt – unter der Annahme einer nachhaltigen Politik (Sustainable Policies-Szenario) – bis 2030 fast vervierfachen, was einer jährlichen Vermeidung von dann 2.130 Millionen, also von 2,13 Milliarden Tonnen $CO_2$eq entspricht.

**Anteil der Photovoltaik an der weltweiten Elektrizitätserzeugung**




Quelle: OECD/IEA, World Energy Outlook 2018 (Sustainable Policies-Szenario)

Der Effizienzgrad der Photovoltaik in Bezug auf die Energieerzeugung und -speicherung steigt dabei kontinuierlich an und begünstigt diese Entwicklung. Ein großer Vorteil der Photovoltaik ist zudem, dass die Produktion nahezu kohlenstofffrei erfolgt. Einige umfassende Studien zum Lebenszyklus von Photovoltaikanlagen zeigen, dass ihr Emissionsfaktor im Bereich von 0,020 bis 0,050 t$CO_2$eq/MWh liegt [3].

**Weltweite Energieproduktion durch Photovoltaik**

| TWh | 2019 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| | 711 | 1.940 | 3.268 |

Quelle: TEMATYS, OECD/IEA [2, 4]

**Weltweite Vermeidung von $CO_2$ durch Photovoltaik**

| in Mio. t $CO_2$eq/Jahr | 2019 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| | 569 | 1.426 | 2.130 |

Quelle: TEMATYS [2, 4]

**Dank Solarzellen kann Sonnenenergie sehr effizient in elektrischen Strom umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad der Solarzellen erreicht im Labor bereits 45 Prozent.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH ENERGIEEFFIZIENTE BELEUCHTUNG (LED)

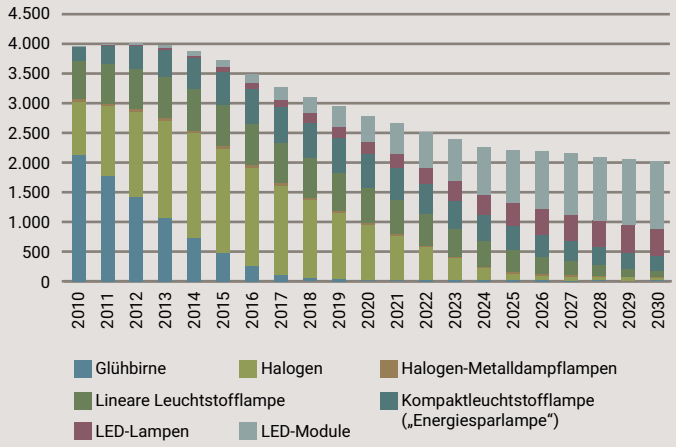
Etwa 15 Prozent [1] des weltweiten Energieverbrauchs entfallen auf Beleuchtung. Entsprechend groß ist der bereits realisierte und erwartete Klimaschutzeffekt durch den Einsatz energieeffizienter Lampen.

In den 1990er Jahren handelte es sich bei den installierten Lichtquellen hauptsächlich um Glühlampen und Leuchtstoffröhren. Im Jahr 2008 hat die Europäische Union (EU) dann das schrittweise Aus für die klassische Glühlampe beschlossen. Ähnliche Gesetze wurden in vielen anderen Ländern verabschiedet. Obwohl die installierte Lichtkapazität weiter zunahm, zeigte der Einsatz von Energiesparlampen bereits Wirkung. Nach einem Höchststand im Jahr 2010 sank beispielsweise der Energieverbrauch für Beleuchtung in der EU bis zum Jahr 2013 um mehr als 5 Prozent.

Jetzt erleben wir die „LED-Revolution" mit einer enorm gesteigerten Effizienz von LEDs im Vergleich zu herkömmlichen Lichtquellen, die zu erheblichen Energieeinsparungen und damit zu einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen führt.

Ausgehend von einem weltweiten Energieverbrauch für Beleuchtung von 4.050 TWh in 2012 wird davon ausgegangen, dass in 2019 bereits eine Einsparung von 25 Prozent (3.000 TWh) und im Jahr 2030 sogar von 50 Prozent (2.000 TWh) realisiert werden kann. Danach wird sich der Energieverbrauch zunächst stabilisieren, da zu diesem Zeitpunkt ein großer Teil der installierten Basis LED-Lampen und -Module sein werden. An Technologien, die noch effizienter als LEDs sind, wird aber bereits geforscht.

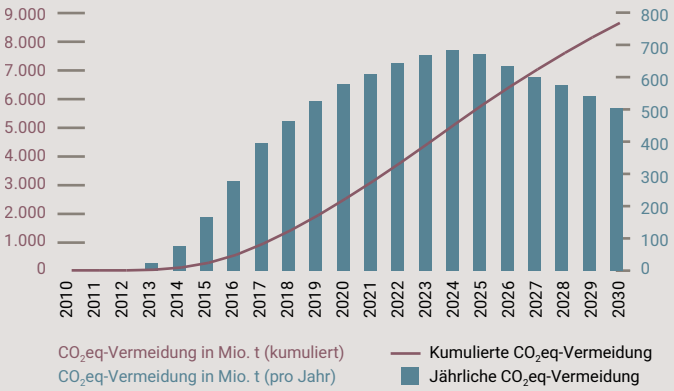
**Weltweiter Energieverbrauch durch Beleuchtung nach Arten [in TWh]**




Quelle: TEMATYS

Obwohl die Lichtmenge sogar etwas zulegt, wird erwartet, dass die zunehmende Verbreitung der LED-Technologie in 2030 zu einer Vermeidung von 503 Millionen Tonnen $CO_2$eq pro Jahr führen wird. Begünstigt wird diese Entwicklung auch dadurch, dass der Effizienzgrad der LEDs weiter steigt und smarte Beleuchtungssysteme die Nutzung optimieren können.

**$CO_2$eq-Vermeidung durch energieeffiziente Beleuchtung**




Quelle: TEMATYS

**Nachhaltigkeitseffekt durch energieeffiziente Beleuchtung (LED)**

| | 2019 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **$CO_2$eq-Vermeidung in Mio. t/Jahr** | 526 | 671 | 503 |

Quelle: TEMATYS

**Die Photonik hat weiße LEDs entwickelt, die bei gleicher Helligkeit weniger als ein Zehntel der Leistung einer Glühlampe benötigen.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH OPTISCHE KOMMUNIKATION IN DATENZENTREN

Im Zeitalter der Kommunikation und Digitalisierung steigt die benötigte Rechenleistung kontinuierlich an. Lag die Größe der von Rechenzentren verarbeiteten Daten in 2010 noch bei 1 Exabyte (1 EB entspricht 1 Mio. Terrabyte), wird bis 2030 ein Anstieg auf 220 Zettabyte (1 ZB entspricht 1 Mrd. Terrabytes) erwartet. [1]

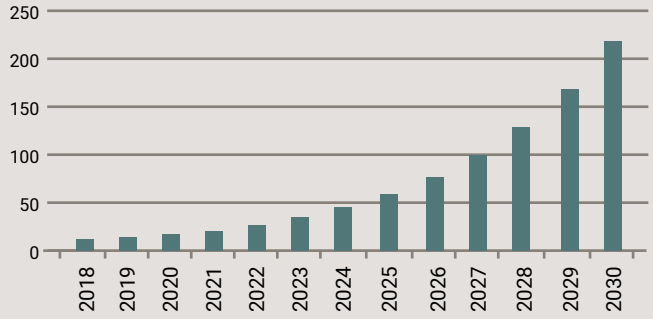
Ausgehend von einem weltweiten Energieverbrauch von 180 TWh für 4 ZB in 2014 läge der Energieverbrauch von Datenzentren im Jahr 2030 damit bei 9.900 TWh.

Der Energieverbrauch von Rechenzentren verteilte sich 2014 dabei etwa wie folgt: Mehr als 40 Prozent entfallen auf die allgemeine Infrastruktur, weniger als 10 Prozent auf Beleuchtung sowie Geräte für die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und rund 50 Prozent auf die sog. IT-Infrastruktur, dazu zählen CPUs, Speicher und das IT-Netzwerk [4]. Doch diese Anteile ändern sich.

Um einer möglichen drastischen Erhöhung der Treibhausgas(THG)-Emissionen entgegenzuwirken, nutzen die Betreiber der Rechenzentren mehrere Wege.

Einerseits wird Strom aus erneuerbaren Energien wie der Photovoltaik bezogen. Daneben wird eine Verbesserung des Power Usage Effectiveness (PUE)-Wertes angestrebt. Dieser setzt die insgesamt in einem Rechenzentrum verbrauchte Energie (u. a. für Kühlung) ins Verhältnis mit der Energieaufnahme der IT-Infrastruktur. Entsprechende Maßnahmen versprechen eine sehr große Hebelwirkung und so wird davon ausgegangen, dass der Energieverbrauch im Jahr 2030 bei unter 700 TWh statt bei den oben hochgerechneten 9.900 TWh liegen wird.

**Weltweiter IP-Verkehr in Datenzentren**

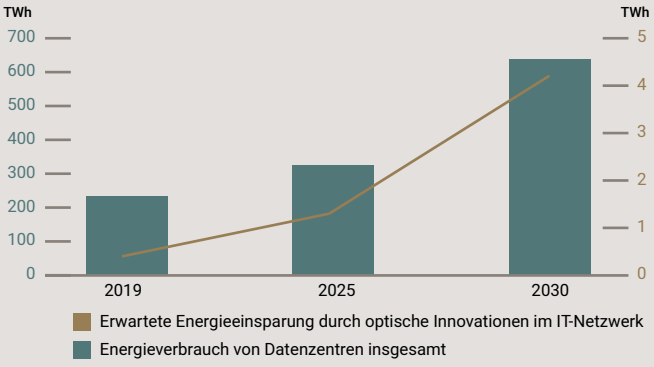



Zettabyte/Jahr (1 ZB = 1 Mrd. Terrabyte)

Quelle: CISCO Global Cloud Index, 11/2018 [1]

Darüber hinaus wird eine Verringerung der Wattstunden (Wh) je Byte im IT-Netzwerk, also in den Mobil- und Kabelnetzwerken der Rechenzentren, angestrebt. Die optische Datenübertragung spielt dabei eine wichtige Rolle [5]. Deutliche Effekte haben sich bereits durch die Substitution von Kupfer- durch optische Verbindungen ergeben. Diese Entwicklung ist praktisch abgeschlossen. Anstrengungen zur weiteren Verbesserung des Wh-Byte-Verhältnisses, etwa durch den Einsatz von Silizium-Photonik (Silicon Photonics) und anderer optischer Innovationen insbesondere in elektronischen Schaltkreisen, können dort zu einer jährlichen Energieeinsparung von über 4 KWh in 2030 führen [6, 7].

**Weltweiter Energieverbrauch von Datenzentren**




Quelle: TEMATYS

**Nachhaltigkeitseffekt innovativer Photoniknetzwerkkomponenten in Rechenzentren**

| | 2019 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **TWh-Einsparung/Jahr** | 0,4 | 1,37 | 4,21 |
| **$CO_2$eq-Vermeidung in Mio. t/Jahr** | 0,2 | 0,55 | 1,1 |

Quelle: TEMATYS

**Integrierte photonische Schaltkreise an Datenzentren vermeiden die verlustreiche Umwandlung optischer in elektrische Signale und zurück.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH GLASFASER-KOMMUNIKATIONSNETZE

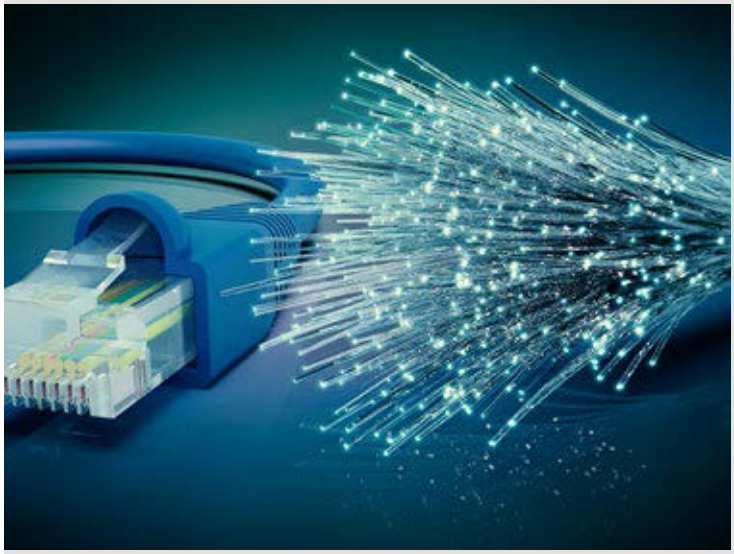
Ob Streaming, Cloud-Computing oder FaceTime: Der Datenverkehr nimmt weiter zu, nicht zuletzt durch Videoinhalte. Das führt zu höheren benötigten Bandbreiten und entsprechenden Latenzanforderungen und treibt damit den Ausbau bzw. die Verbreitung von Glasfasernetzen bis in die Wohnungen der Kommunikationsteilnehmer (FTTH – Fibre to the home) [1].

Die Regierungen haben die Notwendigkeit einer leistungsfähigen digitalen Infrastruktur erkannt und fördern auch aus wirtschaftlichen Überlegungen Glasfaser- und 5G-Netze (vgl. dazu etwa das für 2025 festgelegte Ziele der Gigabits-Gesellschaft der Europäischen Union [2]).

Etliche Internetdienstanbieter verlagern ihr Kerngeschäft zunehmend in Richtung FTTH. In entlegenen Gebieten, die für diese privaten Akteure nicht attraktiv genug sind, unterstützen Kommunen den Glasfasernetzausbau.

Insgesamt ist daher mit einer stark fortschreitenden Umstellung der kupferbasierten Infrastruktur auf FTTH-Netze zu rechnen.

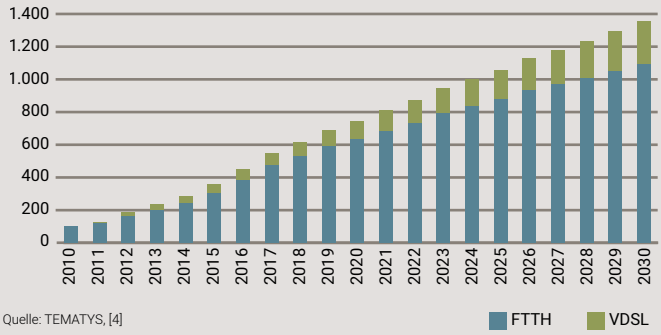
Das Beratungsunternehmen PwC geht davon aus, dass in den ersten 15 Jahren der Implementierung von Glasfasernetzen vor allem durch eine Material- und Stromreduktion Treibhausgas (THG)-Emissionen in Höhe von ca. 330 kg $CO_2$-Äquivalent pro Jahr und Benutzer eingespart werden können. Für die folgenden 15 Jahre steigt die Einsparung auf 780 kg $CO_2$-Äquivalent pro Jahr und Benutzer, da das Netzwerk bereits installiert ist und nur noch ein Teil der Infrastruktur erneuert werden muss [3].



Für die Situation im Jahr 2008 wurde errechnet, dass bei einer angenommenen Verlagerung aller Teilnehmer von DSL-/Kabelnetzwerken zu Glasfasernetzen die entsprechenden THG-Emissionen um 88 Prozent hätten gesenkt werden können. Abgesehen von wenigen Ländern ist das Potenzial für Fortschritte bei FTTH bzw. Fibre to the bulding (FTTB) weltweit auch heute noch riesig, da nur ein niedriger Prozentanteil von Haushalten an Glasfasernetze angeschlossen ist [1]. Davon ausgehend wird erwartet, dass die Zahl der Breitbandnutzer von 390 Millionen im Jahr 2016 auf 1,06 Milliarden im Jahr 2030 ansteigen, d. h. sich verdreifachen wird.

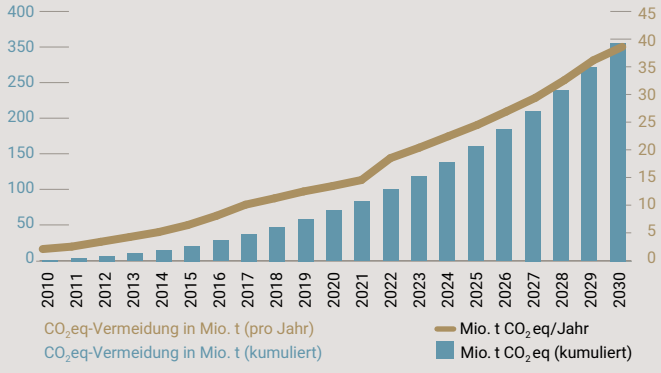
Unter Berücksichtigung der weltweiten Abonnentenzahl werden durch Glasfasernetze im Vergleich zu anderen Technologien für Heimanschlüsse aktuell etwa 13 Mio. Tonnen $CO_2$eq vermieden. Dieser Wert steigt auf 39 Mio. Tonnen im Jahr 2030.

**Globale Anzahl von Breitbandabonnenten** [in Mio.]




Quelle: TEMATYS, [4]

**$CO_2$-Vermeidung durch Glasfaserkommunikationsnetze**




Quelle: TEMATYS

**Signale in optischen Glasfasern können 100 km ohne Zwischenverstärkung übertragen werden, elektrische Signale dagegen nur 2 km.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH ENERGIEEFFIZIENTE DISPLAYS

Vor mehr als 20 Jahren begann der Siegeszug der Flachbildfernseher, die aufgrund einer kompakteren Bauweise, einer besseren Farbwiedergabe und einer höheren Effizienz die konventionellen „Röhrenfernsehgeräte" (CRT) ersetzten.

Das führte zu einer globalen und rasanten Transformation des Marktes: In 2000 wurden noch ausschließlich CRT-Fernseher verkauft, im Jahr 2016 bereits ausschließlich Flachbildschirme. LCDs weisen im Vergleich zu CRT-Geräten einen deutlich besseren $CO_2$-Fußabdruck auf, sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase [1, 2]. Der steigende Anteil von LCDs konnte dadurch die aus der Verdopplung der TV-Geräte (+100 %) im letzten Jahrzehnt resultierende $CO_2$eq-Belastung zu großen Teilen kompensieren (+37 %) [3].

Für die Jahre 2016 bis 2030 rechnen Marktforscher nur mit einem leichten Anstieg der jährlich verkauften Geräte von 255 auf 301 Millionen Stück (Ø +1,3 % p.a.). Nach einem kurzen Aufschwung für sehr große LCDs bis 2023 wird danach vor allem für große OLED-Displays (55"+) ein Wachstum prognostiziert [4].

Insgesamt wird aber von einer weitgehenden Marktsättigung der weltweit installierten Basis von rund zwei Milliarden TV-Geräten ausgegangen. Der Hauptanteil wird weiterhin auf LED-LCD-Geräten (klein und groß) entfallen, auch wenn nach 2020 verschiedene neue Technologien (QD-LED-LCD, OLED) auf den Markt kommen [5].

**Nachhaltigkeitseffekt durch neue energieeffiziente Displays (OLED, QD-LED)**

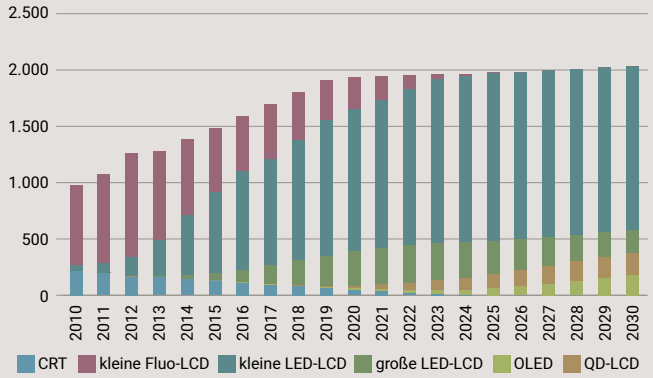
| | 2019 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **$CO_2$eq-Vermeidung in Mio. t/Jahr** | – | 1,7 | 6,3 |

Quelle: TEMATYS

Aktuell sind OLED- (180-190 kWh/Jahr) und QD-LED-Bildschirme (130-150 kWh/Jahr) noch nicht so effizient wie die inzwischen ausgereiften LCDs (100-110 kWh/Jahr). Während LCDs mit LED- oder fluoreszierender Hintergrundbeleuchtung aber 2010 bereits technologisch ausgereift waren und keine großen Effizienzreserven mehr aufweisen, wird für die neuen Technologien bis 2030 eine deutliche Verbesserung des $CO_2$-Fußabdrucks erwartet.

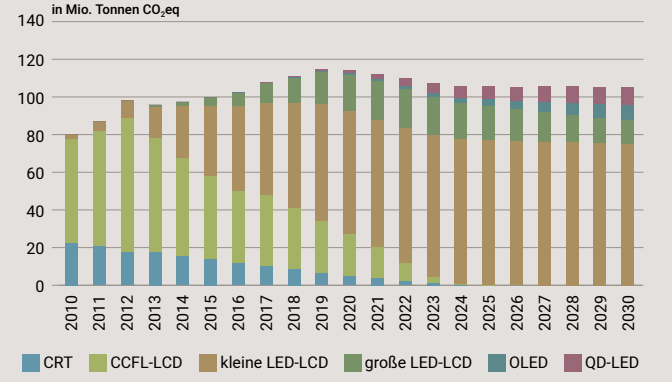
Sowohl die OLED-Technologie als auch die QD-LED-Technologie haben das Potenzial, den Energieverbrauch auf bis zu 80 kWh/Jahr bzw. bis zu 70-80 kWh zu senken und damit unter den Verbrauchswert der LCDs zu fallen [6]. So kann etwa die verwendete Phasenenergie verringert werden. Auch geht keine Energie in Filtern verloren, die gesamte Eingangsenergie steht für die Hintergrundbeleuchtung zur Verfügung. Da weniger Komponenten und Prozessschritte bei der OLED-Herstellung und weniger Materialien für QD-LEDs benötigt werden, ist ferner davon auszugehen, dass auch die Produktion der Geräte klimafreundlicher als die von LCDs sein wird, wenn diese Technologien erst einmal ausgereift sind.

**Installierte Basis von TV-Geräten nach Technologie** [in Mrd. Stück]




Quelle: TEMATYS

**$CO_2$-Fußabdruck von TV-Geräten nach Technologie** [installierte Basis]




Quelle: TEMATYS

CRT: Kathodenstrahlröhre | OLED: organ. Leuchtdiode | QD: Quantenpunkt | LED: Leuchtdiode
CCFL: Hintergrundbeleuchtung Katlkathoden-Leuchtstofflampe | LCD: Flüssigkristallbildschirm

**Die Photonik revolutioniert die Bildschirmtechnologien, moderne aktive OLED-Displays ersetzen zunehmen LEDs.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH OPTISCHE WALDBRANDFRÜHERKENNUNG

Wälder spielen eine Hauptrolle bei der Erhaltung des ökologischen Gleichgewichts der Erde, nicht zuletzt wegen ihrer Eigenschaft als Kohlenstoffsenke. Auch wenn Waldbrände durch Naturereignisse wie Blitzeinschlag oder Vulkanausbruch entstehen können, werden 90 Prozent unabsichtlich oder absichtlich von Menschen verursacht, etwa zur Erweiterung der Nutzflächen. Insgesamt produzieren alle diese Brände mehr als 23 Prozent des in der Atmosphäre freigesetzten $CO_2$ [1]. Mit kurz- und langfristig katastrophalen Folgen für Mensch und Umwelt, wie die verheerenden Brände in Kalifornien, Kanada, Australien, Spanien oder Portugal in den letzten Jahren zeigen [2].

Entsprechend wichtig sind Systeme und Verfahren zur Erkennung von Waldbränden, die heute nahezu ausschließlich auf photonischen Technologien basieren. Dazu zählen Ferngläser zur Überwachung durch den Menschen ebenso wie automatische optische Systeme zur Erkennung von Waldbränden oder Rauch, die häufig zusammen mit anderen Sensoren eingesetzt werden. Einige Erkennungssysteme schaffen es so nicht nur, Brände so früh wie möglich zu erkennen, sondern helfen auch dabei, das Risiko von Waldbränden in Abhängigkeit von Wetter, Lufttemperatur, Bodenfeuchtigkeit oder anderen Faktoren zu bewerten [3].

Satellitengestützte Sicht- und IR-Kameras 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 (z. B. MODIS oder AVHRR) aber eher bedingt, da ein Satellit nur alle 1-2 Tage über eine Region fliegt. Automatische Systeme auf Wachtürmen sind in dieser Hinsicht effizienter. Da sie rund um die Uhr im Einsatz sein können, ergänzen sie optimal die menschliche Beobachtung.

### OPTISCHE SYSTEME ZUR WALBRANDERKENNUNG

- Sichtkameras erkennen Rauch
- Wärmebildkameras erkennen die Hitze des Feuers
- Infrarot (IR)-Spektrometer werden zur Identifizierung der spektralen Eigenschaften von Rauch verwendet
- LIDAR-Systeme (Detection of Light and Range) messen reflektierte Laserstrahlen von Rauchpartikeln

In naher Zukunft könnten zusätzlich Pseudosatelliten mit einer Flughöhe von 20 bis 50 km und einem Sichtfeld von 500 km dazu beitragen, große Gebiete zu erschwinglichen Investitionskosten zu überwachen [4].

Waldbrände stoßen die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid ($CO_2$), Methan ($CH_4$) und Distickstoffmonoxid ($N_2O$) aus. Die durchschnittlichen jährlichen Gesamttreibhausgasemissionen gemäß der Global Fire Emissions Database (GFED4s) betrugen im Zeitraum 1997–2016 7,3 Mrd. Tonnen $CO_2$, 16 Mio. Tonnen $CH_4$ und 900 Tsd. Tonnen $N_2O$ [1]. Zusammengerechnet entspricht das einem $CO_2$-Äquivalent von durchschnittlich 8,1 Mrd. Tonnen pro Jahr [5, 6].

Die Systeme zur automatischen Waldbranderkennung (AWDS) sind technologisch ausgereift, aber ihre Verbreitung steht noch eher am Anfang. Zur vorsichtigen Abschätzung des AWDS-Potenzials sind daher verschiedene Annahmen erforderlich [7]. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in Zukunft immer mehr Oberflächen überwacht werden, zunächst auf der Erde, dann zusätzlich mithilfe von Pseudosatelliten. Auch Vorhersagemodelle werden zunehmend Wirkung zeigen. Für 2019 wird daher zunächst von einem noch geringen Vermeidungspotenzial von 0,1 Prozent des jährlichen, durch Waldbrände versursachten $CO_2$-Äquivalenzwertes ausgegangen, welches dann bis 2030 auf 1 Prozent ansteigen wird, Tendenz weiter zunehmend.

| | | **$CO_2$eq/Jahr** |
|---|---|---|
| **Durch Waldbrände verursachte, durchschnittliche jährliche $CO_2$eq-Emission** [1] | | 8,1 Mrd. t |
| **Durch optische Systeme zur Waldbrandfrüherkennung potenziell vermiedene $CO_2$eq-Emission** | | |
| **2019** | 0,1 % | 8,1 Mio. t |
| **2025** | 0,2 % | 16,2 Mio. t |
| **2030** | 1 % | 81 Mio. t |

Quelle: TEMATYS

**Nur dank der Photonik können berührungslos, schnell und sensitiv (Rauch-)Signale in großer Entfernung detektiert werden.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH LASERUNTERSTÜTZTES METALLRECYCLING

Aufgrund des globalen Wirtschaftswachstums steigt die Nachfrage nach Metallen seit Jahrzehnten kontinuierlich an. Der Energieverbrauch zur Gewinnung der Metalle ist dabei erheblich und mit entsprechenden Umweltauswirkungen verbunden.

| Material | Primärproduktion (kt $CO_2$eq/100kt) | Sekundärproduktion (kt $CO_2$eq/100kt) | $CO_2$-Vermeidung (kt $CO_2$eq/100kt) | $CO_2$-Vermeidung in % ($CO_2$eq) |
|---|---|---|---|---|
| **Aluminium** | 383 | 29 | 354 | 92 % |
| **Kupfer** | 125 | 44 | 81 | 65 % |
| **Stahl** | 167 | 70 | 97 | 58 % |

Quelle: Bureau of International Recycling [3]

Erfreulicherweise sind die wichtigsten Metalle leicht zu recyceln (sekundäre Produktion). Heutzutage stammen mehr als 35 Prozent des hergestellten Stahls und mehr als 20 Prozent des Aluminiums aus einer sekundären Produktion [1, 2]. Die Wiederaufbereitung benötigt dabei deutlich weniger Energie als die Gewinnung aus Erz (primäre Produktion). Umgerechnet in $CO_2$-Äquivalenzwerte können durch recycelten Stahl 58 Prozent, durch recyceltes Kupfer 65 Prozent und durch recyceltes Aluminium sogar 92 Prozent des $CO_2$eq-Ausstoßes vermieden werden, der bei einer primären Produktion anfallen würde [3].

Vergleicht man die Anteile der globalen Primär- und Sekundärproduktion von Aluminium (79 % zu 21 %), zeigt sich, dass diese sich seit den 1970er Jahren aus verschiedenen Gründen kaum verändert haben [1].

Ein Grund für den vergleichsweise niedrigen Anteil recycelter Metalle ist, dass Schrott in standardisierte Metallsorten umgewandelt werden muss. Neben dem Hauptmetall (Eisen, Aluminium …) sind Zusatz-/Inhaltsstoffe (Kohlenstoff, Chrom …) enthalten, die beigefügt wurden, um die Metallqualität zu verbessern.

Wenn der Schrott zu einer Sorte zusammengeschmolzen wird, werden auch alle Zusatzstoffe verschmolzen und es wird schwierig, daraus reine Metallsorten herzustellen. An dieser Stelle bietet die Photonik eine Lösung: Die laserinduzierte Durchbruchspektroskopie (LIBS) ist eine schnelle chemische Analysemethode, bei der mit einem kurzen Laserpuls ein Mikroplasma auf der Probenoberfläche erzeugt wird. Diese Analysetechnik eignet sich sehr gut für die Schrott- und Abfallsortierung, da sie berührungslos ist und in einem Bereich von wenigen Zentimetern bis wenigen Metern arbeitet. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die Oberfläche der Probe verdampft werden kann, um Farbe oder eine oxidierte Schicht zu entfernen. Das zu identifizierende Kernmaterial kann so gut zu erreicht werden. Der Recyclingprozess und damit die Sekundärproduktion von standardisierten Qualitätsmetallen können so erheblich verbessert werden [5].

Szenarien zur Kreislaufwirtschaft gehen in Bezug auf die Primär- und Sekundärversorgung mit Eisen und Aluminium für den Zeitraum 2010 bis 2100 davon aus, dass – auch durch den Druck für eine nachhaltigere Entwicklung – der Anteil der Sekundärproduktion in Zukunft deutlich steigen wird [4].

Die LIBS-Technologie für die Metallschrottsortierung befindet sich noch am Anfang der Entwicklungskurve, hat aber ein enormes Potenzial. Der Prozentsatz der vermiedenen $CO_2$eq-Emissionen, der im Zusammenhang mit der Sekundärproduktion auf LIBS zurückgeführt werden kann, wird voraussichtlich von heute rund 1 % auf 10 % im Jahr 2030 ansteigen. Alleine aus dem Recycling von Eisen und Aluminium kann daraus eine Emissionsvermeidung von jährlich rund 90 Mio. Tonnen $CO_2$eq resultieren.

**$CO_2$eq-Vermeidung durch Photonik aufgrund einer fortschreitender Implementierung der LIBS-Technologien zur Analyse und Sortierung von Aluminium und Eisen**

| | 2019 | | 2025 | | 2030 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Eisen | Aluminium | Eisen | Aluminium | Eisen | Aluminium |
| **Primärproduktion** [Mio. t] | 1.492 | 57 | 1.824 | 68 | 2.090 | 78 |
| **Sekundärproduktion** [Mio. t] | 512 | 29 | 676 | 35 | 779 | 41 |
| **$CO_2$eq-Emission durch Primärproduktion** [Mio. t $CO_2$eq] | 2.491 | 217 | 3.046 | 261 | 3.491 | 300 |
| **$CO_2$eq-Emission durch Sekundärproduktion** [Mio. t $CO_2$eq] | 359 | 8 | 473 | 10 | 545 | 12 |
| **$CO_2$eq-Vermeidung** [Mio. t $CO_2$eq] | 497 | 103 | 656 | 122 | 755 | 144 |
| **Anteil der Photonik zur Ermöglichung o. Optimierung der Sekundärproduktion** | 1 % | 1 % | 5 % | 5 % | 10 % | 10 % |
| **Durch Photonik bedingte $CO_2$eq-Vermeidung** [Mio. t $CO_2$eq] | 5 | 1 | 33 | 6 | 76 | 14 |

Quelle: TEMATYS

**Optische Analytik ermöglicht eine extrem schnelle und selektive, kontaktlose Identifizierung von Materialien im Recyclingprozess.**

## $CO_2$-VERMEIDUNG DURCH OPTISCHE KOMMUNIKATION IN 5G-MOBILFUNKNETZEN

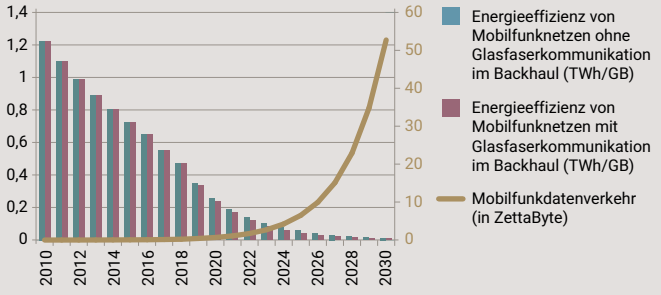
In 5G-Mobilfunknetzwerken fließen 80 Prozent des Stroms in Basisstationen (BTS – Base Station Transceiver). Je mehr Datenverkehr, desto mehr Strom wird benötigt. Zusätzlich hängt der Energieverbrauch der Stationen von der Bevölkerungsdichte, der Topologie des Standorts und etlichen anderen Parametern ab [1].

Weitere 10 Prozent des Energiebedarfs entfallen auf das Backhaul-Netzwerk, also der Anbindung der am äußeren Rand des Netzwerks befindlichen, meist hierarchisch untergeordneten Basistationen an das innere Netzwerk, den zentralen Netzknoten (Core) [2, 3]. Es sind sowohl leitungsbasierte als auch drahtlose Verbindungen möglich (Glasfaser, Mikrowelle, Freiraumoptik).

Energieeffizienzgewinne können sich durch das optimale Zusammenspiel geeigneter Bereitstellungsumgebungen, mobiler Architekturen und Technologien ergeben [4]. Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms GreenTouch-Technologie wurde gezeigt, dass beispielweise die LSAS-Technologie (Large Scale Antenna System) in Kombination mit dem getrennten Signalsystem zwischen kleinen Zellen (Beyond Cellular Green Generation - BCG) alle anderen Technologien in dichter städtischer Umgebung übertrifft [5].

Marktforscher erwarten, dass der Anteil von Glasfaserverbindungen im Backhaul-Netzwerk in den kommenden Jahren weiter steigt, von 40 Prozent im Jahr 2015 auf über 50 Prozent im Jahr 2021. Der zweitgrößte Anteil soll auf drahtlose Mikrowellen- oder Freiraumoptik-Verbindungen entfallen, der Anteil von Kupferverbindungen spielt nur eine untergeordnete Rolle [6].

**Mobiler Datenverkehr und Effizienzsteigerung durch Glasfaserverbindungen im Backhaul-Netzwerk**



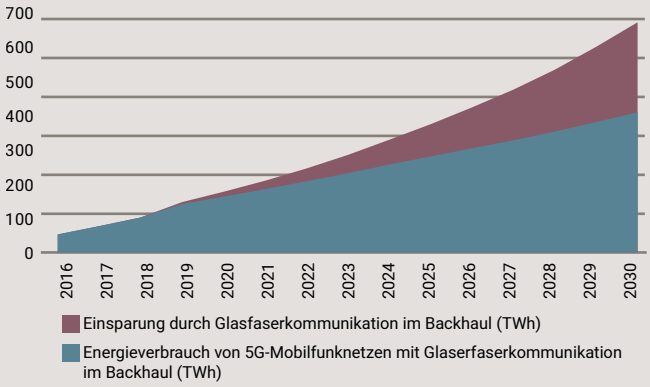

Quelle: TEMATYS

**Nachhaltigkeitseffekt optischer Kommunikationstechnik in 5G-Mobilfunknetzen**

| | 2019 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|
| **$CO_2$eq-Vermeidung in Mio. t/Jahr** | 3 | 35 | 66 |

Quelle: TEMATYS

**Weltweiter Stromverbrauch mit und ohne Glasfasernetz im 5G-Backhaul-Netzwerk**

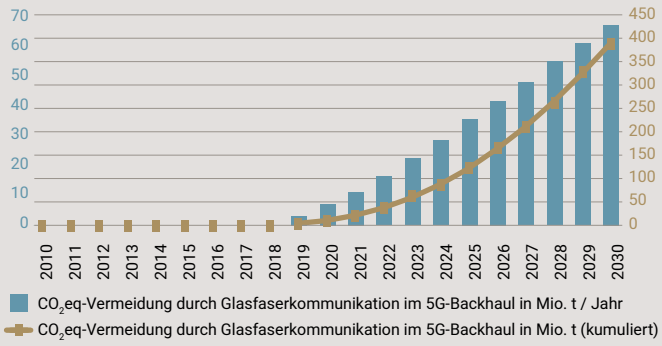



Quelle: TEMATYS, [4]

Vor dem Hintergrund eines starken Anstiegs des mobilen Datenverkehrs auf 50 Zettabyte (1 ZB = 1 Mrd. Terrabyte) in 2030 und unter Berücksichtigung der zuvor genannten Anteile und Parameter ist davon auszugehen, dass perspektivisch ein um 10 prozent geringerer Verbrauch (kWh/GB) durch den Einsatz von Optiken in Backhaul im Vergleich zu Kupfer- und Mikrowellenkanälen realisiert werden kann. Demnach läge der weltweite Energieverbrauch im Jahr 2030 bei 406 TWh statt bei 668 TWh, was einer Reduktion um 40 Prozent entspricht.

Umgerechnet ergibt sich daraus in 2030 das Potenzial einer Vermeidung von 66 Millionen Tonnen $CO_2$eq pro Jahr.

**$CO_2$eq-Vermeidung durch den Einsatz von Glasfaserverbindungen im 5G-Backhaul-Mobilfunknetz (im Vergleich zu Kupfer- und Mikrowellennetzwerken)**




Quelle: TEMATYS

**In Glasfasern können sehr viele Daten parallel übertragen werden – eine wichtige Voraussetzung für die Verknüpfung der 5G-Netzwerkknoten.**

## QUELLENANGABEN UND HINWEISE

**$CO_2$-Vermeidung durch Photovoltaik** [Seite 20]


1. IRENA, IRENA Cost and Competitiveness Indicators: Rooftop Solar PV, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, ISBN 978-92-9260-037-2, www.irena.org, 2017
2. World Energy Outlook 2018, 2018, OECD/IEA, www.iea.org/weo (Sustainable Policies-Szenario, Vergleichsbasis Carbonized Mix)
3. How to develop a sustainable energy action plan (SEAP) – Guidebook, technical annex, the emission factors, Covenant of mayors, www.eumayors.eu, 2010
4. IEA Market Report Series – Renewables 2018, OECD/IEA, www.iea.org/topics/renewables


**$CO_2$-Vermeidung durch energieeffiziente Beleuchtung** [Seite 21]


1. Super-efficient Equipment and Appliance Deployment Initiative (SEAD); https://superefficient.org/about-us/campaigns/global-lighting-challenge (18.4.2019)


- Die Berechnungen basieren unter anderem auf der McKinsey-Studie „Lighting the way" (2013), des EU- Joint Research Centre Scientific and Policy Reports „Energy Saving Potentials" (2012) sowie auf weiteren Studien und Veröffentlichungen.
- In der Prognose wird ein Anstieg des Lumen (lm)/Watt (W)-Verhältnisses nicht berücksichtigt. Es wird stattdessen davon ausgegangen, dass in den nächsten 10 Jahren weiterhin die aktuelle LED-Generation zum Einsatz kommen wird. Die LED-Technologie hat bereits ein Verhältnis von etwa 160-200 lm/W erreicht, die Zielmarke liegt bei 300 lm/W.
- In der Prognose wurde der Effekt eines Wechsels von Ölbeleuchtung (starker $CO_2$-Ausstoß) zur Festkörperbeleuchtung in Entwicklungsländern nicht berücksichtigt.

**$CO_2$-Vermeidung durch optische Kommunkationstechnik in Datenzentren** [Seite 22]


1. Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021 White Paper, www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html, 2018
2. Anders S.G. Andrea, Huawei Technology Sweden, "Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030", DOI: 10.13140/RG.2.2.25103.02724, 2019
3. Lotfi Belkhir, Ahmed Elmeligi, "Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations", Journal of Cleaner Production 177 (2018), 448e463, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239, 2018
4. Shehabi A., Smith S.J., Horner N., Azevedo I., Brown R., Koomey J., Masanet E., Sartor D., Herrlin M., Lintner W. (2016), United States Data Center Energy Usage Report, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL, 56p. https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy
5. Suresh Inakollu, Randy Morin and Ryan Keefe, Sustainability 2017, 9, 865; Carbon Footprint Estimation in Fiber Optics Industry: "A Case Study of OFS Fitel, LLC" https://doi:10.3390/su9050865
6. Christoforos Kachris, Keren Bergman, Ioannis Tomko, "Optical Interconnects for Future Data Center Networks", DOI 10.1007/978-1-4614-4630-9, 2013
7. Peter Corcoran, Anders S.G. Andrae, "Emerging Trends in Electricity Consumption for Consumer ICT", www.researchgate.net/publication/255923829, 2013


**$CO_2$-Vermeidung durch Glasfaserkommunikationsnetze** [Seite 23]


1. HOW TO DEVELOP A SUSTAINABLE ENERGY ACTION PLAN [1] R. Montagne, IDATE, FTTH Council Europe, Panorama & Forecast, Amsterdam, 2019
2. Connectivity for a European Gigabit Society, European Commission, https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/improving-connectivity-and-access, 2019
3. FTTH Council and PricewaterhouseCoopers (PwC), "FTTH network solutions are sustainable and contribute to a greener Europe", 2008
4. FTTH/B has consolidated its position as the leader in the super-fast broadband solution, far ahead of FTTx/D3.0, followed by VDSL, Jean-Luc Lemmens, IDATE, https://fr.idate.org/marche-mondial-fttx-2018/, 2018


Detaillierter Vergleich von FTTH mit ADSL, VDSL und HFC (Kabel): Energy Consumption and Environmental Implications of Wired Access Networks. American J. of Engineering and Applied Sciences 4 (4): 531-539, 2011 ISSN 1941-7020

**$CO_2$-Vermeidung durch energieeffiziente Displays** [Seite 24]


1. Journal of Cleaner Production 177 (2018) 448e463, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239
2. Jens Malmodin, Dag Lunden, Ericsson Research Company, 2015, "The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010-2015 – Supplementary material"
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Rebound_effect_ (conservation)
4. OLED Has My Heart, But LCD Still Has my Head, DSCC, Yoshi Tamura, November 2017, www.displaydaily.com/article/display-daily/oled-has-my-heart-but-lcd-still-has-my-head
5. Samsung Press release, https://pid.samsungdisplay.com/en/learning-center/white-papers/evolution-of-quantum-dot-technologies
6. Die Berechnung bezieht sich auf eine Bildschirmgröße von 55" und eine Nutzungsdauer von 5 Stunden pro Tag; www.rtings.com/tv/learn/led-oled-power-consumption-and-electricity-cost


**$CO_2$-Vermeidung durch optische Waldbrandfrüherkennung** [Seite 25]


1. Guido R. van der Werf, James T. Randerson, Louis Giglio, Thijs T. van Leeuwen, Yang Chen, Brendan M. Rogers, Mingquan Mu, Margreet J. E. van Marle, Douglas C. Morton, G. James Collatz, Robert J. Yokelson, and Prasad S. Kasibhatla, Global fire emissions estimates during 1997–2016, Earth Syst. Sci. Data, 9, 697–720, 2017, https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017
2. Shahriar Rahman, Hsing-Chung Chang, Christina Magill, Kerrie Tomkins and Warwick Hehir, Forest Fire Occurrence and Modeling in Southeastern Australia, DOI: 10.5772/intechopen.72059, 2018, www.intechopen.com/books/forest-fire/forest-fire-occurrence-and-modeling-in-southeastern-australia
3. Ahmad AA Alkhatib, Forest Fire Monitoring, Forest Fire, Janusz Szmyt, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.72059, 2017, www.intechopen.com/books/forest-fire/forest-fire-monitoring
4. Thales, Stratobus project takes off!, Pressemitteilung 4/2016, www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/stratobus-project-takes
5. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, H.: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Inter- governmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 659– 740, 2013
6. Boden, T. A., Marland, G., and Andres, R. J.: Global, Regional, and National Fossil-Fuel $CO_2$ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA, 2017, https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2017


- Automatische Waldbranderkennungssysteme (AWDS) kommen bereits in vielen Ländern zur Anwendung, so zum Beispiel in Kanada, USA, Mexiko, Chile, Frankreich, Portugal, Spanien, der Slowakei, in Griechenland, Estland, Deutschland, Zypern, Italien, der Tschechischen Republik, in Finnland, Schweden, der Türkei, in Australien, Thailand, Südkorea, Südafrika, im Swasiland und in Tunesien (3). Es wird angenommen, dass in diesen Ländern keine bedeutende Entwaldung stattfinden wird, um neues Land zu gewinnen und das sich die Waldoberfläche in diesen Ländern in den kommenden 15 Jahren nicht dramatisch verändern wird.
- Die von einem AWDS abgedeckten Gebiete sind im Vergleich zur Gesamtfläche jedes Landes noch klein. Mangels genauer Statistiken muss die Abdeckung geschätzt werden.
- In den kommenden Jahren werden die meisten Systeme auf Wachtürmen implementiert werden, aber die Überwachung per Pseudosatellit steht in den Startlöchern und es wird angenommen, dass diese innerhalb eines Jahrzehnts oder früher voll einsatzfähig ist.
- Vereinfachend wird für die durch Waldbrände durchschnittliche jährliche $CO_2$eq-Emission ein konstanter Wert angenommen.

**$CO_2$-Vermeidung durch laserunterstütztes Metallrecycling** [Seite 26]


1. Global non-ferrous scrap flows 2000-2015, with a focus on aluminium and copper, Bureau of International Recycling, 2016
2. World steel recycling in figures 2013-2017, Steel scrap – a raw material for steelmaking, Bureau of International Recycling, 2018
3. Report on the environmental benefits of recycling, 2016 edition, Bureau of International Recycling
4. Environmental implications of future demand scenarios for metals, methodology and application to the case of seven major metals; Ester Van der Voet, Lauran Van Oers, Miranda Verboon, and Koen Kuipers, Journal of Industrial Ecology, Volume23, Issue1, February 2019, Pages 141-155, DOI: 10.1111/jiec.12722.
5. LIBS analyses for industrial applications – an overview of developments from 2040 to 2018; Reinhard Noll, Cord Fricke-Begemann, Sven Connemann, Christoph Meinhardt and Volker Sturm, J. Anal. At. Spectrom., 2018, 33, 945.

**$CO_2$-Vermeidung durch optische Kommunikationstechnik in 5G-Mobilfunknetzen** [Seite 27]


1. Md Maruf Ahamed and Saleh Faruque, 5G Backhaul: Requirements, Challenges, and Emerging Technologies http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78615

2. Mohammed H. Alsharif *, Jeong Kim and Jin Hong Kim, Green and Sustainable Cellular Base Stations: An Overview and Future Research Directions, Energies 2017, 10, 587; doi:10.3390/en10050587

3. GSMA development fund, WhitePaper «Green Power for Mobile : Top 10 findings

4. U. Barth, D. Bourse, C. Dorize, K. Hinton, D. C. Kilper, T. Klein, S. Korotky, W. Shieh, P. Vetter, GreenTouch Roadmap: Strategic Research Areas and Project Portfolio, September 2012

5. GreenTouch Consortium, Reducing the Net Energy Consumption in Communications Networks by up to 98 % by 2020, August 2015

6. WhitePaper CIENA: 5G Converged Optical Fiber and Microwave Transport (2018)

7. A. Fehske, J. Malmodin, G. Biczok, The Global Carbon Footprint of Mobile Communications – The Ecological and Economic Perspective, Source: DBLP (2011), DOI:10.1109/MCOM.2011.5978416 siehe auch: J.Malmodin, A. Lungden, The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010-2015 – Supplementary material


**Hinweis**

Bei der Berechnung der Potenziale wurde bei der $CO_2$eq-Vermeidung der Prozentsatz zugrunde gelegt, der auf die Photoniklösung zurückgeführt werden kann. Bei den meisten der genannten Beispiele liegt er bei 100 Prozent.

Umweltschutz und Recycling 32
Stadtentwicklung 46
Mobilität 48
Energieerzeugung und -speicherung 62
Industrielle Produktion 68
Land- und Forstwirtschaft 80

ANWENDUNGSBEISPIELE

# DEUTSCHE HIGHTECH-LÖSUNGEN ZUR ÖKOLOGISCHEN NACHHALTIGKEIT

ANWENDUNGSBEISPIELE

# UMWELTSCHUTZ UND RECYCLING

# Ökologische Nachhaltigkeit durch Photonik im Bereich Umwelt und Recycling

Durch die weltweite Zunahme von Umweltproblemen, den wahrnehmbaren Klimawandel sowie den Anstieg der Weltbevölkerung wächst die Bedeutung eines nachhaltigen Umgangs mit natürlichen Ressourcen und Energie zum Schutz der Umwelt. Dabei müssen Ökonomie und Ökologie zunehmend miteinander verflechtet werden. Dies wird unter anderem durch die Verbreitung und Weiterentwicklung von fortschrittlichen Technologien, nicht nur in modernen Industriegesellschaften, gefördert. So werden beispielsweise lasergestützte Messverfahren im Recycling oder in der Klimaforschung eingesetzt.

In Deutschland ist die Wiederverwertung von Wertstoffen mit festgeschriebenen Quoten geregelt. Dabei stehen nicht nur Kunststoffe im Vordergrund: Das systematische Recycling zum Beispiel von Metallen in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft wird Treibhausgasemissionen wesentlich reduzieren. Eine im Auftrag der EU erstellte Studie des Projektes „Mineral Intelligence Capacity Analysis“ empfiehlt einen Wandel im gesamten Materialkreislauf, vom Bergbau über die Produktion inklusive Produktdesign bis hin zur Recyclingtechnologie und -infrastruktur. So wächst die Bedeutung einer effizienten Rückgewinnung seltener und strategisch bedeutender Wertstoffe, wie seltene Erden oder Technologiemetalle.

Flexibel anpassbare Lasersysteme spielen in der Umwelttechnik und in der Klimaforschung ihre Vorteile aus und erfassen schnell, berührungslos und hochpräzise physikalische, chemische oder biologische Größen. In Recyclingabläufen können anfallende Stoffe beispielsweise per Laser-Direktanalyse frühzeitig klassifiziert und gezielt für die Verwertung sortiert werden. So lassen sich wertvolle Rohstoffe aus ausgedienten Bauteilen wie Mobiltelefonen oder Platinen zurückgewinnen.

In der Klimaforschung ist die Kenntnis und Analyse der Quellen umweltschädlicher Gase, wie Kohlendioxid, Stickoxide oder Methan, ein wichtiger Schritt für die signifikante Reduzierung von Umweltbelastungen. Kompakte Laserstrahlquellen in satellitengestützten Systemen erweisen sich hier als besonders nützlich. Sie ermöglichen beispielsweise eine präzise, zeitunabhängige und effiziente Kartierung von Methangasen.

Die Photonik trägt somit entscheidend zum Umweltschutz und zur Gestaltung zukünftiger Wertschöpfungsketten bei, insbesondere im Recyclingbereich. Die Bedeutung eines nachhaltigen Umgangs mit natürlichen Ressourcen und einer effizienten Rückgewinnung bedeutender Wertstoffe wächst – laserbasierte Verfahren sind dabei unverzichtbar für zukünftige Applikationen.

**ANWENDUNGSBEISPIELE**


Metallrecycling der Zukunft: Metalle und Legierungen per Laser messen und sortieren → **Seite 36**

Umweltschonendes Laserstrahl-Reinigen → **Seite 38**

Mobiltelefone und Computerelektronik – europäisches Projekt revolutioniert Urban Mining → **Seite 40**

Maßgeschneiderte Lasertechnik für Klimaforschung im Weltraum → **Seite 42**

Erdbeobachtungssatellit mit optischen Hochleistungsgittern im All → **Seite 44**

# Umweltschutz und Recycling: SPECTARIS im Gespräch

## SPECTARIS im Gespräch mit Edwin Büchter, dem geschäftsführenden Gesellschafter der Clean-Lasersysteme GmbH, AiF-Vizepräsidenten und Träger des Deutschen Umweltpreises

**SPECTARIS:** Herr Büchter, 2010 hat der damalige Bundespräsident Ihnen und Ihrem Geschäftsführungskollegen, Herrn Dr. Winfried Barkhausen, den Deutschen Umweltpreis überreicht. Wie haben Sie das erlebt und welche Lösung wurde prämiert?

**Edwin Büchter:** Die Verleihung des renommierten Deutschen Umweltpreises durch die Deutsche Bundestiftung Umwelt (DBU) war schon ein sehr bedeutendes Ereignis in unserem Wirken als Unternehmer, aber auch wegweisend für den Erfolg unserer Technologie. Durch die Verleihung des Preises aus den Händen des damaligen Bundespräsidenten bekam unser Unternehmen cleanLASER und auch die Umweltfreundlichkeit der Photonik einen bedeutenden Schub. Erstmalig wurde der breiten Öffentlichkeit klar, dass durch den gezielten Einsatz von Laserlicht Oberflächen umweltfreundlich und nachhaltig ohne Einsatz von Chemie und Strahlmitteln gereinigt werden können und dabei eine bedeutsame Ressourceneinsparung erzielt wird.

**SPECTARIS:** Was ist der Vorteil des Verfahrens und wie ist die Akzeptanz der Kunden?

**Edwin Büchter:** Durch das Reinigen mit Licht lassen sich nicht nur Reinigungsmedien, sondern auch signifikant Energie einsparen. Darüber hinaus ist das Laserverfahren trotz einer vermeintlich höheren Investition sehr schnell wirtschaftlicher als alternative Verfahren. Das minimiert wiederum die Kosten für die Logistik und optimiert die Wertschöpfungsketten. Auch lassen sich Reinigungsprozesse mittels Laserstrahlung sehr gut absichern, so dass eine Steigerung der Qualität im Sinne der Industrie 4.0 Strategie möglich ist. Durch die Präzision der Laserstrahl-Bearbeitung kann man auch Teile partiell reinigen. So ist es zum Beispiel möglich, komplett mit empfindlicher Elektronik bestückte Baugruppen an Funktionsbereichen, also zum Beispiel vor dem Kleben oder Schweißen, lokal zu reinigen. Möglichkeiten, die mit konventionellen Verfahren nicht denkbar sind.

**EDWIN BÜCHTER**

Geschäftsführender Gesellschafter der Clean-Lasersysteme GmbH, AiF-Vizepräsident und Träger des Deutschen Umweltpreises

**SPECTARIS:** Die Technologie des Verfahrens basiert auf einem Forschungsprojekt. Funktioniert in Deutschland also der Wissenstransfer von der Forschung zur Industrie?

**Edwin Büchter:** Den technischen Durchbruch in der Laserstrahl-Reinigung konnten wir Anfang der 2000er Jahre durch die Entwicklung eines leistungsstarken diodengepumpten gepulsten Lasersystems herstellen. Erstmalig wurde damit – dank der Unterstützung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt – die Laserstrahl-Reinigung effizient, kostengünstig und hochverfügbar. Wichtig ist aber auch eine breite Ausrichtung und der Forschungs- sowie Wissenstransfer aus der Forschung in die Industrie bei der Erschließung neuer Anwendungsfelder.

Als Lasertechniker hatten wir vor 20 Jahren zum Beispiel relativ wenig Ahnung von Kleb- und Fügeprozessen bzw. Problemen in der Luft- und Automobilindustrie. Benötigt werden also Marktplätze des innovativen Austausches.

Hier kommt zum Beispiel die Industrielle Gemeinschaftsforschung unter Führung der AiF e. V. zum Tragen. Dieses Modell des gemeinsamen (vorwettbewerblichen) Forschens mit Mitteln des Wirtschaftsministeriums ist in der Form weltweit einmalig und erfolgreich. Durch die Initiativen des innovativen Mittelstandes werden interdisziplinär neue Themen erforscht und somit ein Transfer über verschiedene Branchen vor allem über die beteiligten Personen in der Industrie und in den beteiligten Forschungsvereinigungen geschaffen. Wenn man in Deutschland nach optimalem

Forschungstransfer sucht, findet man diesen in und durch die AiF.

Dennoch ist aber auch dieser sehr effiziente und aktuell mit verhältnismäßig bescheidenen Mitteln (169 Millionen Euro) ausgestattete Forschungstransfer deutlich ausbaufähig. Für eine Verbesserung der Transferfähigkeit bei gleichbleibend hoher Effizienz wären mindestens 200 Millionen Euro per annum erforderlich und würden sich als gute Investition in die Industrielle Gemeinschaftsforschung erweisen.

**SPECTARIS:** Mit dem deutschen Umweltpreis wurden in den vergangenen Jahren zwei weitere Lösungen der Photonik ausgezeichnet. In 2012 ging er an die „Visionäre der Photovoltaik-Technologie", Günther Cramer (SMA Technology AG), Dr. Andreas Bett (Fraunhofer ISE) und Hansjörg Lerchenmüller (Soitec Solar GmbH). Prof. Gunther Krieg (UNISENSOR Sensorsysteme GmbH) erhielt den Preis 2014 für sein Lebenswerk und die Entwicklung eines optischen Mess- und Analysesystems, das unter anderem für die Wiederverwendung von Mehrwegflaschen aus PET eingesetzt wird. Warum ist gerade die Photonik als Technologie für den Umweltschutz so erfolgreich?

**Edwin Büchter:** Licht zur industriellen Anwendung verursacht keinen Schmutz! Durch die deutlichen Steigerungen der Steckdosenwirkungsgrade ist der Einsatz der Photonik so leistungsfähig und effizient wie nie zu vor.

Mit dem Werkzeug Licht lässt sich nicht nur hocheffizient und präzise und somit nahezu ohne Verschwendung knapper Ressourcen arbeiten, sondern auch durch die Photonik aus Licht nachhaltig Energie gewinnen. Somit hat die Photonik ein enormes Potenzial für den Umweltschutz.

**SPECTARIS:** Als mittelständisches, hoch innovatives Unternehmen haben Sie sich nicht auf Ihren Lorbeeren ausgeruht. Inzwischen bieten Sie eine weitere Lösung an, die maßgeblich zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen kann. Worum geht es dabei genau?

**Edwin Büchter:** Seit ungefähr fünf Jahren beschäftigt sich cleanLASER mit weiteren Themen im Bereich der Lasertechnik. Durch die Kombination von Laserstrahl-Reinigung und der Laser-Emissionsspektroskopie (LIBS) ist es uns gelungen ein einmaliges Produkt zu entwickeln, das verschmutzte Schnittteile reinigt und im gleichen „Atemzug" detektiert. Mit dem „optischen Fingerabdruck", der beim präzisen Bestrahlen mittels unserer Laser entsteht, können wir in wenigen Millisekunden metallische Bauteile und Schrotte erkennen und anschließend sortieren. Somit ist es erstmalig möglich, hocheffizient mit Durchsatzraten von bis zu 10 t/Stunde Aluminiumbauteile nach ihren Legierungsbestandteilen zu klassifizieren und zu sortieren.

Insbesondere im Bereich des Automobilen Leicht- und Materialmischbaus eröffnet das neue Möglichkeiten, wirtschaftlich und nachhaltig die Wertstoffkette wieder zu schließen und somit zum Beispiel verschiedene Aluminium-Legierungen, die im Presswerk als „Neuschrott" anfallen, wieder ohne Qualitätsverlust einschmelzen zu können. Allein dadurch lassen sich im Vergleich zur Erzeugung von Rohaluminium Energieeinsparungen mit dem Faktor 5 erzielen! Diese Aktivitäten sind so erfolgreich, dass wir durch die Gründung des Unternehmens cleansort mit Sitz in Rösrath bei Köln nicht nur eine Markterschließung, sondern auch gleich neue Arbeitsplätze generiert haben.

**SPECTARIS:** Hat der Standort Deutschland aus Ihrer Sicht das Potenzial auch in Zukunft international mit Hightech-Lösungen der Photonik, die aufgrund ihrer Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten oder Wirkungsweisen zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen können, zu überzeugen?

**Edwin Büchter:** Nach wie vor beherrschen deutsche Ingenieure in unvergleichlicher Weise die Komplexität. Diese Kompetenz ist insbesondere für die Entwicklung in der Lasertechnik wichtig. Photonik erfordert interdisziplinäres Denken und die Zusammenarbeit zwischen Elektronikern, Physikern, Materialwissenschaftlern und Maschinenbauern. Diese Anforderungen können wir erfüllen und damit sicherstellen, dass die nachhaltige Wirkung auch in naher Zukunft erzielt wird. Die aktuellen politischen Finanzierungsschwerpunkte zeigen jedoch, dass die anteiligen Investitionen in Ausbildung, Forschung und weitere zukunftssichernde Felder rückläufig sind, während die Staatsausgaben für andere, wenig nachhaltige Bereiche kontinuierlich ansteigen. Aus meiner Sicht ein sehr gefährlicher Trend, der, gepaart mit dem Ausverkauf der deutschen Industrie und des Mittelstandes sowie dem „Verschenken" unseres universitären Wissens, sicherlich nicht dabei helfen wird, den Standort Deutschland mit seinen großartigen Potenzialen wieder nach vorne zu bringen.

**SPECTARIS:** Wir danken Ihnen für das Gespräch!

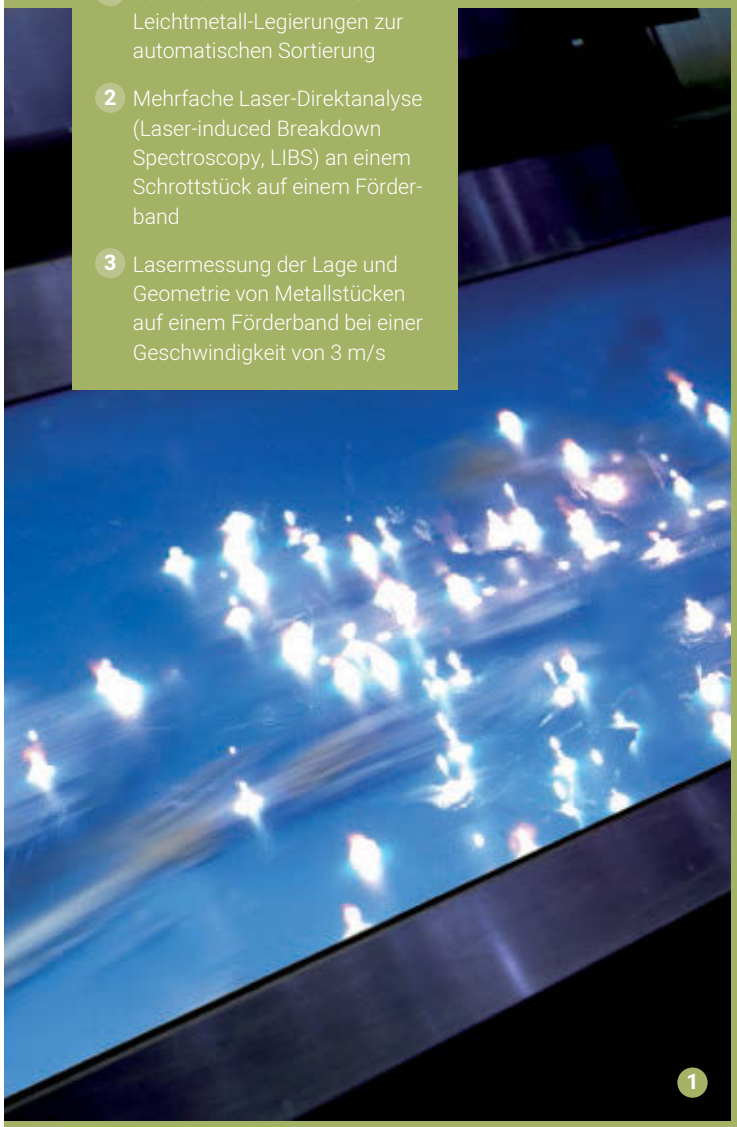
**DEUTSCHER UMWELTPREIS**

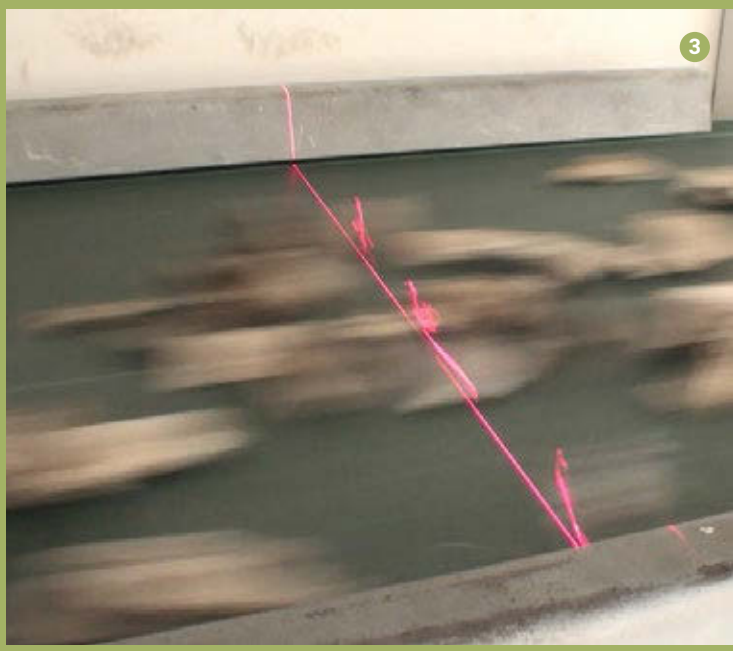
Mit dem höchstdotierten (500.000 €) Umweltpreis Europas zeichnet die DBU jährlich Leistungen aus, die entscheidend zum Schutz und zur Erhaltung unserer Umwelt beitragen.

# Metallrecycling der Zukunft: Metalle und Legierungen per Laser messen und sortieren

Für ein effizientes Metallrecycling sind einzelne Legierungsarten zu trennen. Erstmals ist es per Laser möglich, Legierungsbestandteile in kurzer Zeit zu identifizieren und die Metallstücke nach Legierungsklassen zu sortieren.

1. Schnelle Identifikation von Leichtmetall-Legierungen zur automatischen Sortierung
2. Mehrfache Laser-Direktanalyse (Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) an einem Schrottstück auf einem Förderband
3. Lasermessung der Lage und Geometrie von Metallstücken auf einem Förderband bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s





## ANWENDUNGSBEREICH

Metallische Werkstoffe für spezifische Anwendungen enthalten typischerweise wertvolle Legierungselemente, die ihnen die gewünschten Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften verleihen. Je genauer diese Legierungen beim Recycling voneinander unterschieden werden, umso effizienter können wieder gezielt Legierungen erzeugt und wertvolle Legierungselemente genutzt werden. Äußerlich ist den Metallen meist nicht ohne weiteres anzusehen, welche Legierungsbestandteile sie enthalten.

Trennverfahren zur groben Klassifizierung von Metallen für das Recycling sind schon lange bekannt. Sie nutzen verschiedene physikalische Eigenschaften der Metalle, wie magnetische Eigenschaften oder spezifische Gewichte. Eine detailliertere Unterscheidung erlauben Röntgenverfahren, mit denen sich zum Beispiel bei Aluminium Guss- von Knetlegierungen unterschieden lassen. Eine weitergehende Unterscheidung bis zu einzelnen Knetlegierungsklassen ist damit jedoch in einer automatisch arbeitenden Sortieranlage nicht möglich.

Lasertechnik ermöglicht erstmals einen viel detaillierteren Einblick in die chemische Zusammensetzung metallischer Legierungen – mit einer Geschwindigkeit, die um Größenordnungen höher ist als bei bisherigen Verfahren. Innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde wird berührungslos ein chemischer Fingerabdruck erfasst, mit dem Legierungselemente identifiziert werden. Das Verfahren ist so schnell, dass auch auf einem Förderband bewegte Metallteile mit Geschwindigkeiten bis zu 5 m/s per Laser gemessen und diese Legierungsklassen zugeordnet werden können. Kombiniert mit der ebenfalls optisch gemessenen Position und Form der Teile auf dem Förderband lassen sich diese schließlich in einzelne Sortierfraktionen ausschleusen.

## TECHNOLOGIE

Die zu sortierenden Metalle liegen zum Beispiel als geschredderte Aluminiumschrottteile, als Produktionsabfälle aus Blechverarbeitungslinien oder als gebrauchte Werkzeuge aus Schnellarbeitsstahl, Titan oder Hartmetall vor. Sie werden als vereinzelte Teile auf einem Förderband transportiert. Ein von oben auf das Förderband gerichteter Laserstrahl erfasst die Lage und Geometrie der vorbeilaufenden Teile. Mit diesen Daten wird in Echtzeit ein Analyselaserstrahl auf die einzelnen Teile gelenkt, um die enthaltenen Legierungselemente zu identifizieren. Der Laserstrahl ist gepulst und so geformt, dass er nicht-repräsentative Deckschichten der Messobjekte durchdringen kann und das darunterliegende Material analysiert. 15 chemische Elemente und mehr werden auf diese Weise gleichzeitig erfasst, um die jeweilige Legierung zu identifizieren. Je nach Anwendungsfall werden bis zu 100 Messungen pro Sekunde durchgeführt.

Im Falle von Aluminium werden die identifizierten Schredderteile oder Produktionsabfälle bei Massendurchsätzen bis zu 10 Tonnen pro Stunde pneumatisch in verschiedene Legierungsfraktionen getrennt. Bei gesammelten gebrauchten Werkzeugen greift ein Manipulator die identifizierten Teile und schleust sie in bis zu sechs zugeordnete Sortierfraktionen aus.

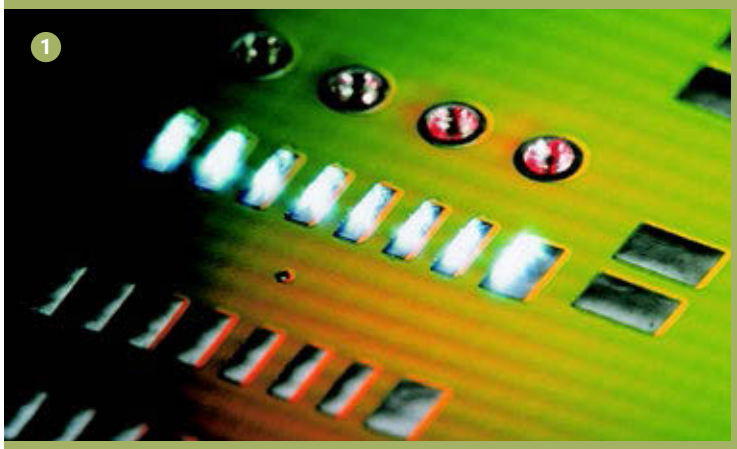
## NACHHALTIGKEIT

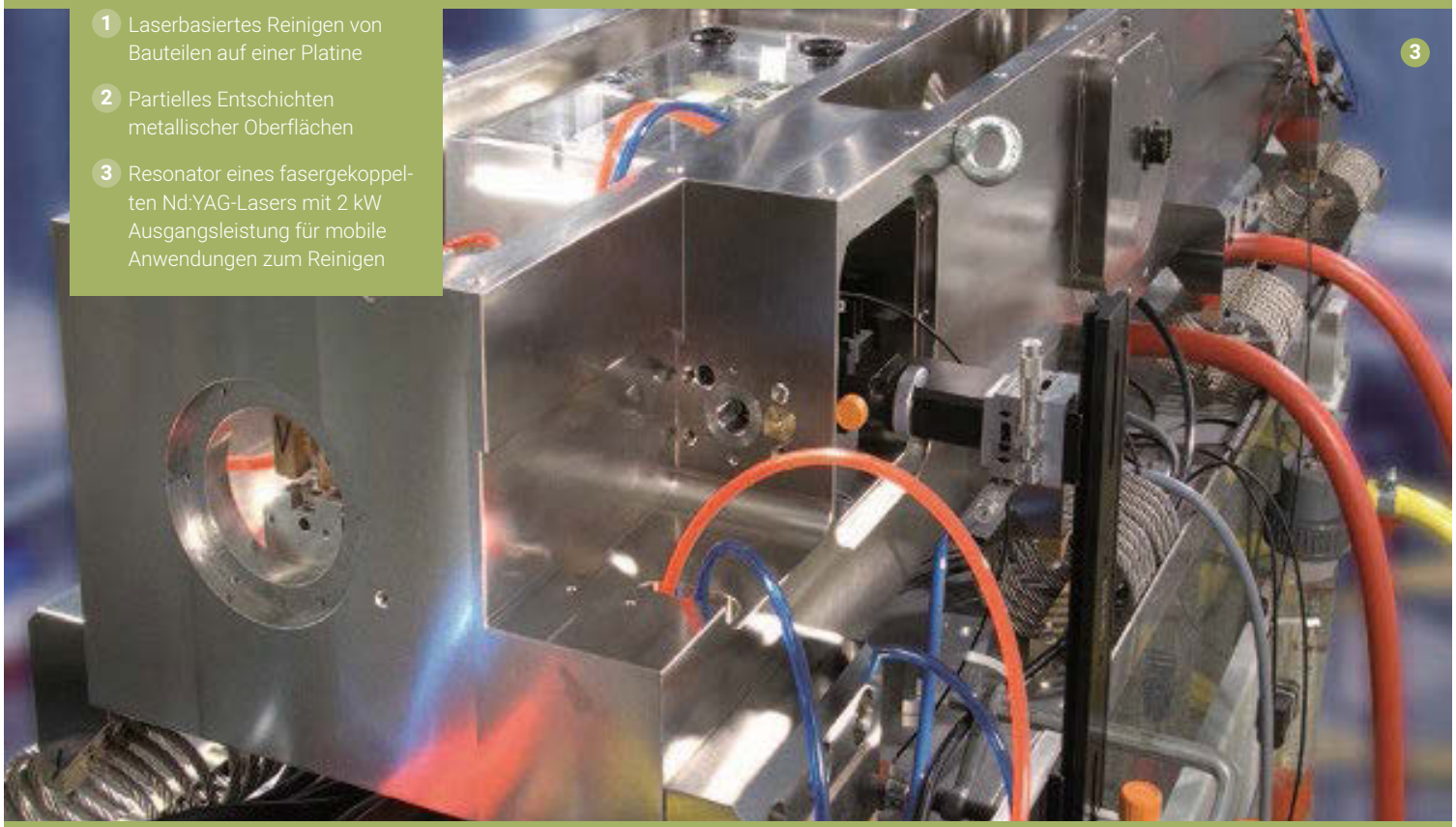
Die Inline-Messung der chemischen Zusammensetzung von Metallstücken eröffnet ein neues Potenzial zur Schonung von Ressourcen. Je besser einzelne Legierungen physikalisch voneinander getrennt werden, umso effizienter können wieder hochwertige Werkstoffe erzeugt werden. Reine Metalllegierungen lassen sich beliebig häufig ohne Qualitätsverlust recyceln. Werden Guss- und Knetlegierungen aus Aluminium nicht getrennt, so können daraus nur minderwertigere Gusslegierungen erzeugt werden. Der Anteil von Sekundäraluminium an der Gesamtaluminiumproduktion betrug im Jahr 2017 in Deutschland 58 Prozent. Hier gibt es ein klares Ausbaupotenzial. Mit Sekundäraluminium kann der Energieeinsatz um bis zu 95 Prozent gegenüber dem Energiebedarf zur Erzeugung von Primäraluminium aus Rohstoffen gesenkt werden.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Cord Fricke-Begemann | cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de
Prof. Reinhard Noll | reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

# Umweltschonendes Laserstrahl-Reinigen

Durch das Laserstrahl-Reinigen können unerwünschte Verunreinigungen, Lacke und andere Beschichtungen umweltschonend von technischen Oberflächen entfernt werden, ohne dabei das Grundmaterial zu schädigen.





1 Laserbasiertes Reinigen von Bauteilen auf einer Platine

2 Partielles Entschichten metallischer Oberflächen

3 Resonator eines fasergekoppelten Nd:YAG-Lasers mit 2 kW Ausgangsleistung für mobile Anwendungen zum Reinigen

## ANWENDUNGSBEREICH

Effizient, berührungslos und umweltschonend mit Laserstrahlung reinigen: Im Vergleich zu chemischen, mechanischen und thermischen Verfahren hat das Laserstrahl-Reinigen zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Dafür gibt es im Wesentlichen drei Gründe: Die verfahrensspezifischen Vorteile (z. B. berührungslose Bearbeitung, hohe Präzision, geringe Wärmebeeinflussung des Grundwerkstoffs), der Trend zu steigender Automatisierung und dadurch auch zu größerer Wirtschaftlichkeit sowie die strenger werdenden Regelungen des Gesetzgebers bezüglich Hygiene-Einhaltung und Abfall- bzw. Schadstoffvermeidung (z. B. kontaminierte Reinigungsmittel).

Dadurch hat sich das Laserstrahl-Reinigen mittlerweile branchenübergreifend etabliert. Ein Einsatzgebiet ist die im Rahmen von regelmäßig durchgeführten Instandsetzungsarbeiten anfallende großflächige Reinigung von wertwichtigen Großbauteilen wie aus Stahlgitterkonstruktionen bestehende Brücken oder Hallen, aber auch von Flugzeugen und Masten für Windräder. So werden beispielsweise verwitterte Altbeschichtungen, Rost und Oxide entfernt, um einen streichfähigen Untergrund für eine schützende Neubeschichtung zu schaffen. Hierbei ist es eine besondere Herausforderung, Schichten selektiv abzutragen und intakte Schutzschichten bestehen zu lassen. Im Bereich der Automobil- und Automobilzulieferindustrie wird das Laserstrahl-Reinigen vornehmlich inline in bestehende Prozessketten integriert. Es lässt sich zum Beispiel als lokale Vorbehandlung vor fügenden Fertigungsverfahren wie Schweißen, Löten, Kleben einsetzen oder vor einer weiteren additiven Beschichtung mit Funktionswerkstoffen zur Herstellung von Sensoren, Leiterbahnen oder Kontaktpunkten. Das laserbasierte Reinigen ist zudem nutzbar für das Randentschichten von Dünnschicht-Solarzellen, um die Module elektrisch zu isolieren und hermetisch abzudichten.

Zukünftige Entwicklungen bei kurzgepulsten und preislich attraktiven Laserstrahlquellen sowie bei schnellen Strahlablenksystemen werden zu einer weiteren Marktdurchdringung dieser Reinigungstechnologie führen.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Carsten Johnigk | carsten.johnigk@ilt.fraunhofer.de
Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de
Dr. Christian Vedder | christian.vedder@ilt.fraunhofer.de

## TECHNOLOGIE

Das Laserstrahl-Reinigen beruht auf einem lokal begrenzten, berührungslosen Einwirken von gepulster oder kontinuierlicher Laserstrahlung und ermöglicht ein automatisierbares und nahezu wartungsfreies Reinigen. In Abhängigkeit von der Deckschichtzusammensetzung und -dicke sowie den Verfahrensparametern treten verschiedene Abtragmechanismen auf. Die für das Laserstrahl-Reinigen wichtigsten Mechanismen sind der Abtrag durch Verdampfung oder Zersetzung der Deckschicht (Sublimationsabtrag) und der Abtrag durch thermisch induzierte Spannungen oder durch laserstrahlinduzierte Schockwellen.

Vielfach wirken bei technischen Deckschichtsystemen mehrere Mechanismen gleichzeitig, wobei der jeweilige Anteil von den Werkstoffeigenschaften und den Verfahrensparametern abhängt – insbesondere von den Laserstrahlparametern Wellenlänge, Leistungsdichte und Wechselwirkungszeit.

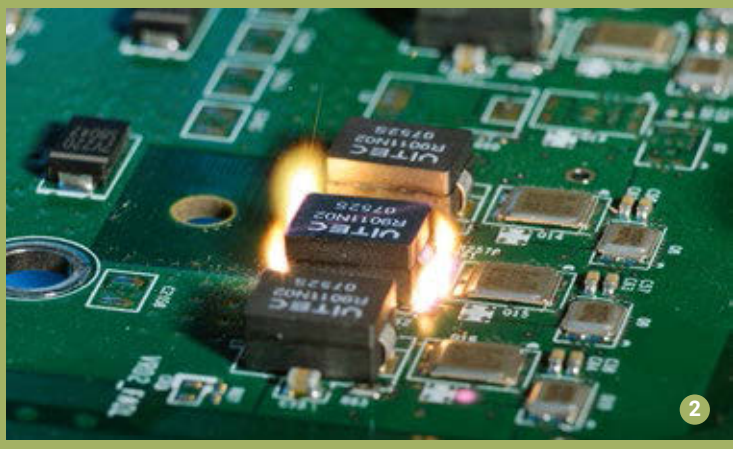
Weitere Einflussgrößen für das Laserstrahl-Reinigen sind die optischen Eigenschaften wie Absorptions-, Transmissions- und Reflexionsgrade der zu entfernenden Deckschicht und des Grundmaterials. Idealerweise kann der Prozess so ausgelegt werden, dass er selbstbegrenzend ist, was für metallische Substratmaterialien meistens gegeben ist. Durch die Möglichkeit der Automatisierung und die nahezu wartungsfreie Technik ergibt sich vielfach eine größere Wirtschaftlichkeit.

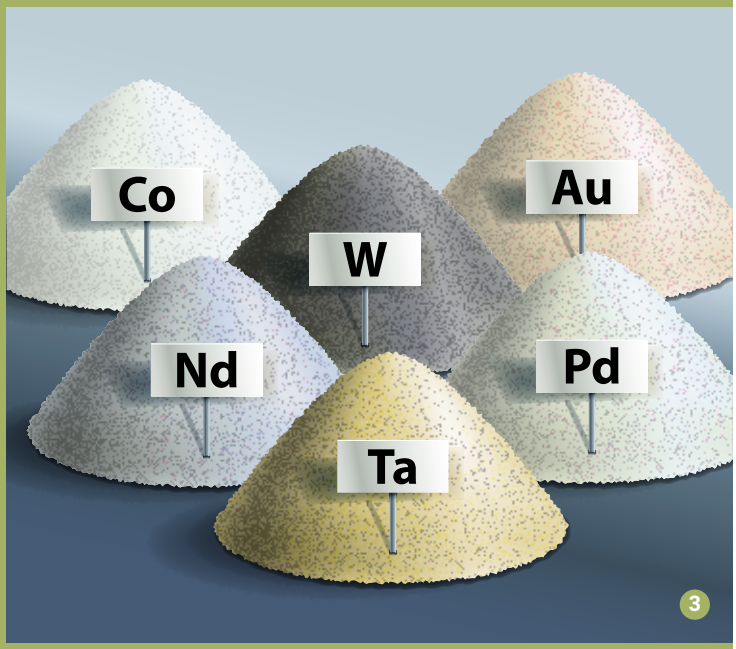
## NACHHALTIGKEIT

Im Vergleich zu konventionellen chemischen oder Partikelstrahl-Verfahren werden keine zusätzlichen Strahl- oder Reinigungsmittel benötigt, die nach der Reinigung zusammen mit dem abgetragenen Material als Abfall entsorgt werden müssen. Beim Laserstrahl-Reinigen fällt maximal die Menge des abzutragenden Materials als Abfall an, durch Veraschung während der Bearbeitung tritt meist eine weitere Reduzierung der Abfallmenge ein. Bei der Bearbeitung entstehende Abtragprodukte werden direkt an der Bearbeitungsstelle durch geeignete Absauganlagen entfernt und gefiltert, somit sinkt das Risiko von Querkontaminationen signifikant. Das Verfahren ist berührungslos und kräftefrei, sodass sich auch empfindliche Substratmaterialien zerstörungsfrei bearbeiten lassen.

# Mobiltelefone und Computerelektronik – europäisches Projekt revolutioniert Urban Mining

Optische Technologien für die Wiedergewinnung wertvoller Materialien: Das europäische Projekt ADIR befasst sich mit innovativen Technologien der Zerlegung, Trennung von Komponenten sowie der Wiedergewinnung wertvoller Materialien von Altelektroniken, um eine neue Stufe des Urban Mining zu erzielen.






1 Im ADIR-Projekt werden strategisch bedeutende Wertstoffe aus alten Mobiltelefonen und Computerplatinen zurückgewonnen

2 Berührungsloses Entlöten elektronischer Bauelemente von Platinen mit Laserstrahlung in der Verfahrenskette des ADIR-Projekts

3 Wirtschaftlich bedeutende Materialien können mit hoher Wiedergewinnungseffizienz erzeugt werden

## ANWENDUNGSBEREICH

Die hohe Verbreitung elektronischer Geräte mit kurzen Lebenszyklen – wie Mobiltelefone und Computerplatinen – führen dazu, dass allein in Europa jedes Jahr hunderte Millionen dieser Teile nicht mehr genutzt werden. Sie enthalten wertvolle Elemente, die auch zukünftig eine wichtige Rolle bei der industriellen Fertigung von Hightech-Elektronik spielen. Meist gehen die enthaltenen speziellen Wertstoffe, wie zum Beispiel Technologiemetalle, in den heutigen Behandlungsverfahren verloren, die auf Zerkleinerung und metallurgischer Rückgewinnung weniger Metalle beruhen.

Das Ziel des Projekts „ADIR – Next generation urban mining – Automated disassembly, separation and recovery of valuable materials from electronic equipment" ist es, die Machbarkeit einer Schlüsseltechnologie für das Urban Mining der nächsten Generation zu demonstrieren und die in der Altelektronik verborgenen Schätze zu bergen. Mit einer neuartigen selektiven Entstückung lassen sich hochangereicherte Wertstofffraktionen separieren, aus denen in effizienter Weise wertvolle Stoffe wiedergewonnen werden können. Das Konzept basiert auf einer Prozesskette, die verschiedene optische Verfahren in mehreren Bearbeitungsstufen beinhaltet. Flexible Lasertechnik wird hier zum Beispiel für die 3D-Messtechnik der Topografie von Elektronikplatinen, die Echtzeit-Identifizierung von Inhaltsstoffen oder für das berührungslose Entlöten elektronischer Bauelemente eingesetzt. Per Laser werden beispielsweise Tantal-Kondensatoren in Sekundenbruchteilen von Elektronikplatinen entlötet und per Luftstrom der entsprechenden Sortierfraktion zugeführt. In kurzen Bearbeitungszeiten lassen sich auf diese Weise viele hochwertige Stoffe gewinnen. Beispiele sind Materialien mit hoher wirtschaftlicher Bedeutung und erheblichem Versorgungsrisiko für die EU wie Tantal, Seltene Erden (Neodym), Palladium, Wolfram und Kobalt.

## TECHNOLOGIE

Altelektronik demontieren, messen, analysieren, entstücken und Wertstoffe sortieren: Die ADIR-Projektpartner erarbeiten eine automatisierte Demontage elektronischer Platinen und Geräte, um wertvolle Komponenten abzutrennen und daraus Wertstoffe wiederzugewinnen. Das Konzept basiert auf Bildverarbeitung, Roboterhandhabung, plasma-induzierten Stoßwellen, 3D-Lasermesstechnik, Echtzeit-Lasermaterialidentifizierung (zum Erkennen wertvoller chemischer Elemente), Laserbearbeitung (zum selektiven Entlöten werthaltiger Teile oder zum Ausschneiden von Teilen einer Elektronikplatine) und automatischer Trennung in verschiedene Sortierfraktionen. Ein Maschinenkonzept wurde erarbeitet, das in der Lage ist, Computerplatinen und Mobiltelefone mit kurzen Zykluszeiten selektiv zu zerlegen, um Sortierfraktionen von Komponenten mit hohen Wertstoffgehalten zu erhalten.

Der entwickelte ADIR-Demonstrator besteht aus einer Verkettung von vier Maschinen zur automatisierten Bearbeitung von Mobiltelefonen und Computerplatinen. Im Jahr 2019 wird dieser Demonstrator in Feldversuchen bei einem Recyclingunternehmen in Deutschland evaluiert. Die erhaltenen Sortierfraktionen werden hinsichtlich der Wiedergewinnung von Rohstoffen untersucht.

Das Verfahren des ADIR-Prozesses beruht auf einem Patent der Fraunhofer-Gesellschaft.

## NACHHALTIGKEIT

Viele Hochtechnologieprodukte erfordern spezielle Rohstoffe, die nach Europa importiert werden müssen. Gleichzeitig enthalten ausgediente elektronische Geräte und Elektronikplatinen bedeutsame Technologiemetalle. Mit einer industriellen *inversen* Produktionslinie nach dem Konzept von ADIR könnten 1.4 Millionen Mobiltelefone pro Jahr entstückt werden, bei Computerplatinen wären es ca. 470.000 Stück pro Jahr. Hochgerechnet auf Europa sind demnach 270 Anlagen erforderlich, um die anfallende Altelektronik dieser Kategorien zu verarbeiten. Damit bietet sich allein für Tantal das Potenzial, die Importabhängigkeit der EU um 35 Prozent zu senken.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Cord Fricke-Begemann | cord.fricke-begemann@ilt.fraunhofer.de
Prof. Reinhard Noll | reinhard.noll@ilt.fraunhofer.de

# Maßgeschneiderte Lasertechnik für Klima-forschung im Weltraum

Lasertechnik in kompakten Systemen eröffnet in der satelliten-gestützten Klimaforschung präzise, sonnenlichtunabhängige Analysen von klimarelevanten Atmosphären-Gasen – z. B. bei der Methan-Kartierung im Rahmen der Klimamission MERLIN.

2

MERLIN
Atmospheric Methane Lidar Mission

3

1 Künstlerische Darstellung des MERLIN-Instruments auf Basis der Myriade-Satellitenplattform

2 MERLIN – Klimaforschungs-mission (Methane Remote Sensoring LIDAR-Mission)

3 Optisch parametrischer Oszilla-tor in weltraumtauglicher Aufbautechnik

## ANWENDUNGSBEREICH

Neben Kohlendioxid trägt das langlebige Molekül Methan wirksam zum Treibhauseffekt und zur Erderwärmung bei. Die Methan-Konzentration in der Atmosphäre steigt dabei seit vielen Jahren deutlich an. Für den effizienten Klimaschutz gilt es nun, die Methan-Quellen zu identifizieren und die Emissionen zukünftig möglichst zu reduzieren.

Vor diesem Hintergrund wurde 2010 die deutsch-französische Klimaforschungsmission MERLIN (Methane Remote Sensing LIDAR-Mission) beschlossen. Der Kleinsatellit MERLIN soll voraussichtlich 2024 starten und das Methan in der Erdatmosphäre kartieren. Die Wissenschaftler wollen verstehen, in welchen Regionen Methan in die Atmosphäre eingebracht und wo es abgebaut wird. Kernstück des Satelliten ist ein Licht-Radar-System (LIDAR), das Lichtpulse in die Atmosphäre schickt und aus dem vom Erdboden zurückgestreuten Licht die Methankonzentration bestimmt.

Mit nationalen und internationalen Partnern wie ESA, DLR, Airbus Defence and Space, Safran-REOSC, TESAT Spacecom, von Hörner & Sulger und Space-Tech entwickelt das Fraunhofer ILT seit vielen Jahren Technologien für weltraumtaugliche Laser. Eine besondere Aufgabe liegt in der Entwicklung des Lasersystems für die MERLIN-Mission. Die Anforderungen sind dabei extrem hoch: Das System muss hohe Vibrations- sowie Temperaturbeständigkeiten aufweisen und über Jahre wartungsfrei im All arbeiten. Mit neuen optomechanischen Aufbautechnologien lassen sich die Komponenten dazu präzise und stabil in die Laserstrahlquelle integrieren.

Optische Spektrometer für Methanmessungen benötigen die Sonnenstrahlung. Mit dem MERLIN-LIDAR können die Werte dagegen unabhängig vom Sonnenlicht und somit auch auf der Nachtseite der Erde gemessen werden, zudem sind Messungen in kleinräumigen Wolkenlücken möglich. Die entwickelten Lasersysteme und Aufbautechnologien leisten damit einen wichtigen Beitrag zu Klimaforschung und Umweltschutz.

## TECHNOLOGIE

Lasertechnik für Weltraum-Missionen: Mit dem „Future Laser System“ (FULAS) entwickelte das Fraunhofer ILT gemeinsam mit Airbus Defence and Space im Auftrag der europäischen Raumfahrtagentur ESA und mit Unterstützung des DLR Raumfahrtmanagements eine Technologieplattform zur Auslegung und zum Aufbau von individuellen Lasersystemen. Durch Fertigungsprozesse, wie spezielle Lötverfahren, werden Komponenten dabei raumfahrttauglich gemacht. Eine entsprechend entwickelte Aufbautechnologie erlaubt die präzise, sichere und effiziente Montage.

Im Rahmen der MERLIN-Mission wird ein LIDAR-System eingesetzt, das auf der FULAS-Plattform basiert. Die Anforderungen an das System, das viele Jahre zuverlässig und wartungsfrei im Weltall funktionieren soll, sind extrem hoch. Es muss Vibrationen bis 25 grms genauso aushalten wie thermische Wechsellasten von –30 °C bis +50 °C. Zudem sollen organische Materialien wie Klebstoffe vermieden werden, da diese ausgasen und hochreine Spiegelflächen verunreinigen können.

Der LIDAR-Laser setzt sich zusammen aus einem Laser-Oszillator mit aktiver Längenregelung, einem INNOSLAB-Verstärker und einem längengeregelten Frequenzkonverter. Die erzeugte Strahlung muss in der Wellenlänge schaltbar und bandbreitenlimitiert sein, die Effizienz bei geringer Belastung der optischen Komponenten möglichst hoch. Für den Betrieb soll das System 9 mJ-Doppelpulse bei zwei Wellenlängen um 1645 nm liefern, von denen einer stets auf eine charakteristische Methan-Absorptionslinie eingestellt wird.

Das MERLIN-Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi gefördert, Projektträger ist das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft-und Raumfahrt DLR.

## NACHHALTIGKEIT

Die globale Erwärmung hat negative Auswirkungen auf Klima und Vegetation und es besteht dringender Handlungsbedarf. Der Treibhauseffekt wird dabei durch langlebige Gase wie Kohlendioxid und Methan verstärkt, die fortlaufend reduziert werden müssen. Satellitengestützte, robust ausgelegte Lasermesssysteme erfüllen die extremen Anforderungen für einen langjährigen Einsatz im Weltall und ermöglichen eine präzise Analyse der Quellen und Senken klimaschädlicher Gase. Mit der Methan-Kartierung der Atmosphäre leistet das Projekt MERLIN einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Ursachen des Klimawandels.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Hans-Dieter Hoffmann | hansdieter.hoffmann@ilt.fraunhofer.de

# Erdbeobachtungssatellit mit optischen Hochleistungsgittern im All

Der Erdbeobachtungssatellit Sentinel-5P der Europäischen Weltraumorganisation ESA, der Teil des Copernicus-Programms ist, misst einmal am Tag die Oberfläche unseres Planeten. Die Daten sollen hauptsächlich dem Umweltschutz und der Luftreinhaltung dienen.

Sentinel-5P ist einer von insgesamt sechs Satelliten des von der EU geförderten Copernicus-Programms der ESA

## ANWENDUNGSBEREICH

Am 13. Oktober 2017 um 10:27 Uhr Mitteleuropäischer Zeit startete in Nordrussland der neue Erdbeobachtungssatellit Sentinel-5P der Europäischen Weltraumorganisation ESA ins All. Sentinel-5P ist einer von insgesamt sechs Satelliten des von der EU geförderten Copernicus-Programms. Die Daten dieses Wächtersatelliten, der einmal am Tag die komplette Oberfläche unseres Planeten vermisst, sollen hauptsächlich dem Umweltschutz und der Luftreinhaltung dienen. Sentinel-5P erforscht die Erdatmosphäre und ermittelt unter anderem den Gehalt von Spurengasen wie Ozon oder Methan, welche die Luft und das Klima auf der Erde beeinflussen.

Der 820 Kilogramm schwere Satellit ist mit dem hochmodernen Messinstrument Tropomi ausgerüstet. Das in den Niederlanden von Airbus Defence and Space Netherlands und TNO hergestellte Instrument beinhaltet mehrere Spektrometer, von denen zwei mit ZEISS Optik ausgestattet sind. Da jedes Gas typische Absorptionen an spezifischen Wellenlängen liefert, ist mit Tropomi gut zu erkennen, wo welche Gase in welcher Konzentration in der Luft auftreten. ZEISS hat diese hochwertigen diffraktiven Gitter für Tropomi entwickelt und hergestellt.

Der gestartete Satellit Sentinel-5P ist ein Vorläufermodell: Er soll den Übergang zwischen den bisherigen Missionen und der endgültigen Sentinel-5-Mission überbrücken, die ab 2021 startet. Das „P“ steht für „precursor“, was im Deutschen „Vorläufer“ bedeutet.

Bis zum Jahr 2030 sollen innerhalb des Copernicus-Projekts weitere Satelliten starten. Am 3. April 2014 war der erste Wächter, Sentinel 1A, gestartet.

## TECHNOLOGIE

Das Kernelement der Spektrometer sind optische Gitter, die sich durch hohe Effizienz, geringe Polarisationsempfindlichkeit und hervorragende Abbildungseigenschaften auszeichnen. Die von Linsen und Spiegeln bekannten geringen Wellenfrontfehler müssen auch vom Gitter gewährleistet werden, um die hohe Gesamtperformance des Spektrometers zu erfüllen.

Bei ZEISS werden diese Gitter mit Hilfe der holografischen Interferenz-Lithografie erzeugt. Der anschließende Übertrag des Gitterprofils durch chemisches Ätzen erzeugt monolithische Gitter, die die Anforderungen für einen Einsatz im Weltraum erfüllen. Es können so Gitter für eine Anwendung vom tiefen UV über den sichtbaren Wellenlängenbereich bis hin zum Infrarot gefertigt werden.

## NACHHALTIGKEIT

Laut Deutschem Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) können Umwelt- und Klimaforscher anhand der hochgenauen Daten Simulationsmodelle verbessern und präzisere Vorhersagen treffen. Auch Smartphone-Apps und Internetdienste mit Informationen zur Luftqualität oder Biowetter profitieren künftig von den Daten. Detaillierte tagesaktuelle Informationen, wie etwa die örtliche Ozonbelastung, können damit wertvolle Hinweise für den Alltag liefern.
Die Weltgesundheitsorganisation WHO zählt Luftverschmutzung inzwischen zu den größten Umweltrisiken weltweit.

**Carl Zeiss AG**
Gudrun Vogel | gudrun.vogel@zeiss.com

ANWENDUNGSBEISPIELE

# STADTENTWICKLUNG

# Ökologische Nachhaltigkeit durch Photonik in der Stadtentwicklung

Die urbanisierte Gesamtfläche und die Anzahl der in Städten lebenden Menschen nehmen kontinuierlich zu. Die OECD spricht von einem Jahrhundert der Metropolen und berichtet, dass bereits heute über die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten lebt. 2100 soll dieser Anteil bei 85 Prozent liegen. Damit wird sich die Stadtbevölkerung im Verlauf von nur 150 Jahren von weniger als einer Milliarde im Jahr 1950 auf neun Milliarden im Jahr 2100 erhöhen.

Die daraus resultierenden Herausforderungen sind enorm, bieten aber gleichzeitig in vielen unterschiedlichen Bereichen Ansatzpunkte und Chancen für die Lösungen der Photonik.

Um den Verkehrskollaps in Ballungszentren abzuwenden und die Umweltbelastung durch urbane Mobilität auf ein Minimum zu reduzieren, bedarf es neben stimmiger multimodaler Verkehrskonzepte innovativer Lösungen für die Mobilität von morgen. Der Einsatz von Lasern und Kameras zum Monitoring der Verkehrsinfrastruktur ermöglicht Messungen im fließenden Verkehr und kann in Zukunft dazu beitragen, Staus zu verringern.[1]

Wasserwerke setzen verstärkt UV-Licht ein, um am Ende der Trinkwasseraufbereitung verbliebene Mikroorganismen zu deaktivieren und die Verbreitung von Infektionen schnell und sicher zu verhindern. Das umweltfreundliche Desinfektions-Verfahren ersetzt dabei oftmals das chemische Desinfektionsmittel Chlordioxid. An Lösungen zur Beseitigung von Arzneimittelrückständen mittels eines UV-Lichtreaktors oder zum Abbau von Pharmarückständen, Zyaniden und Pestiziden durch Plasmaverfahren wird geforscht.[2]

Ein weiteres wichtiges Thema ist die Beleuchtung des öffentlichen Raums. Immer mehr Städte setzen auf energieeffiziente LED-Technologie, etwa in der Straßenbeleuchtung oder in öffentlichen Bauten. Das sich daraus ergebende Einsparpotenzial ist beindruckend. Doch das ist nur der erste Schritt in Richtung Smart Cities und Smart Lighting. Vernetzte, digital gesteuerte LED-Systeme ermöglichen eine bedarfsgerechte Beleuchtung: Wenn niemand unterwegs ist, wird das Licht gedimmt. An Fest- oder Markttagen, beim Einsatz von Polizei und Rettungskräften, in bestimmten Verkehrssituationen oder unter bestimmten Wetterbedingungen erfolgt eine hellere Ausleuchtung. So lassen sich einzelne Lichter oder die Beleuchtung ganzer Straßenzüge regulieren. Das ist ganz im Sinne eines verantwortungsvollen Einsatzes von Licht, bei dem die Lichtmenge, Lichtlenkung und Lichtfarbe optimal an den jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden.

Auch die Erschließung des Solarpotenzials von Großstädten spielt eine wichtige Rolle bei der nachhaltigen Stadtentwicklung. So könnten beispielsweise laut einer aktuellen Studie auf Berliner Gebäuden sechs bis zehn Gigawatt Photovoltaikleistung installiert werden. Mehr als genug, um 25 Prozent der Berliner Stromversorgung durch Solarenergie zu decken.[3]

**ANWENDUNGSBEISPIELE**

Photonik-Lösungen vieler unterschiedlicher Anwendungsbereiche können bei der Stadtentwicklung ihr Potenzial entfalten, so zum Beispiel:

Bereich Umwelt → **Seite 32**

Bereich Mobilität → **Seite 48**

Bereich Energieerzeugung und -speicherung → **Seite 62**

1 z. B. Projekt 3D-AI des Fraunhofer IPM in Freiburg: www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/objekterfassung-laserscanning/anw/kognitive-dateninterpretation/verkehrsinfrastruktur.html (10.4.2019)

2 s. bspw. Pressemitteilung der Fachhochschule Münster vom 5.6.2018, www.fh-muenster.de/hochschule/aktuelles/pressemitteilungen.php?pmid=7497

3 „Das Berliner Solarpotenzial", Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 3/2019

ANWENDUNGSBEISPIELE

# MOBILITÄT

# Ökologische Nachhaltigkeit durch Photonik im Bereich Mobilität

Wirtschaftliches Wachstum und technologische Entwicklungen beschleunigen den Trend zu einer immer mobileren Gesellschaft. Mit dem Klimaschutzplan 2050 hat Deutschland eine langfristige Strategie mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität beschlossen. Ein Schlüssel für mehr Klimaschutz ist die Elektromobilität in Kombination mit regenerativ erzeugtem Strom, der die Umwelt von Lärm und Kohlendioxidausstoß entlastet. Vor allem innovative Batterietechnologien, Leistungselektronik und Leichtbaukonzepte stehen im Vordergrund aktueller Entwicklungen in der Industrie.

Für das Erreichen der ambitionierten Ziele ist der Lasereinsatz unverzichtbar. Mit optischen Technologien lassen sich effizientere Fertigungsverfahren für Leichtbaukonzepte, Elektronik und Energiespeichersysteme für die zwangsläufig neu entstehenden Märkte realisieren. Laserbasierte Füge- und Trennverfahren oder Technologien der Oberflächentechnik lassen sich flexibel an Bearbeitungssituationen adaptieren, arbeiten dank der Berührungslosigkeit nahezu verschleißfrei und ermöglichen die effizientere Nutzung von Energie und Werkstoffen. Dank des Lasereinsatzes kann zudem vielerorts auf giftige Chemikalien, beispielsweise in der Oberflächenveredelung, verzichtet werden.

In der Karosserietechnik und beim Fahrwerkbau spielen Leichtbaukonzepte eine wichtige Rolle. Es gilt hier, Gewicht und Verbrauch – insbesondere bei Hybrid-Fahrzeugen – weiter zu reduzieren. So werden für den Leichtbau Fertigungsverfahren entwickelt, wie beispielsweise das Schweißen von ultrahochfesten Stählen und Verbundwerkstoffen, das lasergestützte lokale Enthärten von kaltgepressten Stählen zur Optimierung der Umformtechnik, das Schneiden von CFK-Bauteilen oder das Fügen von artungleichen Leichtbauwerkstoffen.

In der Flugzeugindustrie bietet der Turbinenbau viele Ansätze für technische Optimierung und Kostenersparnis. Das Laserauftragschweißen ermöglicht schon heute eine effiziente Reparatur abgenutzter Turbinenteile. Neuartiges Turbinendesign, leichtere Turbinenschaufeln, optimierte Kühlung und günstige Reparaturverfahren sind Aspekte einer laserbasierten Fertigung, die der Umwelt zugutekommen.

Neue Designs und neue Funktionalitäten von Komponenten für die Mobilität der Zukunft bieten die Chance, hinsichtlich Produktivität, Qualität und Designfreiheit effektive und effiziente Produktionsverfahren zu gestalten. Die Ausschöpfung der Flexibilität und Wirkung phonischer Fertigungsverfahren und deren gezielter Einsatz in der Industrie sichert den Akteuren hohe Marktanteile.

**ANWENDUNGSBEISPIELE**


Effiziente Turbomaschinen für die Flugzeugtechnik durch laserbasierte Verfahren → **Seite 50**

Lasertechnik im Leichtbau → **Seite 52**

Extremer Leichtbau für optische und mechanische Komponenten durch Additive Fertigung → **Seite 54**

Laserverfahren für Hochleistungsbatterien im Automobilbau → **Seite 56**

Erhalt von Verkehrsinfrastrukturen durch Laserscanning zum Monitoring von Großstrukturen → **Seite 58**

Laserspektroskopie zur Abgasmesstechnik → **Seite 60**

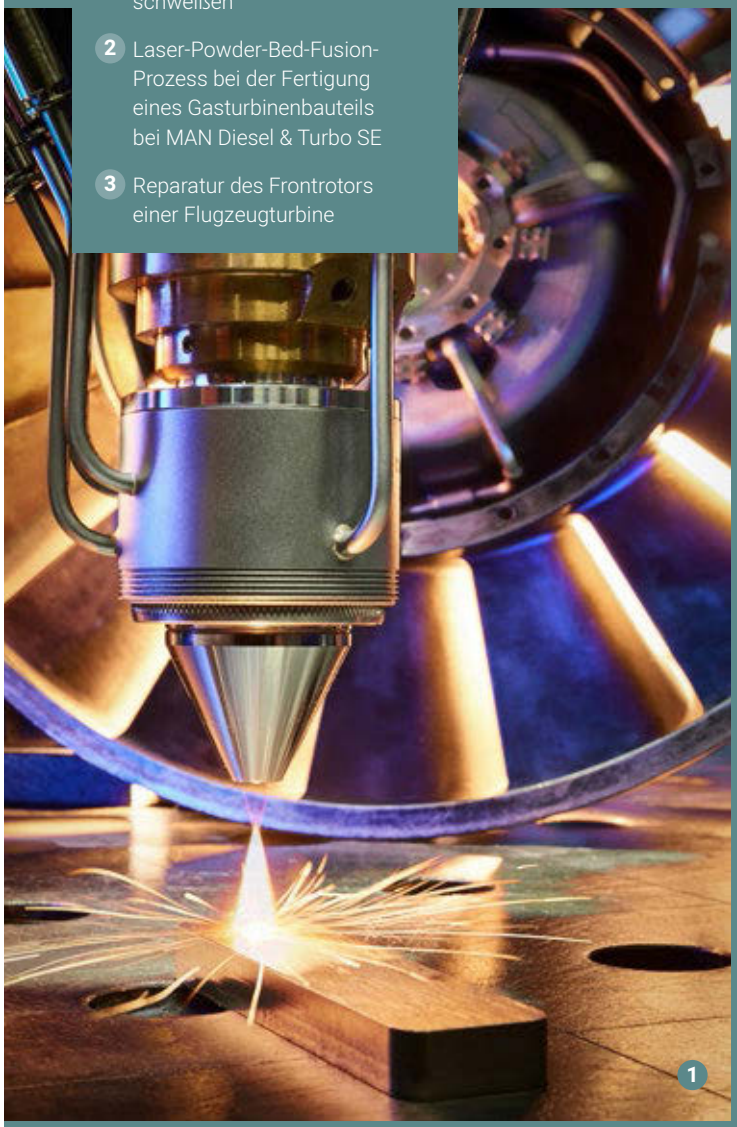
# Effiziente Turbomaschinen für die Flugzeugtechnik durch laserbasierte Verfahren

Ressourcenschonende Produktion und Instandsetzung im Turbinenbau: Mit laserbasierten Verfahren wie dem Laserauftragschweißen oder dem Laser Powder Bed Fusion (LPBF) lassen sich hochqualitative Turbomaschinenbauteile ressourcenschonend reparieren, modifizieren oder additiv fertigen.

1 Pulverbasiertes Laserauftragschweißen

2 Laser-Powder-Bed-Fusion-Prozess bei der Fertigung eines Gasturbinenbauteils bei MAN Diesel & Turbo SE

3 Reparatur des Frontrotors einer Flugzeugturbine



## ANWENDUNGSBEREICH

Mit der zunehmend mobileren Gesellschaft steigt die Anzahl der Flugpassagiere rasant an, gleichzeitig gilt es, in der Flugzeugtechnik Gewicht, Treibstoff und umweltschädliche Emissionen signifikant zu reduzieren. Damit ergeben sich direkte Konsequenzen für die Produktion, Wartung und Instandsetzung von Triebwerken, die durch den Einsatz der Lasertechnik ressourcenschonender und effizienter gefertigt oder repariert werden können.

Flugzeugturbinen unterliegen hohen mechanischen und thermischen Belastungen. Die Instandsetzung der Bauteile erfordert häufig die Wiederherstellung von verschlissenen Bereichen. Hier sind angepasste Prozessketten erforderlich, in denen Bauteile vorbereitet, digitalisiert, zerspant, auftraggeschweißt, wärmebehandelt und final bearbeitet werden. Konventionelle Schweiß- oder thermische Spritzverfahren bringen häufig Nachteile mit sich, wie zu hohe Energieeinträge und Verzüge in den Bauteilen oder mangelnde Schichthaftung.

Durch die hervorragende Steuerbarkeit des Energieeintrages eignen sich Laser besonders für das Auftragen von Material auf hochempfindlichen Komponenten. Die Zusatzwerkstoffe werden beim Laserauftragschweißen draht- oder pulverförmig zugeführt, mit dem Laser aufgeschmolzen und schmelzmetallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden. Für die additive Fertigung funktionsintegrierter Turbomaschinen-Komponenten eignet sich insbesondere das Laser-Powder-Bed-Fusion-Verfahren. Unterschiedliche Geometrieklassen lassen sich damit in konstanter Qualität und reproduzierbar herstellen.

Das „International Center for Turbomachinery Manufacturing – ICTM“ in Aachen widmet sich aktuellen Herausforderungen im Bereich des Turbomaschinenbaus. Die Fraunhofer-Institute für Produktionstechnologie IPT und für Lasertechnik ILT sowie das Werkzeugmaschinenlabor WZL und der Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP der RWTH Aachen bündeln dabei ihr Know-how für nachhaltige Lösungen und arbeiten mit renommierten Industriepartnern zusammen.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Sebastian Bremen | sebastian.bremen@ilt.fraunhofer.de
Dr. Andres Gasser | andres.gasser@ilt.fraunhofer.de
Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de

## TECHNOLOGIE

Bei der Produktion und Instandsetzung von Turbomaschinen stehen Prozesse im Vordergrund, die speziell an die Bauteilgeometrien und Werkstoffe angepasst sind. Das Laserauftragschweißen ermöglicht es, materialschonend und mit hoher Präzision Material auf hochwertige Komponenten aufzutragen. Zum Einsatz kommen modulare Pulver- und Schutzgaszufuhrdüsen für eine effiziente Pulverzufuhr sowie weitere Komponenten wie eine koaxiale Drahtzufuhr, die ein richtungsunabhängiges Laserauftragschweißen ermöglichen.

Bei der Herstellung von Turbinenkomponenten erlaubt das Laser Powder Bed Fusion eine nahezu unbegrenzte Geometriefreiheit sowie die Herstellung von monolithischen Komponenten, die bisher aus mehreren Teilen gefertigt wurden. Verschiedene Geometrien führen dabei zu unterschiedlichen Wärmeableitungsbedingungen, woraus sich Herausforderungen für die Herstellung einer konstanten Bauteilqualität ergeben. Sechs Fraunhofer-Institute entwickeln im Leitprojekt „futureAM“ unter anderem Systemtechniken und Prozessführungsstrategien, die eine zeitliche und örtliche Steuerbarkeit des Energieeintrages im LPBF-Prozess ermöglichen. Dadurch können unterschiedliche Geometrieklassen in konstanter Qualität und reproduzierbar gefertigt werden.

Die Erfassung der Betriebszustände einer Turbine ist ein kritischer Erfolgsfaktor für die optimale Parameter-Konfiguration und die Nutzung der maximalen Lebensdauer hoch belasteter Komponenten. Mit dem Laser Powder Bed Fusion lassen sich dafür sowohl eingebettete als auch applizierte Sensorik-Elemente in Komponenten integrieren.

## NACHHALTIGKEIT

Als flexibles und präzises Werkzeug eignet sich der Laser für die Reparatur und Instandsetzung hochwertiger Turbomaschinenkomponenten, beispielsweise um deren Lebensdauer signifikant zu verlängern oder Materialien vor Verschleiß und Korrosion zu schützen. Mit additiven Verfahren wie dem Laserauftragschweißen und dem Laser Powder Bed Fusion lassen sich Turbinenbauteile ressourcenschonend und wirtschaftlich reparieren und fertigen. Laserverfahren tragen hier zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Einsparung von Gewicht, Kraftstoff und Emissionen bei.

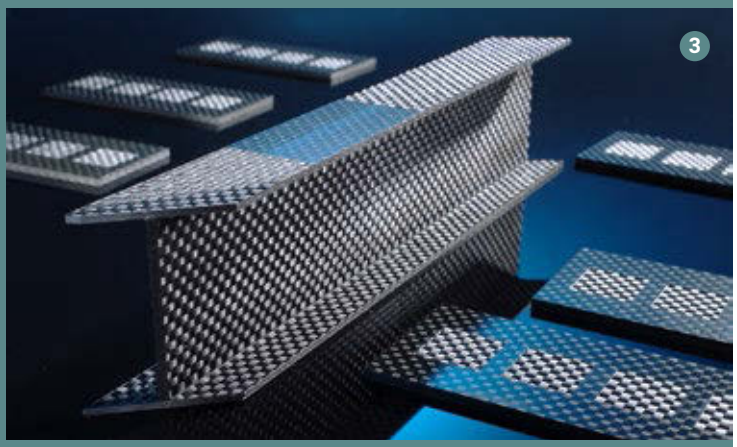
# Lasertechnik im Leichtbau

Für den automobilen Leichtbau kommen neben hochfesten metallischen Werkstoffen zunehmend Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz.
Für eine prozesszeitreduzierende und damit nachhaltige Fertigung dieser neuartigen Werkstoffe bietet die Lasertechnik leistungsfähige Verfahren.

1 Automobilfertigungsprozess

2 Besäumen eines PKW-Dachspiegels aus glas- und carbonfaserverstärktem Kunststoff

3 Mittels Laser entschichtete Bauteile aus CFK



## ANWENDUNGSBEREICH

Faserverbundwerkstoffe sind für den automobilen Leichtbau unverzichtbarer Bestandteil moderner Konstruktionsprinzipien. Lastangepasste Auslegungen der Bauteile mit anisotropen Strukturen und Kombinationen mit hochfesten metallischen Werkstoffen ermöglichen Gewichtsreduzierungen bis zu 30 Prozent, die vor allem in der Elektromobilität eine wichtige Rolle spielen. Entweder ermöglichen sie größere Batterien oder, bei gleichem Batterie-Bauraum, größere Reichweiten. Duroplastische und thermoplastische Faserverbundwerkstoffe bieten ein hohes Potenzial für extreme Leichtbaukonstruktionen. Allerdings sind für die großserientaugliche Anwendung geringe Herstellungskosten und kurze Zykluszeiten vorrangige Ziele.

Aufgrund der Flexibilität, der Verschleißfreiheit und der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit ist der Laser hier das ideale Werkzeug. Dabei sind Verfahren gefordert, die spezifische Eigenschaften der Werkstoffe nicht verändern und deren Vorteile optimal erhalten.

Durch die hervorragende zeitliche und örtliche Steuerbarkeit reduziert das Laserschneiden die Bearbeitungszeiten und ermöglicht die automatisierte Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen (FVK). Dies gilt für verschiedenste Prozesse – vom Schneiden von Prepregs, Tapes und Organoblechen bis zum Besäumen und Schneiden von FVK-Komponenten.

Hochgeschwindigkeitsprozesse oder der Einsatz kurzgepulster Laserstrahlung sorgen dafür, dass trotz unterschiedlicher Absorption, Wärmeleitung, Schmelz- und Zersetzungstemperaturen von Faser und Matrix Schäden an der Schnittkante auf ein Minimum reduziert werden.

Auch für Kunststoff-Metall-Verbindungen mit hohem Leichtbaupotenzial bietet die Lasertechnik geeignete Lösungen. Durch eine Hochgeschwindigkeits-Lasermikrostrukturierung werden Hinterschnitte und schwammartige, poröse Oberflächen erzeugt. Anschließend lassen sich Matrixwerkstoffe der Faserverbünde mit diesen Strukturen verbinden. Mit einer belastungsgerechten Auslegung von Ausrichtung, Form und Anzahl der Strukturen ergibt sich eine große Bandbreite an möglichen Hybridstrukturen für viele Werkstoffkombinationen.

## TECHNOLOGIE

Effizientere Prozessketten für Faserverbundbauteile:
Die Lasertechnik bietet für die Leichtbautechnik eine Vielzahl technischer Lösungen mit einem hohen Energieeinsparpotenzial und neuen Verfahren für die Reduzierung von Prozesszeiten und die Verkürzung von Prozessketten. Da Faserverbundwerkstoffe stanztechnisch nur bedingt verarbeitet werden können, sind Hochgeschwindigkeitsverfahren zum Konfektionieren und zur Montage gefragt. Durch den Einsatz von Hochleistungsfaserlasern und Ultrakurzpulslasern kann der Verbundwerkstoff trotz seiner sehr inhomogenen thermischen Eigenschaften ohne Qualitätseinbußen bearbeitet werden. Mittels Multipass-Strukturierung wird die thermische Last auf dem Werkstoff so reduziert, dass eine Materialverdampfung ohne thermischen Einfluss erreicht werden kann. Wärmeeinflusszonen von unter 100 µm sind auf diese Weise möglich. Im Bereich der Verbindungstechnik von Faserverbundbauteilen und Metallen erfolgt die Verbindung durch einen mechanischen Formschluss, bei dem Matrix-Material und Faseranteile durch Anschmelzen in zuvor mit dem Laser eingebrachte Strukturen im metallischen Bauteil eingebracht werden. Hierdurch kann eine Hybridverbindung ohne den Einsatz von Klebstoff realisiert werden, die Festigkeiten ähnlich zu denen bei polymeren Matrixwerkstoffen bietet.

## NACHHALTIGKEIT

Die Gewichtsreduzierung von automobilen Komponenten ist eine Kernaufgabe der Ingenieure zur Reduzierung der für Mobilität notwendigen Energie. Insbesondere in der Elektromobilität spielt der Leichtbau eine zentrale Rolle zur Kompensation des Gewichtes der eingesetzten Batterien. Die Herstellung von Faserverbundbauteilen im automobilen Leichtbau mit angepassten Laserverfahren eröffnet vor allem in der Werkzeugtechnik ein enormes Potenzial zur nachhaltigen Fertigung. Dank der verschleißfreien Bearbeitung lassen sich insbesondere bei der Verarbeitung von kohlefaserhaltigen Verbundwerkstoffen bisher übliche Fräswerkzeuge einsparen. Durch die Verwendung von Hochleistungs-Thermoplasten können darüber hinaus energieintensive Duroplast-Fertigungsketten ersetzt werden. Mittels laserunterstütztem Tapelegen lassen sich Bauteile mit ähnlichen Eigenschaften wie duroplastische FVKs erzeugen – mit deutlich verkürzten Prozessketten und geringem Energieaufwand.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Arnold Gillner | arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

# Extremer Leichtbau für optische und mechanische Komponenten durch Additive Fertigung

Additive Fertigung ermöglicht durch hochkomplexe Strukturen ein enormes Leichtbaupotenzial für opto-mechanische Systeme. Dies spart Material, Energie und Treibstoff, wodurch sich $CO_2$-Emissionen in Luft- und Raumfahrt reduzieren lassen.

1

2

3

1 Die Reduktion von Masse in der Raumfahrt durch additive Verfahren bringt enorme Vorteile hinsichtlich des Energie- und Treibstoffverbrauchs.

2 Additiv gefertigtes Spiegelteleskop nach Montage

3 Durch interne Leichtbaustrukturen um 70 Prozent massereduzierte Metalloptik

## ANWENDUNGSBEREICH

Die additive Fertigung generiert Bauteile direkt aus 3D-CAD-Daten. Aus einem feinen Metallpulver können komplizierte Komponenten direkt durch den Einsatz von Lasern erzeugt werden, ohne auf Limitierungen der klassischen spanenden Fertigung Rücksicht nehmen zu müssen. So ist es ist möglich, hochkomplexe und bionische Strukturen herzustellen, die optimal auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden und komplett neue Leichtbau-Desgins zu erdenken. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrt kann durch diese Methode aufgrund einer deulichen Gewichtsersparnis der Energieverbrauch signifikant gesenkt und damit die Umweltbilanz verbessert werden. Anwendungen des Verfahrens bestehen bisher in der Konstruktion und Fertigung von mechanischen Haltestrukturen, Gehäusen sowie Hochleistungsoptiken für Instrumente der Erdbeobachtung. Hier konnten bereits Gewichtsreduzierungen um bis zu 70 Prozent in einer einzelnen Komponente erreicht werden, eine weitere Reduzierung der Gesamtmasse wird angestrebt.

Die Rohstoffeffizienz des Verfahrens ist gegenüber der konventionellen Fertigung deutlich gesteigert. Im Gegensatz zu einer klassisch subtraktiven Bearbeitung, in der aus einem Halbzeug (Platten, Stangen, Quader) durch Zerspanung von bis zu über 90 Prozent und entsprechend anfallendem Abfall ein Bauteil erzeugt wird, generiert die additive Fertigung Komponenten aus Pulver. Der Materialeinsatz ist dadurch wesentlich geringer, des Weiteren wird nicht benötigtes Pulver im Prozess aufgefangen und kann wiederverwendet werden. Im Prozess fällt nahezu kein Abfall an. Die technologisch verfügbaren Metallwerkstoffe für die additive Fertigung umfassen unter anderem die Leichtbaumaterialien Aluminium und Titan.

## TECHNOLOGIE

Die Erzeugung von Bauteilen durch additive Fertigung erfolgt direkt aus einem 3D-CAD-Modell. Dieses wird in Schichten zerlegt, die nacheinander abgearbeitet werden. Der Prozess läuft in einer geschlossenen Maschine durch selektives Aufschmelzen von Metallpulver entsprechend des Querschnitts aus der jeweiligen Schicht und einer anschließenden raschen Erstarrung des verflüssigten Materials ab. Die notwendige Energie zum Aufschmelzen des Pulvers wird durch einen fokussierten Laser- oder Elektronenstrahl in das Pulver eingebracht, die Einzelschichten sind dabei nur wenige Mikrometer dünn.

**Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena**
Enrico Hilpert | enrico.hilpert@iof.fraunhofer.de

Das Verfahren erlaubt es, nahezu beliebige, völlig neuartige Strukturen zu realisieren, auch Hinterschneidungen können erzeugt werden. Dies lässt sich zur Generierung von komplexen Leichtbaustrukturen nutzen, die es ermöglichen, extrem leichte und dennoch steife Bauteile zu fertigen, die durch konventionelle Verfahren unmöglich herzustellen sind. Nach dem Vorbild der Natur sind Geometrien umsetzbar, die in hochbelasteten Bereichen verstärkt sind und die in Bereichen, die für eine Stabilität nicht notwendig sind, Materialeinsparungen ermöglichen. Das fertige Bauteil besitzt bereits endkonturnahe Abmessungen und kann durch anschließende mechanische Fertigung dort weiter bearbeitet werden, wo es erforderlich ist.

## NACHHALTIGKEIT

Die Reduktion von Masse im Transportwesen sowie der Raumfahrt bringt direkte Vorteile hinsichtlich des Energie- und Treibstoffverbrauchs. Beispielsweise entstehen durch den Transport von einem Kilogramm Masse in einen geostationären Orbit Kosten von etwa 10.000 Euro. Die Gesamtmasse an Treibstoff einer Ariane 6-Trägerrakete beläuft sich auf etwa 140 t Festbrennstoff, sowie maximal weitere 170 t Flüssigtreibstoff (Wasserstoff + Sauerstoff). Die maximal zu transportierende Nutzlast (payload) beträgt 11,5 t in einen geostationären Orbit oder beispielsweise 8,4 t für eine Mission zum Mond. Das Verhältnis macht deutlich, wie wertvoll die zur Verfügung stehende Nutzlast ist. Durch eine Massereduktion kann die Anzahl der transportierten Instrumente und Komponenten erhöht und die Zahl der notwendigen Flüge verringert werden.

Der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff für die Raumfahrt stellt momentan eins der effizientesten Verfahren hinsichtlich der spezifischen Energie dar (Energieinhalt pro Gewicht). Dennoch erzeugt die Herstellung einer Tonne an flüssigem Wasserstoff durch das aktuell eingesetzte Dampfreformierungsverfahren etwa 10 t an $CO_2$.

Die Verwendung von Metallpulver als Ausgangsstoff zur Erzeugung von Bauteilen ist vorteilhaft. Es wird nahezu kein Abfall erzeugt, da das Pulver mehrfach wiederverwendet werden kann. Dies wiederum spart Energie im Recycling und bei der Logistik der Werkstoffe.

Massereduzierte optische Instrumente in der Erdbeobachtung liefern hochauflösende Daten für die Klima- und Umweltüberwachung sowie für die Präzisionslandwirtschaft.

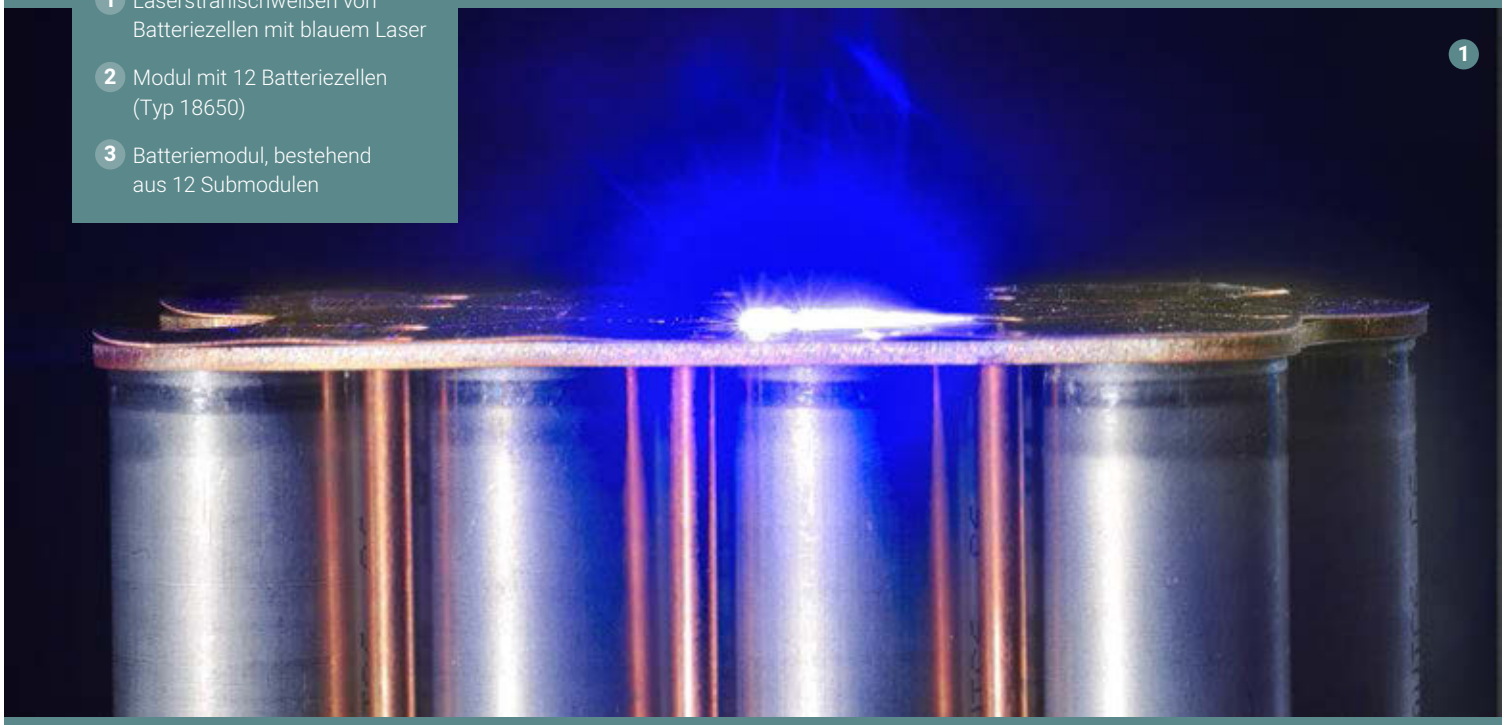
# Laserverfahren für Hochleistungsbatterien im Automobilbau

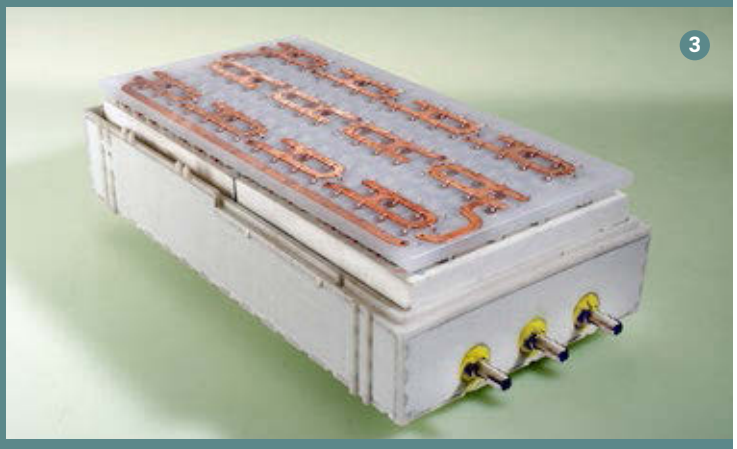
Die zunehmende Elektrifizierung von Automobilen bewirkt einen erhöhten Bedarf an leistungsfähigen Energiespeichersystemen. Für den Aufbau von Batteriemodulen oder -packs verschiedener Bauarten bietet die Lasertechnik leistungsfähige Verfahren mit höchster Prozesssicherheit und Produktivität.

1 Laserstrahlschweißen von Batteriezellen mit blauem Laser

2 Modul mit 12 Batteriezellen (Typ 18650)

3 Batteriemodul, bestehend aus 12 Submodulen





## ANWENDUNGSBEREICH

Die zunehmende Elektrifizierung in der Automobiltechnik bewirkt einen erhöhten Bedarf an leistungsfähigen Energiespeichersystemen in Form von kompakten Batteriemodulen. Die Lasertechnik liefert hier hochproduktive und hochqualitative Verfahren in der gesamten Prozesskette zur Produktion von Energiespeichersystemen – von der Zellfertigung bis hin zur Modul- und Packkontaktierung.

Eine besondere Herausforderung stellt die Aufbau- und Verbindungstechnik für Batteriemodule in der Automobiltechnik dar. Höhere Ströme und Leistungen erfordern größere Anbindungsflächen und -querschnitte zur Reduzierung der Übergangswiderstände. Gleichzeitig müssen die Verbindungen hohen mechanischen und thermischen Ansprüchen genügen, um die entsprechende Langzeitstabilität aufzuweisen. Bislang werden einzelne Batteriezellen mittels Drahtbonden zu sogenannten Packs kontaktiert. Um die hohen Ströme zu gewährleisten sind hier in der Regel multiple Drahtbonds mit entsprechend langen Fertigungszeiten nötig. Kupfer als hochleitender Werkstoff ist für die konventionelle Drahtbondtechnik auf Batteriezellen aufgrund der hohen Andruckkräfte nur bedingt möglich. Größere Leiterquerschnitte im Quadratmillimeter-Bereich, die Strombelastungen von 1000 A und mehr ermöglichen, sind mit konventionellen Verfahren nicht umsetzbar.

Durch den Einsatz von hochbrillanten Faserlasern und einer angepassten Schweißtechnik lassen sich nun elektrische Verbindungen in Batteriemodulen und der Leistungselektronik realisieren, die bisher nicht denkbar waren. Die Photonik liefert hier ein neues Werkzeug, das nicht nur die Leistungsgrenzen signifikant nach oben verschiebt, sondern darüber hinaus auch ein Höchstmaß an Prozesssicherheit garantiert. Insbesondere die Entwicklungen zu Hochleistungslasern mit werkstoffangepassten Wellenlängen im blauen und grünen Spektralbereich erweitern den Einsatzbereich erheblich.

## TECHNOLOGIE

Automobile Energiespeicher auf der Basis von Lithium-Ionen-Batterien basieren auf der Zusammenschaltung einzelner Rund-, Pouch- oder prismatischer Zellen. Auf diese Weise werden Energiewerte von 20-100 kWh pro Batteriepack realisiert. Die Verschaltung erfolgt dabei über kupferbasierte Verbinder, die zunehmend über Laserschweißverfahren kontaktiert werden. Mittels hochbrillanter Faserlaser oder frequenzkonvertierter Scheibenlaser im grünen Spektralbereich lassen sich auch hochreflektive Materialien wie beispielsweise Kupferwerkstoffe miteinander verschweißen.

Mit neuen Entwicklungen wie dem Laserbonden kann diese Technik mit integrierten Bändchenverbindern kombiniert werden, sodass eine kompakte Kontaktierungstechnik für höchste Ströme von über 400 A zur Verfügung steht. Durch schnelle zeitliche und örtliche Modulation der Laserstrahlung lassen sich darüber hinaus auch artungleiche Werkstoffe wie Kupfer und Stahl und bei geeigneter Prozessführung auch Kupfer und Aluminium verbinden. Dadurch entfallen bisherige Multi-Metall-Verbindungswerkstoffe, mit dem Effekt eines sortenreinen Recyclings und einer energieeffizienteren Prozesskette.

## NACHHALTIGKEIT

Die Energiespeichertechnik auf der Basis von Lithium-Ionen-Batterien ist ein zentrales Element der Elektromobilität. Für die Erhöhung der Kundenakzeptanz sind deutliche Kostenreduktionen nötig, die sich unter anderem durch leistungsfähige Fertigungsverfahren erzielen lassen. Die Lasertechnik trägt hier in maßgeblicher Weise zur Realisierung von Hochleistungsbatterien bei, mit denen umweltschonende Elektrofahrzeuge produziert werden können. Mit der Steigerung der Leistungsfähigkeit von Batteriezellen und der Leistungselektronik steigen die Anforderungen an die elektrische Verbindungstechnik, für die die Lasertechnik produktive Lösungen für leichtere und effizientere Batterien liefert.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Arnold Gillner | arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

# Erhalt von Verkehrsinfrastrukturen durch Laserscanning zum Monitoring von Großstrukturen

Optische Messsysteme, die für den mobilen Einsatz auf Schienen- und Straßenfahrzeugen oder Drohnen konzipiert sind, bestimmen mit hoher Geschwindigkeit und hoher Präzision den Zustand von Bauwerken wie z. B. Straßen und Tunneln.

1 Straßenmessfahrzeug zur Vermessung des Straßenzustandes

2 Zur Erfassung von Verkehrsinfrastrukturen werden Laserscanner auf mobilen Plattformen wie z. B. Autos, Drohnen oder Züge montiert

3 Mit Laserscannern bestückter Messzug der Deutschen Bahn

## ANWENDUNGSBEREICH

Infrastrukturobjekte wie Tunnel, Brücken, Straßen oder Bahntrassen werden aus Sicherheitsgründen regelmäßig inspiziert. Aber auch die Bedeutung einer langfristigen Beobachtung natürlicher Großstrukturen wie etwa Dämme, Hänge oder Waldflächen wächst. Regelmäßiges Erfassen ihrer Geometrie kann wertvolle Erkenntnisse über sich abzeichnende Veränderungen liefern und so zum Verständnis der Umwelt beitragen. Einflussfaktoren wie Temperatur und Niederschlag spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Das Hauptziel ist die Erfassung und Interpretation von Veränderungen (z. B. Deformationen) bei Großstrukturen (z. B. Hochhäuser, Brücken, Tunnel etc.). Der Fokus liegt auf Sensor- und Datenfusion, Dateninterpretation (z. B. durch Deep Learning) und Mobile Sensing (z. B. mit Robotern, Drohnen etc.).

4 5 Infrastrukturobjekte wie Tunnel und Brücken werden aus Sicherheitsgründen regelmäßig inspiziert

## TECHNOLOGIE

Die Laserscanner, Beleuchtungs- und Kamerasysteme messen die 3D-Geometrie von Objekten und großen Strukturen dreidimensional mit hoher Präzision. Die Mehrzahl der Systeme nutzt das Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Kombiniert mit einer Scan-Einheit erfassen sie dreidimensionale Objekt-Geometrien schnell und präzise vom Zentimeter- bis in den 100-Meterbereich. Die robusten, augensicheren Systeme werden auf mobilen Plattformen eingesetzt. Für den Einsatz auf Messzügen der Bahn, Fahrzeugen zur Straßenoberflächen-Messung oder Drohnen sind die Systeme sehr robust ausgelegt. Die 3D-Messsysteme umfassen Software zur Dateninterpretation. Zur effizienten Auswertung von 3D-Daten wird verstärkt auf lernfähige Algorithmen gesetzt, die eine automatisierte Interpretation von Messdaten ermöglichen.

## NACHHALTIGKEIT

Infrastrukturen verschlingen in der Erstellung und im Unterhalt Unmengen an Rohstoffen und Energie. Infrastrukturen so zu bauen und zu betreiben, dass mit diesen Ressourcen optimal und effizient umgegangen wird, ist eine Herausforderung. Die gesellschaftliche und technische Entwicklung führt zu immer größeren, vernetzten Infrastrukturen, deren Planung und zuverlässige Steuerung mit einer immer größer werdenden Komplexität einhergeht. Das Erreichen von nachhaltiger Sicherheit und Zuverlässigkeit bzw. Resilienz erfordert den systematischen Einsatz einer Vielzahl an Methoden. Herausfordernd sind insbesondere ihre Kombination, die Optimierung bzw. Minimierung ihres Einsatzes, die fortlaufende Erfassung und Visualisierung und Kommunikation von Ergebnissen über den Zustand und Veränderungen von Infrastukturen.

Dabei ist die Erhebung umfangreicher Daten ebenso von Bedeutung wie die Analyse der zahlreichen Messdaten und Zielvorgaben mithilfe moderner statistischer Auswerteverfahren (Predictive Analytics). Damit werden zuverlässige Vorhersagen ermöglicht und optimale Entscheidungen auch im Sinne eines nachhaltigen Einsatzes der zur Verfügung stehenden Ressourcen herbeigeführt. Beispielsweise können Maßnahmen zum Erhalt von Tunneln, Bahntrassen oder Brücken so frühzeitig geplant und ressourcenschonend durchgeführt werden.

**Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg**
Prof. Dr. Alexander Reiterer | alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de

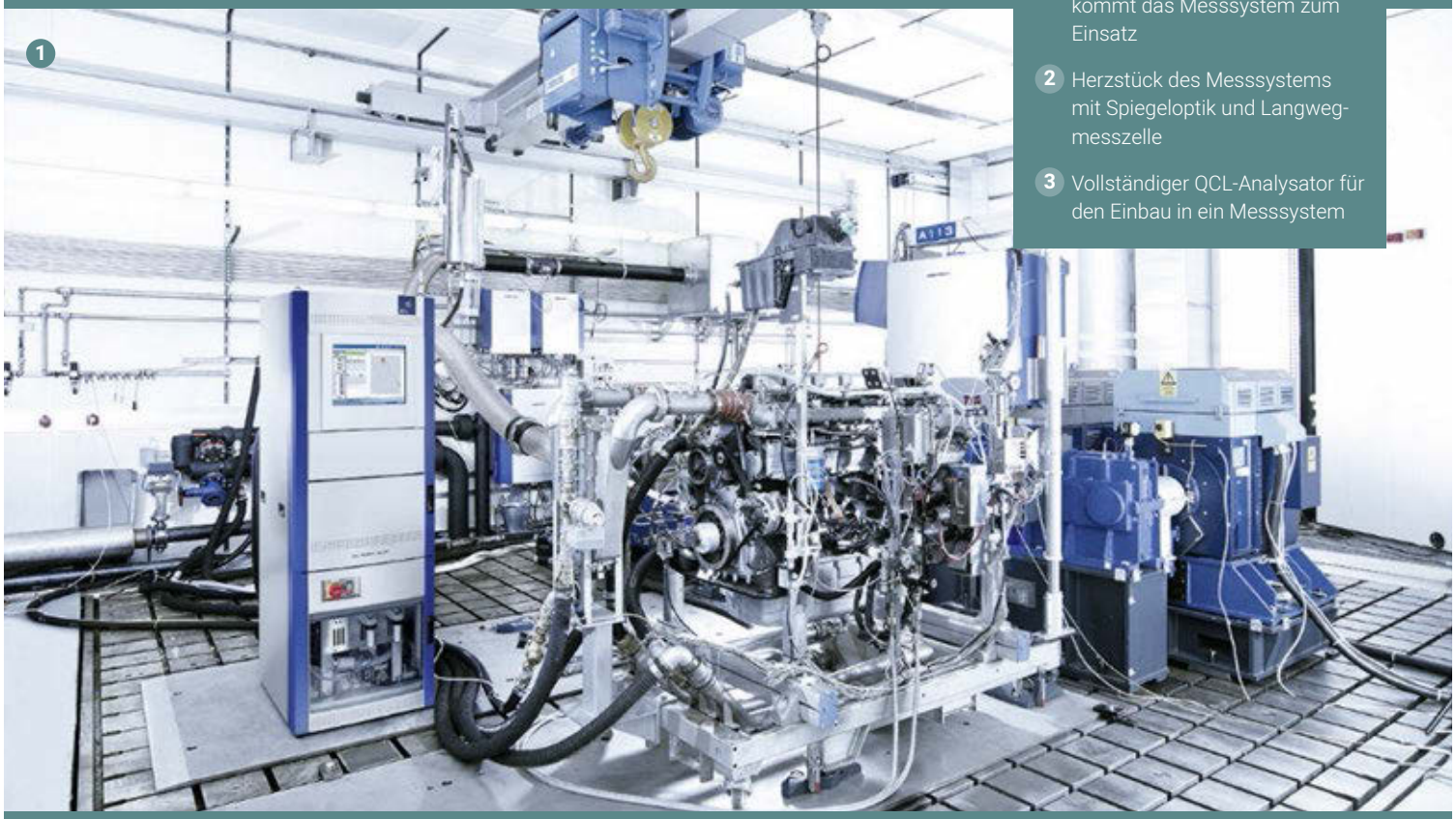
# Laserspektroskopie zur Abgasmesstechnik

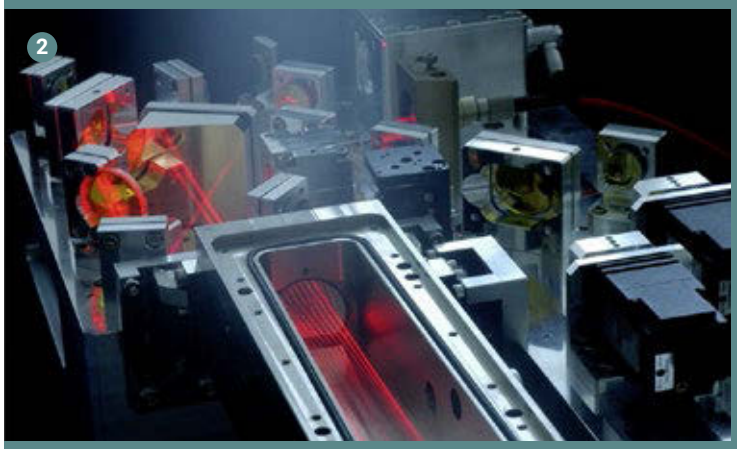
Emissionen nachweisen, um diese kontrolliert senken zu können: Mit der zuverlässigen Abgasmesstechnik lässt sich insbesondere auch das klimaschädliche Lachgas detektieren. Das System basiert auf dem Prinzip der Infrarot-Absorptionsspektroskopie mit Quantenkaskadenlasern als Lichtquelle.

1 In diesem Motorenprüfstand der AVL Emission Test Systems GmbH kommt das Messsystem zum Einsatz

2 Herzstück des Messsystems mit Spiegeloptik und Langwegmesszelle

3 Vollständiger QCL-Analysator für den Einbau in ein Messsystem





## ANWENDUNGSBEREICH

Im Zuge strenger werdender Abgasgesetze wird auch der Anspruch an die Genauigkeit der Messverfahren immer höher: Forderungen nach Nachweisen im Bereich von 10 ppb sind keine Seltenheit mehr (ppb = 1Teil pro Milliarde). Aktuelle Treibhausgas-Regelungen beispielsweise erfordern Messungen von Lachgas ($N_2O$) schon in sehr geringen Konzentrationen von unter 1 ppm (ppm = 1 Teil pro Million). Das Gas, auch als Distickstoffmonoxid bekannt, entsteht hauptsächlich beim Abbau von mineralischem Stickstoffdünger im Boden, aber auch bei der Verbrennung von Treibstoff im Ottomotor. Konventionelle Technologien, die man bisher für Messungen von $N_2O$ eingesetzt hat – wie die nichtdispersive Infrarottechnologie (NDIR) oder elektrochemische Gas-Sensoren – sind entweder nicht empfindlich genug für heutige Messanforderungen oder sie zeigen zu starke Querempfindlichkeiten.

Ein von Fraunhofer IPM gemeinsam mit einem Industriepartner entwickeltes optisches Spektrometer auf Basis von Quantenkaskadenlasern (QCL) ermöglicht nun erstmals eine Abgasmessung, die den gestiegenen Ansprüchen genügt. Das Gasanalysegerät ist in der Lage, Lachgas in sehr niedrigen Konzentrationen – im Bereich von 10 ppb bis 100 ppm (4 Dekaden) – zuverlässig nachzuweisen.

Der dafür eingesetzte QCL-Analysator ist frei von Querempfindlichkeiten zu anderen Komponenten in der Gasmatrix, wie sie im Abgas von Verbrennungsmotoren typischerweise auftreten.

Quantenkaskadenlaser sind Halbleiterlaser für Wellenlängen im mittleren Infrarot (MIR). Anders als andere im MIR emittierende Laser besitzt der QCL eine vergleichsweise hohe Ausgangsleistung und arbeitet auch bei Raumtemperatur – aufwändiges Kühlen, z. B. mit flüssigem Stickstoff, ist nicht mehr erforderlich.

## TECHNOLOGIE

Bei der Entwicklung des $N_2O$-Abgasmesssystems konnte das Fraunhofer IPM auf langjährige Erfahrungen im Bereich der Abgasmesstechnik zurückgreifen. Bereits mit dem QCL-basierten Abgasanalysator DEGAS (Dynamic Exhaust Gas Analyser System) für einen großen Automobilhersteller hat das Fraunhofer IPM im Jahr 2002 ein industrietaugliches Messsystem für den schnellen, empfindlichen und selektiven Nachweis von Kohlenmonoxid, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid entwickelt. Mit DEGAS lässt sich die Konzentration verschiedener Abgaskomponenten simultan mit einer Zeitauflösung von fünf Millisekunden messen und das gleichzeitig an bis zu vier Messstellen am Abgasstrang.

Der jetzt neu entwickelte QCL-Analysator ist für Messschrankapplikationen ausgelegt und daher wesentlich kompakter in der Ausführung. Darüber hinaus soll er in der nächsten Ausbaustufe zwei Gaskomponenten simultan erfassen können. Der QCL-Analysator wird nicht nur bereits in der Forschung und Entwicklung erfolgreich eingesetzt, sondern zunehmend auch für Zertifizierungsmessungen an schadstoffarmen Motoren.

## NACHHALTIGKEIT

Die Treibhauswirksamkeit von Lachgas ist etwa 300-mal so groß wie die von $CO_2$. Auch wenn die Emissionen hauptsächlich aus der Landwirtschaft stammen, ist auch der Ausstoß von Verbrennungsmotoren ein gewichtiger Faktor.

Durch das neue und hochgenaue Messverfahren kann das Verständnis der Prozesse erweitert und so bereits bei der Motorenentwicklung auf eine Verringerung von schädlichen Emissionen hingearbeitet werden.

**Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg**
Dr. Raimund Brunner | raimund.brunner@ipm.fraunhofer.de

ANWENDUNGSBEISPIELE

# ENERGIEERZEUGUNG UND -SPEICHERUNG

# Ökologische Nachhaltigkeit durch Photonik bei Energieerzeugung und -speicherung

Deutschland hat sich mit der Umgestaltung des Energiesystems hohe Ziele gesetzt. Bis zum Jahr 2050 soll nach Angaben der Bundesregierung der Bedarf an Primärenergie nur noch halb so groß sein wie im Jahr 2008. Außerdem soll der Anteil erneuerbarer Energien systematisch auf 60 Prozent des Bruttoendenergieverbrauchs im Jahr 2050 erhöht werden. Dies setzt voraus, dass neben den zahlreichen bautechnischen Erneuerungen, den ressourcenschonenden Wiederverwertungsstrategien und den täglichen Verhaltensweisen der Endverbraucher auch technologische Innovationen zur Erhöhung der Energieeffizienz, zum Einsatz neuer Energiequellen und zum Ausbau von Recyclingmaßnahmen systematisch realisiert werden.

Der Lasertechnik kommt eine Schlüsselrolle zu, wenn es um die Erhöhung des Wirkungsgrades der Energieerzeugung, um die Erhöhung der Produktivität bei der Herstellung von Komponenten zur Energiewandlung oder um eine bessere Selektion von wertvollen Stoffen im Bereich des Recycling geht. Lasertechnik eröffnet in allen energierelevanten Bereichen wie beispielsweise Photovoltaik, Solarthermie, Energiespeichertechnik, Turbinenbau oder Recycling neue Horizonte.

Unverzichtbar ist im zukünftigen Energiemix die Solarenergie, die vor allem durch die Photovoltaik nutzbar gemacht wird. Laserverfahren in hochproduktiven Anlagen ermöglichen die kostengünstige Herstellung qualitativ hochwertiger organischer und anorganischer Solarzellen. Neue Energiespeichersysteme sind im E-Mobility-Bereich gefragt, wo sich Laser in der gesamten Prozesskette der Produktion bewähren, von der effizienten Zellfertigung über leistungsfähige Verschaltungstechnologien bis hin zur Packkontaktierung. Im Bereich der stationären Energieerzeugung lassen sich mit Laserverfahren hochpräzise, temperaturbeständige und langlebige Turbomaschinenbauteile fertigen, optimieren oder reparieren. Bei der Weiterentwicklung der Energieerzeuger-Systeme mit stationären Turbomaschinen stehen vor allem die Steigerung der Effizienz und die Reduktion von $CO_2$-Emissionen im Fokus.

Die Photonik bietet damit vielfältige Lösungen für nachhaltigere Produktionsverfahren im Bereich der Energieerzeugung und -speicherung. Laserverfahren machen die Fertigung präziser und effizienter im Vergleich zu konventionellen Techniken, wobei zunehmende Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit dank skalierbarer, sauberer Prozesse unproblematisch sind. Die Lasertechnik gibt hier wichtige Impulse für die Energiespeicher der nächsten Generation und für die zugehörige innovative Anlagentechnik.

**ANWENDUNGSBEISPIELE**

Lasertechnik in der Photovoltaik: Nachhaltige Stromerzeugung durch effiziente Solarzellen → **Seite 64**

Laserverfahren für nachhaltige Energiespeicher → **Seite 66**

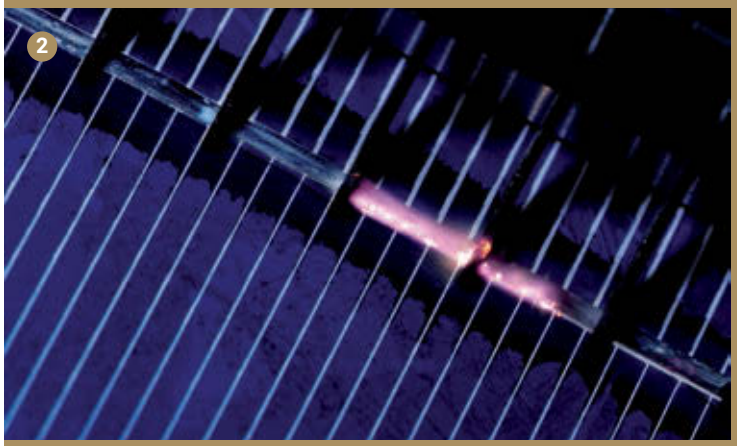
# Lasertechnik in der Photovoltaik: Nachhaltige Stromerzeugung durch effiziente Solarzellen

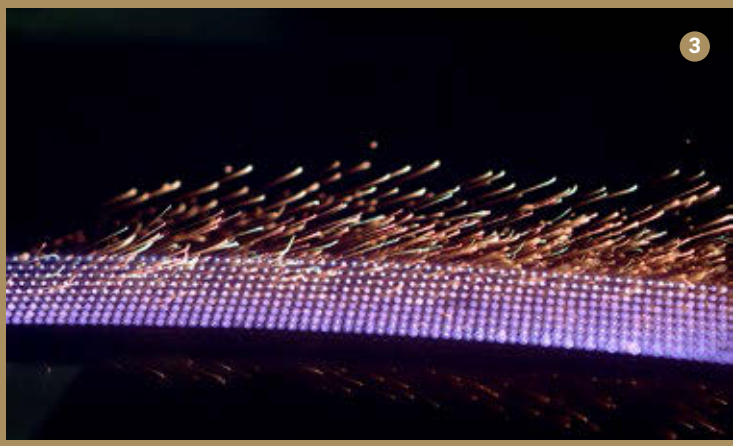
Die Solarenergie stellt im Energiemix bereits heute eine unverzichtbare Größe dar. Um die Konkurrenzfähigkeit von Photovoltaikanlagen gegenüber konventionellen, fossilen Energieträgern zu gewährleisten, werden Laserverfahren eingesetzt, die Produktionskosten für Module reduzieren und Wirkungsgrade der Solarzellen steigern.

1 Photovoltaikanlage

2 Laserlöten zur Verbindung von Solarzellen

3 EWT-Zelle mit Bohrdurchmessern von 50 µm im Abstand von 0,5 mm



## ANWENDUNGSBEREICH

Die Lasertechnik ermöglicht durch die berührungsfreie und thermisch minimierte Bearbeitung eine Vielzahl von Prozessen zur Erhöhung der Effizienz von Solarzellen und Solarmodulen. Insbesondere durch den Einsatz von Ultrakurzpulslasern lassen sich die in der Regel sehr dünnen funktionalen Schichten im Nanometerbereich mit hoher Präzision und Reproduzierbarkeit bearbeiten. Hierzu gehören unter anderem der Abtrag dünner dielektrischer Schichten zur Kontaktöffnung (LCO), z. B. für PERC-, n-PERT- und IBC-Solarzellen, sowie die Ablation von Diffusions- und Ätzbarrieren in Form von dielektrischen Schichten (Siliziumnitrid, Aluminiumoxid, Siliziumoxid). Für die Herstellung neuartiger hocheffizienter Solarzellen mit vollständig einseitiger Kontaktierung kommen Laserverfahren zum Einsatz, bei denen durch Aufschmelzen metallischer bzw. metallhaltiger Schichten und Schichtverbünde eine elektrische (LFC) und/oder mechanische (AMELI) Kontaktierung erfolgt. Angepasste Dotierungsprofile in Solarzellen lassen sich durch Laserbestrahlungen zur Formierung des selektiven Emitters bzw. des Front-Surface-Fields an PERC- und n-PERT-Solarzellen erreichen. Schließlich ermöglichen Laserverfahren das hochflexible Konfektionieren von Solarzellen durch Schneiden, Bohren und Markieren von Silizium, Glas und metallischen Folien.

Neben heute üblichen Silizium-Solarzellen werden – wenn auch in deutlich kleinerem Maßstab – Dünnschicht-Solarzellen hergestellt, die gegenüber den kristallinen Siliziumsystemen einen deutlichen Kostenvorteil bieten. Hier erfolgt die Fertigung der einzelnen streifenförmigen Zellen durch selektiven Abtrag der im Durchlaufverfahren aufgebrachten dünnen Absorber- und Leiterschichten. Neben den CIGS-Zellen werden zunehmend organische Solarzellen und künftig Perovskit-Zellen verwendet, die bei steigender Effizienz nochmals eine deutliche Senkung der Herstellungskosten versprechen.

## TECHNOLOGIE

Durch Laserbearbeitung zur höheren Effizienz für Solarzellen: Die Lasertechnik bietet für die Herstellung von Solarzellen viele technische Lösungen mit einem hohen Energieeinsparpotenzial und neue Verfahren für die Reduzierung von Prozesszeiten und -ketten und sowie die Verbesserung der Produkteigenschaften. In der Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen – wie beispielsweise CIGS-, Perovskit- oder organische Solarzellen – werden die trocken- oder nasschemisch aufgebrachten Schichten mittels selektivem Laserabtrag so strukturiert, dass aus dem flächigen Materialverbund einzelne Zellen entstehen. Hier sind die Berührungslosigkeit, die hohe Intensität und die exakte Steuerbarkeit des Lasers wichtige Kriterien, um eine hohe Reproduzierbarkeit und Qualität beim Abtrag von Schichten mit Dicken von einigen 100 Nanometern zu ermöglichen.

Bei der Kontaktierung von Silizium-Solarzellen kommen selektive Laserabtragverfahren für die Strukturierung nanoskaliger Passivierungslayer zum Einsatz. Um die darunter liegenden Strukturen und die Funktion des Werkstoffs nicht zu schädigen werden hier vor allem Ultrakurzpulslaser verwendet. Alternativ sind selektive schmelztechnische Verfahren nutzbar, bei denen Rückseitenmetallisierungen durch Nanosekunden-Laserpulse mit dem Bulk-Silizium kontaktiert werden. Durch Kurzzeitbestrahlung mit hohen Laserintensitäten lassen sich Leitfähigkeit und Kornstruktur nasschemisch aufgebrachter Funktionsschichten ohne starke Temperatureinwirkung und komplexe Prozessketten signifikant verbessern.

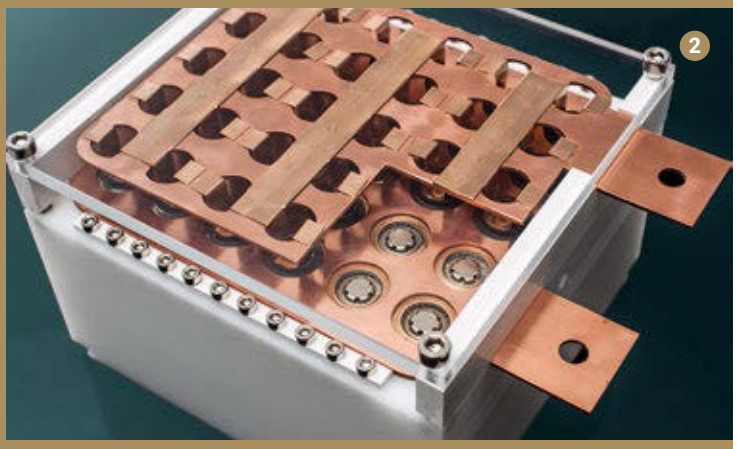
## NACHHALTIGKEIT

Die Photovoltaik ist im Energiemix ein unersetzlicher Bestandteil, der sich nach einer durch Preisdruck geprägten Phase aus Fernost wieder auf einem aufsteigenden Ast befindet. Heute zählen Effizienz und Langlebigkeit mehr denn je als reine Kostenfaktoren. Entsprechend sind neue Verfahren, zu denen die Laserverfahren gehören, zunehmend für die Herstellung effizienter Solarzellen gefragt. Dies gilt vor allem für neue, mittels Beschichtungsverfahren herzustellenden Perovskit-Zellen, bei denen neben den klassischen Verschaltungstechniken auch großflächige, effizienzerhöhende Bestrahlungsverfahren zum Einsatz kommen. Durch kosten- und produktionsmittelsparende Laserverfahren sind hier künftig Wirkungsgrade von über 20 Prozent unter Produktionsbedingungen zu erwarten.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Arnold Gillner | arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de

# Laserverfahren für nachhaltige Energiespeicher

Für wettbewerbsfähige elektrische Energiespeicher müssen die Leistungsfähigkeit von Batteriezellen erhöht und die Produktionskosten signifikant reduziert werden. Für beide Herausforderungen bietet die Photonik Lösungen, mit denen sich Prozesse beschleunigen lassen und der Energieverbrauch gesenkt werden kann.



1 Kupferverbinder, per Laser-Impuls-Schmelz-Bonden (LIMBO) auf Metallisierung kontaktiert

2 Lasergefügtes Batteriemodul aus Batteriezellen des Typs 18650

3 Batteriezellen

## ANWENDUNGSBEREICH

Lithium-Ionen-Batterien als aktuell leistungsfähigste Energiespeicher bestehen aus stromleitenden Schichten und aktiven Materialien auf Kathoden- und Anodenseite. Für eine kostengünstige Produktion werden die aktiven Schichten großflächig auf stromleitende Kupfer- und Aluminiumbänder aufgetragen und anschließend über mehrere Prozessschritte konditioniert und konfektioniert. Die Substitution konventioneller Ofenprozesse durch innovative Laserverfahren stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Mit laserbasierten Trocknungs- und Konditionierungsschritten kann die Leistungsfähigkeit einer Lithium-Ionen-Zelle künftig deutlich erhöht werden. Darüber hinaus bieten die Trocknung und Sinterung von Batterieelektrodenschichten mittels Laserverfahren neue Möglichkeiten der Elektrodenherstellung, insbesondere für Feststoffbatterien.

Für die notwendigen Konfektionierungsschritte einer Lithium-Ionen-Zelle lassen sich Hochgeschwindigkeits-Laserverfahren zum Schneiden und Strukturieren einsetzen, die konventionelle Stanzwerkzeuge überflüssig machen und die Flexibilität deutlich erhöhen. Mit dem präzisen Abtrag aktiver Schichten aus der Elektrode ohne Beeinflussung des aktiven Schichtmaterials können bisherige Maskierungsschritte ersetzt und gleichzeitig eine hohe Designflexibilität erzielt werden. Durch Laserschneidprozesse, welche die beschichteten Batteriefolien kurzschlussfrei vereinzeln, wird eine maximale Ausbeute an Batteriezellen erreicht.

Die Herstellung von Batteriemodulen und Batteriesystemen erfordert leistungsfähige Montage- und Fügeverfahren, die ein Höchstmaß an Prozesssicherheit bieten und für die hohen übertragbaren Leistungen geeignet sind. So wird beim Fügen von Batteriezellen vor allem das Laserstrahlmikroschweißen eingesetzt, mit dem unterschiedliche Anbindungsgeometrien, Stromtragfähigkeiten und Durchmischungsverhältnisse realisiert werden können. Unterschiedliche Materialien, von Aluminium-Kupfer bis hin zu Kupfer-Stahlverbindungen, lassen sich damit reproduzierbar fügen. Das Verfahren eignet sich sowohl zur Herstellung von elektrisch und mechanisch sicheren Verbindungen von Zelle zu Zelle als auch zur Fertigung von Modulen aus Zellverbünden und großen Batteriepacks aus einzelnen Modulen.

## TECHNOLOGIE

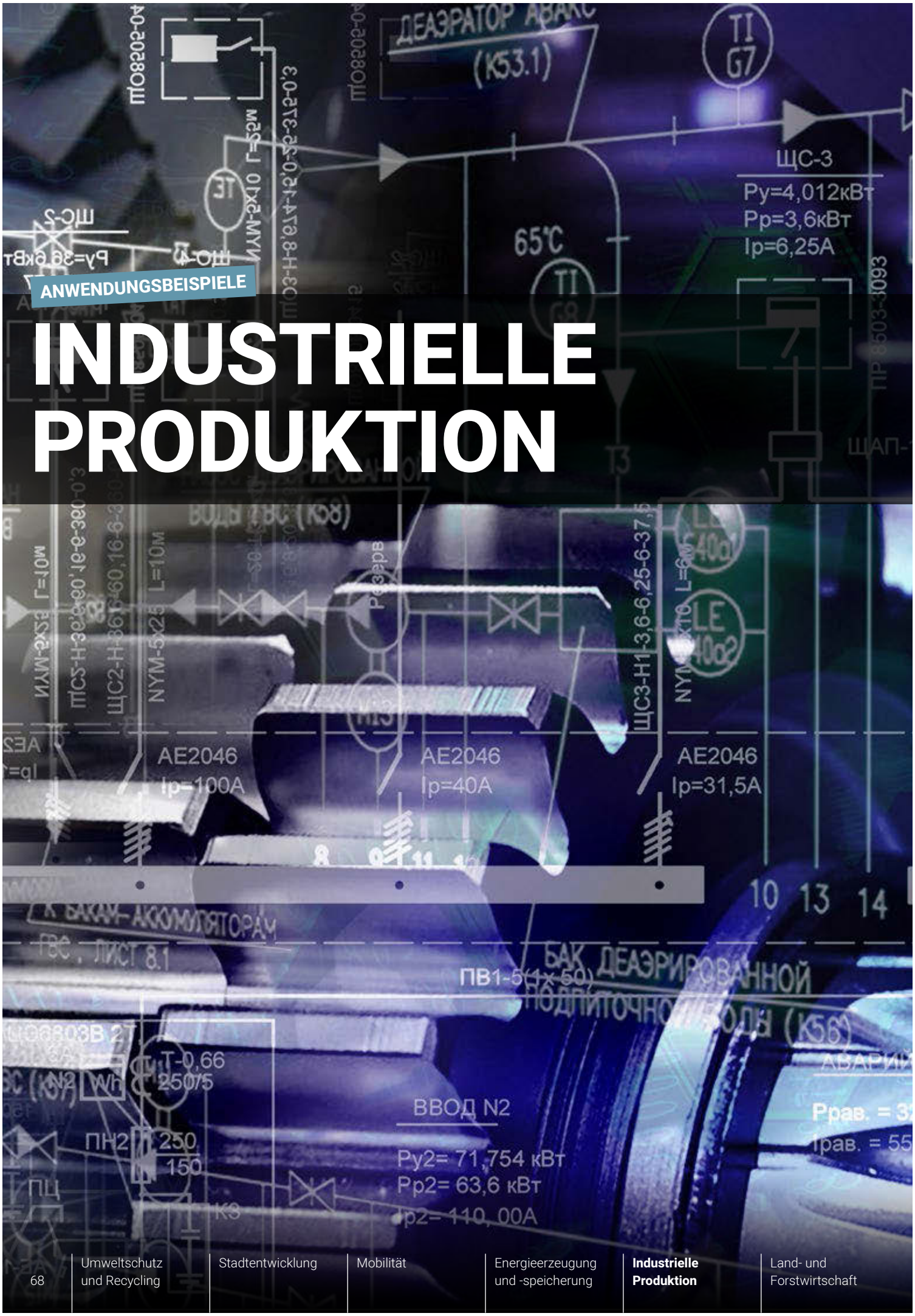
Hochqualitative Batteriezellen per Laser: Die Lasertechnik bietet für die Herstellung von Batterien eine Vielzahl technischer Lösungen mit einem hohen Energieeinsparpotenzial und neue Verfahren für die Steigerung von Leistung und Energie. Die selektive Trocknung und Heizung von Elektrodenschichten nach dem Auftragsprozess führt einerseits zur Verkürzung der Prozesskette und zu einem reduzierten Energieverbrauch im Vergleich zu konventionellen Prozessen und andererseits durch die hohen lokalen Temperaturen zu leistungserhöhenden Sinterphänomenen. Laserprozesse auf der Basis von Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern dienen in der Folge zur fehlerfreien Konfektionierung der Zellen, wobei sowohl Dichtschichtzellen als auch Dünnschichtzellen mit hoher Qualität verarbeitet werden. Durch weitgehende Verdampfungsprozesse werden Kurzschlüsse und Randanschmelzungen der Zellfolien vermieden.

Mittels hochbrillanter Faserlaser oder frequenzkonvertierter Scheibenlaser im grünen Spektralbereich lassen sich schließlich die hochreflektiven Werkstoffe Kupfer und Aluminium auf Zellebene prozesssicher verbinden, um Rundzellen, Pouch-Zellen und prismatische Zellen herzustellen.

## NACHHALTIGKEIT

Bei der Trocknung und Sinterung von Batterieelektrodenschichten eröffnet der Einsatz eines Laserverfahrens aufgrund des effizienten Energieeintrags im Vergleich zur konventionellen Trocknung im Durchlaufofen ein großes Energieeinsparpotenzial. Aufgrund der kompakten Bauweise des Lasers wird gleichzeitig eine erhebliche Reduzierung des notwendigen Bauraums erzielt. Im weiteren Verlauf der Batteriefertigung lassen sich durch Laserschneidverfahren Werkzeuge und Material einsparen und damit die für die Produktion nötige Energie reduzieren.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Arnold Gillner | arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de




ANWENDUNGSBEISPIELE

# INDUSTRIELLE PRODUKTION

# Ökologische Nachhaltigkeit durch Photonik in der industriellen Produktion

Nach einem Bericht des Umweltbundesamtes aus 2018 können sich die Folgekosten durch den Klimawandel im Jahr 2050 auf rund ein Viertel des weltweiten Bruttosozialprodukts belaufen. Erforderlich ist ein schneller Umbau der Wirtschaft hin zu einer umweltfreundlicheren Green Economy, die Ökologie und Ökonomie positiv miteinander verbindet. Die aktuelle Wirtschaft muss dazu modernisiert werden, zum Beispiel durch einen effizienteren Ressourcenverbrauch, reduzierte Emissionen, intelligente Produktgestaltung und verbesserte Wertschöpfungsketten. Hierzu leistet die Digitalisierung von Prozessketten einen aktiven Beitrag. Besonders die Lasertechnik eignet sich vorzüglich zur Vernetzung von Informations- und Fertigungstechnologien.

Leistungsstarke Strahlquellen und Optiksysteme sowie hocheffiziente Laserverfahren verhelfen der Industrie zu einer flexiblen und umweltschonenden Produktion. Gleichzeitig ist der Laser das Mittel der Wahl, um den steigenden Bedarf nach individualisierten, komplexeren Bauteilen – auch in kleinen oder mittelgroßen Stückzahlen – zu stillen. So werden mit Hilfe des lasergestützten 3D-Drucks ressourcenschonend und nur nach Bedarf Bauteile für den Endkunden gefertigt. Das virtuelle Ersatzteillager ist ein Ergebnis dieses Digitalisierungsprozesses. Mit dem passgenauen Zusammenspiel von Laserverfahren und digitaler Netzwelt leistet Digital Photonic Production einen entscheidenden Beitrag zu nachhaltigen Industrie 4.0-Konzepten.

Für viele Anwendungen müssen Bauteile gegen extreme Umwelteinflüsse geschützt oder mit funktionalisierten Oberflächen ausgestattet werden. Mit maßgeschneiderten und ortsselektiven Laserverfahren lassen sich effizient Beschichtungen erzeugen, die beispielsweise die Temperaturbeständigkeit von Bauteilen erhöhen, die Reibung reduzieren oder vor Verschleiß und Korrosion schützen. Dabei macht der Laser den Einsatz umweltschädlicher Stoffe oftmals überflüssig – so etwa beim „Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen EHLA“, einer nachhaltigen Alternative zum Hartverchromen mit umweltschädlichem Chrom(VI).

Photonische Technologien sind damit Wegbereiter für die nächste Generation der industriellen Produktion. Durch sie entstehen intelligente Wertschöpfungsketten, die ressourcenschonendere und umweltfreundlichere Fertigungskonzepte bieten. Vor dem Hintergrund von sich verändernden Marktstrukturen werden durch den Einsatz innovativer Laserverfahren gleichzeitig neue Anwendungsbereiche und Märkte erschlossen.

**ANWENDUNGSBEISPIELE**


Umweltschonende Fertigung mit dem Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen → **Seite 70**

Nachhaltige Fertigung mit Additive Manufacturing → **Seite 72**

Energieeffiziente Laser-Funktionalisierung von Oberflächen → **Seite 74**

Photonen-induzierte, großflächige thermische Aktivierung und Strukturierung von energetischen Funktionsschichten → **Seite 76**

Digitale Holografie in der Produktionskontrolle → **Seite 78**

# Umweltschonende Fertigung mit dem Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

Mit dem Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) lassen sich Bauteile besonders umweltfreundlich und gleichzeitig wirtschaftlich beschichten, reparieren oder additiv fertigen.

1 Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen EHLA

2 Mit EHLA lassen sich Metallschutzschichten mit extremer Hochgeschwindigkeit aufbringen

3 Mit EHLA beschichtete und nachbearbeitete Kolbenstange

## MEHRFACH PREISGEKRÖNT

**EXTREMES HOCHGESCHWINDIGKEITS-LASERAUFTRAGSCHWEISSEN (EHLA)**

Nach der Auszeichnung mit dem Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2017 in Dresden und der Ehrung mit dem 2. Platz des Stahl-Innovationspreises 2018 in Berlin wurde das EHLA-Team bestehend aus Dr. Andres Gasser, Thomas Schopphoven (Fraunhofer ILT) und Gerhard Maria Backes (Lehrstuhl Digital Additive Production DAP, RWTH Aachen) im September 2018 mit dem 1. Platz des renommierten „Berthold Leibinger Innovationspreises 2018“ in Ditzingen geehrt.

## ANWENDUNGSBEREICH

Zum Schutz großer Bauteile vor Verschleiß und Korrosion werden vielfach metallische Beschichtungen eingesetzt, wie etwa bei Bauteilen in der Öl- und Gasindustrie oder bei Walzen in der Stahl- und Papierindustrie. Bisherige Beschichtungsverfahren wie das Hartverchromen oder das thermische Spritzen haben Nachteile, zu denen vor allem der Einsatz von Chrom (VI) oder ein großer Material- und Brennstoffverbrauch zählen.

Wissenschaftler des Fraunhofer ILT und der RWTH Aachen haben nun eine wirtschaftliche und umweltschonende Alternative auf Basis von Laserlicht entwickelt: das Extreme Hochgeschwindgkeits-Laserauftragschweißen EHLA. Damit lassen sich weltweit erstmalig dünne Metallschichten mit Schichtdicken im Mikrometerbereich aus innovativen Werkstoffen ressourceneffizient auf viele Grundwerkstoffe in kürzester Zeit auftragen.

In Kooperation mit Maschinenherstellern wurde das Verfahren bereits zahlreich in der Industrie umgesetzt. Seit 2015 hat beispielsweise die niederländische IHC Vremac Cylinders B.V. einige hundert Hydraulikzylinder mit Längen von bis zu zehn Metern und Durchmessern von bis zu 500 Millimetern für den weltweiten Offshore-Einsatz mit EHLA beschichtet. Auch im chinesischen Markt werden bereits mehrere EHLA-Systeme zum Beschichten von Offshore-Hydraulikzylindern genutzt.

Das EHLA-Verfahren eignet sich zudem für Anwendungen in der Automobilindustrie – z. B. für die Beschichtung von Bremsscheiben, die bisher wegen der großen Belastungen und hohen Anforderungen an Wirtschaftlichkeit sowie Umweltfreundlichkeit nur schwierig beschichtet werden konnten. Aufgrund der stoffschlüssigen Verbindung und der Wirtschaftlichkeit bietet das EHLA-Verfahren auch vielversprechende Möglichkeiten im Bereich der additiven Fertigung oder der Reparatur. So können in einem hybriden Ansatz konventionell gefertigte Bauteile durch den präzisen Auftrag von Mehrlagenbeschichtungen mit ein und derselben Systemtechnik modifiziert und individualisierte Produkte mit funktionalen Elementen hergestellt werden.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Andres Gasser | andres.gasser@ilt.fraunhofer.de
Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de
Thomas Schopphoven | thomas schopphovenen@ilt.fraunhofer.de

Durch die einfache Adaptierbarkeit und Integrierbarkeit in bestehende Prozessketten ist das Verfahren auch für klein- und mittelständische Betriebe attraktiv und die Nutzungsschwelle gering.

## TECHNOLOGIE

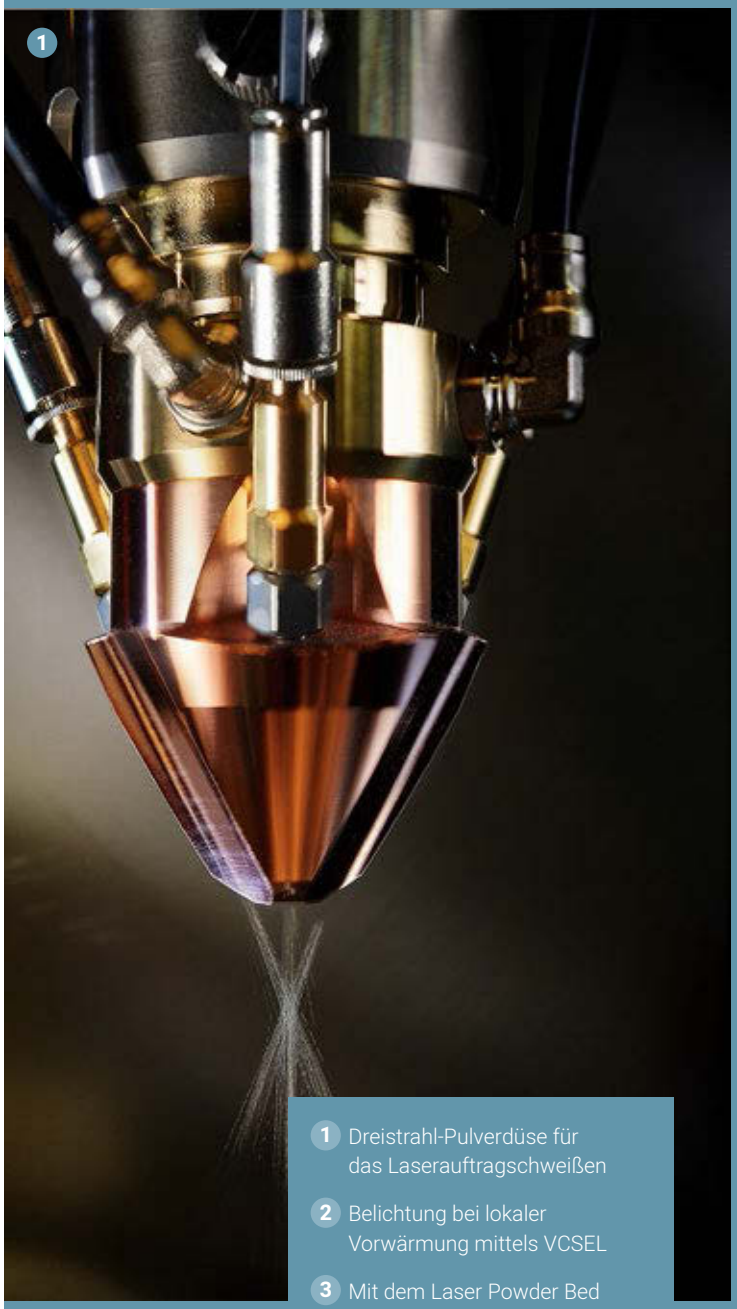
Beschichtung mit Tempo und Präzision: Bei der bisherigen Verfahrensführung beim Laserauftragschweißen wird durch den Laser ein Schmelzbad an der Oberfläche des Bauteils erzeugt. Gleichzeitig wird der pulverförmige Zusatzwerkstoff über eine Pulverzufuhrdüse in das Schmelzbad geführt und dort vollständig aufgeschmolzen. Nach der Erstarrung entsteht die Schicht. Der innovative Ansatz beim EHLA-Verfahren besteht darin, dass das Pulver bereits oberhalb des Schmelzbades, durch gezielte Wechselwirkung von Laserstrahlung und Pulverpartikeln, vollständig aufgeschmolzen und bereits in flüssiger Form auf die Oberfläche aufgetragen wird. Da die Zeit zum Aufschmelzen der Pulverpartikel im Schmelzbad entfällt, wird die für die Schichtbildung notwendige Zeit drastisch verringert. Bisherige Verfahrensgrenzen werden damit um Größenordnungen verschoben bzw. verbessert, so etwa die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit (Faktor 100-250), die Reduzierung der Bearbeitungszeiten (Faktor 10-20), der herstellbaren Schichtdicke (Faktor 50) und der Oberflächenrauheit (Faktor 10). Reicht die Wärmeeinflusszone beim Laserauftragschweißen noch bis in den Millimeterbereich, wird durch EHLA das Material nur im Mikrometerbereich thermisch beeinflusst. Hitzeempfindliche Komponenten lassen sich damit beschichten und neue Materialkombinationen werden möglich, wie etwa Beschichtungen oder Reparaturen auf Aluminium- oder Gusseisenlegierungen.

## NACHHALTIGKEIT

Beim EHLA-Verfahren werden rund 90 Prozent des eingesetzten Materials zur Herstellung der Schicht genutzt, sodass das Verfahren weitaus ressourcenschonender als das thermische Spritzen ist.
Da keinerlei Chemikalien zum Einsatz kommen, ist EHLA umweltfreundlicher als das Hartverchromen mit Chrom (VI)-Verbindungen. Während die mit diesen Verfahren hergestellten Schichten Poren und Risse aufweisen, sind die mit dem EHLA-Verfahren erzeugten Schichten dicht sowie rissfrei und schützen das Bauteil wesentlich effizienter und langfristiger. Die hohe Qualität der Schichten ermöglicht es in vielen Anwendungen geringere Schichtdicken einzusetzen und erlaubt damit die Einsparung wertvoller Ressourcen für Beschichtungswerkstoffe.

# Nachhaltige Fertigung mit Additive Manufacturing

Die laserbasierte additive Fertigung bietet neue Möglichkeiten, eingesetzte Werkstoffe effizienter zu nutzen und auch komplexe Bauteile aus unterschiedlichen Materialien wie Metallen, Keramiken oder Kunststoffen umweltschonend herzustellen, zu reparieren oder zu beschichten.



1 Dreistrahl-Pulverdüse für das Laserauftragschweißen

2 Belichtung bei lokaler Vorwärmung mittels VCSEL

3 Mit dem Laser Powder Bed Fusion (LPBF) lassen sich auch Bauteile aus reinem Kupfer additiv fertigen

## ANWENDUNGSBEREICH

Die Anwendungsfelder der Additiven Fertigung liegen insbesondere dort, wo an Design und Werkstoffeigenschaften hinsichtlich individualisierter oder komplexer Bauteile höchste Ansprüche gestellt werden. Laserbasierte Verfahren erweisen sich hier als sehr vorteilhaft, da sie qualitativ hochwertige Bauteileigenschaften liefern, flexibel an die zu generierenden Schichten und Materialien angepasst werden können und zugleich produktiv und ressourcenschonend sind.

Seit Mitte der 1990er Jahre treibt das Fraunhofer ILT die Additive Fertigung – insbesondere metallischer Bauteile – voran, beispielsweise mit dem pulverbettbasierten Laser Powder Bed Fusion (LPBF) oder dem pulver- oder drahtzufuhrbasierten Laserauftragschweißen. Im Fokus steht die Optimierung der Wirtschaftlichkeit durch eine ganzheitliche Betrachtung der Prozessketten – vom Bauteildesign über die Prozessführung und Anlagentechnik bis hin zur Endbearbeitung. Zur Verbesserung der Robustheit und Reproduzierbarkeit wird der Einfluss von Pulverwerkstoffen, Anlagenkomponenten und Belichtungsstrategien auf die Prozessstabilität sowie auf die Bauteilqualität ermittelt. Mit Inline-Prozessüberwachungsmethoden lassen sich die Energieeffizienz steigern und Ausschussanteile reduzieren. Durch die Realisierung digitaler Abbildungen – sogenannter Digital Twins – ergibt sich zudem die Möglichkeit, Bauteileigenschaften bereits vor der Fertigung festzulegen und angepasste Prozessstrategien zu simulieren.

Mit der Entwicklung neuer Werkstoffe für die additive Fertigung, zum Beispiel ODS-Werkstoffe oder Eutektische Legierungen, werden gezielt Bauteileigenschaften optimiert. Werkstoffangepasste Belichtungsstrategien und Temperaturführungen sorgen für eine Vermeidung von Rissen bei schwer schweißbaren Werkstoffen sowie für eine Verringerung von Spannungen und Verzügen in hochqualitativen Bauteilen.

## TECHNOLOGIE

Durch den schichtweisen Aufbau beim Laser Powder Bed Fusion wird eine dreidimensionale Fertigungsaufgabe auf zwei Dimensionen reduziert. Das Verfahren ermöglicht beispielsweise die Integration von Funktionen oder Leichtbaustrukturen in komplexe Bauteile sowie die Herstellung topologieoptimierter Bauteile. Mit verfahrbaren Bearbeitungsköpfen in großen Bauräumen und maßgeschneiderten Strahlquellen ist das LPBF skalierbar. Im metallischen Bereich wird das Verfahren beispielsweise in der Medizintechnik für individualisierten Zahnersatz, in der Flugzeugtechnik für topologieoptimierte leichte Bauteile oder im Werkzeug- und Formenbau für produktivere Werkzeuge mit konturnahen Kühlkanälen eingesetzt.

Beim Beschichten von Materialien zum Schutz vor Verschleiß und Korrosion oder bei der Reparatur und Instandsetzung erweist sich das Laserauftragschweißen als vorteilhaft. Je nach Verfahrensvariante können formschlüssig angebundene, hochqualitative und rissfreie Schichten mit geringem Wärmeeintrag und Schichtstärken zwischen 0,01 mm und 1,5 mm auf Bauteile aufgetragen werden. Durch Mehrlagenauftrag lassen sich Geometrien großer Komplexität und Abmessungen fertigen. Typische Anwendungen finden sich im Werkzeug-, Turbinen- oder Anlagenbau.

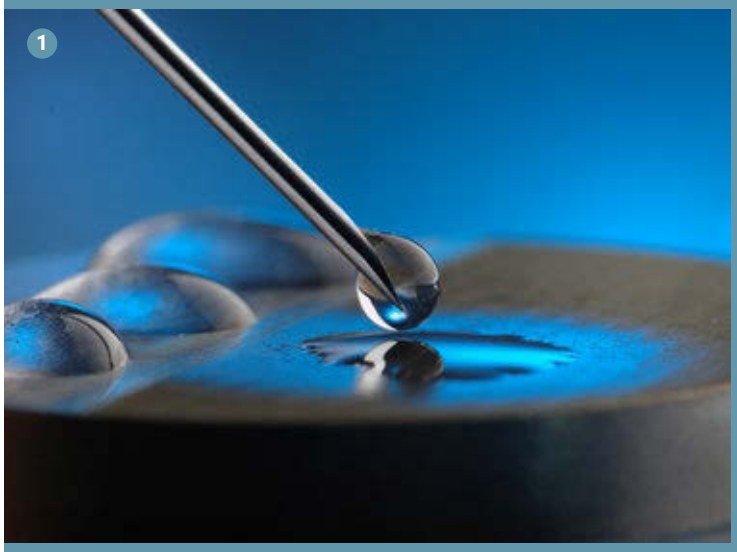
## NACHHALTIGKEIT

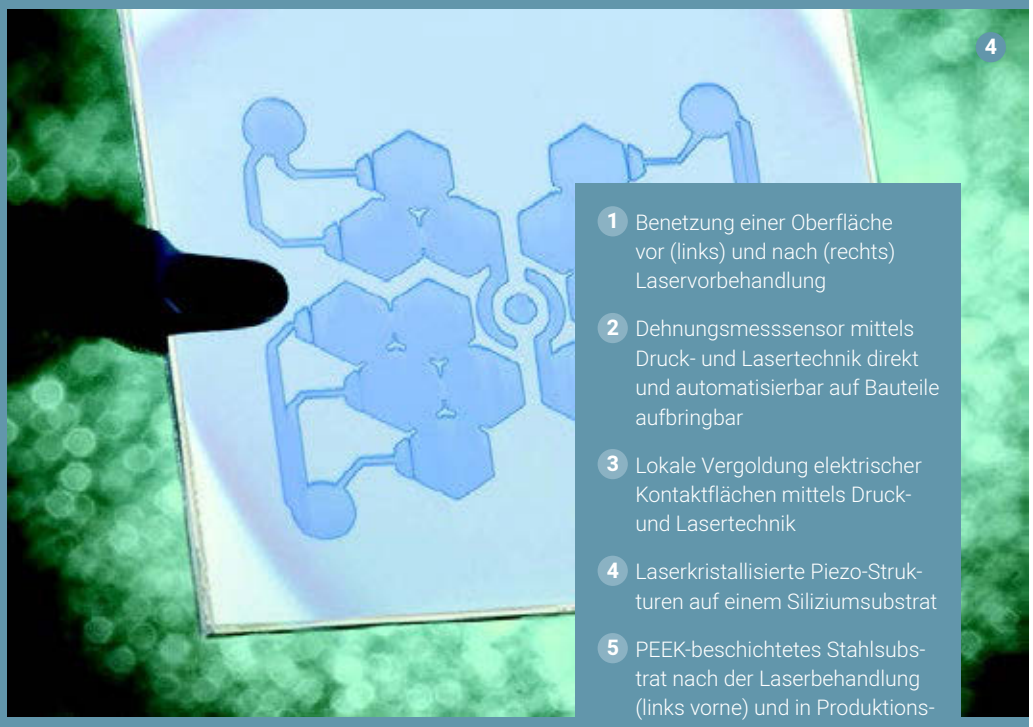
Additive laserbasierte Verfahren bieten die Vorteile, auch komplexe Geometrien schnell herzustellen oder zu bearbeiten und die eingesetzten Werkstoffe effizient zu nutzen. In der industriellen Produktion lassen sich damit Bauteile mit verbesserten Funktionen und Eigenschaften herstellen, die die Energieeffizienz signifikant steigern. Zudem können Bauteile per Laser wirtschaftlich beschichtet oder repariert und Lebensdauern dadurch gesteigert werden. Dank des berührungslosen Werkzeugs tritt nahezu kein Verschleiß auf und der Einsatz umweltschädlicher Chemikalien ist in vielen Fällen nicht mehr nötig.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Sebastian Bremen | sebastian.bremen@ilt.fraunhofer.de
Dr. Andres Gasser | andres.gasser@ilt.fraunhofer.de
Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de

# Energieeffiziente Laser-Funktionalisierung von Oberflächen

Mit optischen Technologien lassen sich Oberflächen oder dünne Schichten in Fertigungsprozessen energieeffizient funktionalisieren und Bauteile dadurch optimieren – bei gleichzeitig minimaler thermischer und mechanischer Belastung.





1 Benetzung einer Oberfläche vor (links) und nach (rechts) Laservorbehandlung

2 Dehnungsmesssensor mittels Druck- und Lasertechnik direkt und automatisierbar auf Bauteile aufbringbar

3 Lokale Vergoldung elektrischer Kontaktflächen mittels Druck- und Lasertechnik

4 Laserkristallisierte Piezo-Strukturen auf einem Siliziumsubstrat

5 PEEK-beschichtetes Stahlsubstrat nach der Laserbehandlung (links vorne) und in Produktionszwischenschritten

## ANWENDUNGSBEREICH

Im Zuge des industrieübergreifenden Trends zur Funktionsintegration werden Anforderungen an Bauteiloberflächen zunehmend komplexer. Funktionale Oberflächen oder dünne Schichten werden für elektronische und optische Anwendungen, für den Verschleiß- und Korrosionsschutz und in vielen weiteren Einsatzgebieten genutzt. Beim Trocknen, Härten, Versintern, Aufschmelzen, Kristallisieren oder Vernetzen von Beschichtungen bieten laserbasierte Verfahren nachhaltige Bearbeitungskonzepte für Bauteile und Produkte, in die sich somit spezielle Funktionen integrieren lassen. Große Vorteile bestehen in der hohen Ortsselektivität des Lasers und der präzisen Kontrolle des Energieeintrags in die Werkstoffe, sodass auch temperaturempfindliche Bauteile beschichtet werden können.

Additive Techniken wie Druckverfahren verfügen in Kombination mit der Laserbearbeitung über ein großes Potenzial, da sie eine ressourceneffiziente und kostengünstige Abscheidung von Strukturen auf ausgewählte Substratbereiche ermöglichen. Bei der notwendigen thermischen Nachbehandlung nasschemisch applizierter Schichten sind Laserverfahren gegenüber konventionellen Ofenverfahren oftmals energieeffizienter, da sie primär die Beschichtung erhitzen, nicht das gesamte Bauteil. Aufgrund der wesentlich kürzeren Wechselwirkungszeiten (Sekunden im Vergleich zu Minuten bis Stunden) sind Laserverfahren – vor allem bei der Behandlung lokaler Beschichtungen – überwiegend produktiver und zeigen Vorteile zum Beispiel in der Reduktion von Diffusionsvorgängen während der Prozessierung. Als digitale Verfahren sind die maskenlosen Druck- und Lasertechnologien prädestiniert für die kostengünstige, inlinefähige und automatisierbare Fertigung variantenreicher Klein- und Individualserien. Bei der Erzeugung von lokalen Kontaktvergoldungen lassen sich mit diesen Verfahren schädliche Materialien vermeiden, die in der klassischen galvanischen Herstellung notwendig sind.

Im Bereich der Elektromobilität können beispielsweise nasschemische Batterieelektroden mittels Laserstrahlung getrocknet werden, was im Vergleich zu Öfen Energie und vor allem Platz in der Produktionshalle spart.

Keramische Verschleißschutzschichten werden u. a. in der Automobilindustrie eingesetzt, um die tribomechanischen Eigenschaften hochbeanspruchter Motoren- und Getriebekomponenten effizienter zu gestalten.

## TECHNOLOGIE

Die spektrale, zeitliche und örtliche Steuerbarkeit der Laserstrahlung ermöglicht eine applikationsangepasste Modulation der Temperaturprofile im Bauteil. Aufgrund der erreichbaren großen Heiz- und Kühlraten in kleinen Volumina kann der Energieeintrag in das Bauteil reduziert werden.

Die nasschemische Erzeugung funktionaler Beschichtungen beinhaltet einen Verfahrensschritt, mit dem die aufgebrachten Werkstoffe thermisch funktionalisiert werden, z. B. beim Aushärten, Sintern, Schmelzen oder Verdichten. Dank des Lasereinsatzes lassen sich überwiegend auch nur die Beschichtungen erwärmen, sodass nicht mehr die gesamten Bauteile auf die Funktionalisierungstemperatur erwärmt werden müssen. Dadurch ist weniger Energie nötig und ein breiteres Werkstoffspektrum nutzbar. Dazu zählen auch temperaturempfindliche Bauteile wie Kunststofffolien aber auch industrierelevante Wälzlagerstähle und Aluminiumlegierungen.

Gedruckte und laserfunktionalisierte Sensoren für die Überwachung metallischer Bauteile lassen sich beim Structural Health Monitoring einsetzen, um Schäden an Strukturkomponenten frühzeitig zu erkennen. Nach dem Reinigen und Aktivieren der Stahloberfläche für bessere Benetzungs- und Haftungseigenschaften können Stapel isolierender, leitfähiger oder piezoelektrischer Schichten additiv aufgebaut werden. Diese lassen sich nutzen für Dehnungsmess- und Körperschallsensoren zur Überwachung von Strukturkomponenten, wie beispielsweise Lager für Windkraftanlagen und Turbinenschaufeln.

## NACHHALTIGKEIT

Laser eignen sich hervorragend zur präzisen und schnellen Funktionalisierung von Oberflächen oder Herstellung von Beschichtungen, die Reibung von Bauteilen reduzieren, vor Verschleiß und Korrosion schützen oder elektronische Funktionalitäten integrieren. Die flexible Anpassbarkeit an Fertigungsaufgaben, die Ortsselektivität sowie die Inline-Fähigkeit der Verfahren ermöglichen eine im Vergleich zu herkömmlichen Techniken gesteigerte Energieeffizienz bei gleichzeitiger Skalierbarkeit der Prozesse. Oftmals kann zudem auf umweltschädliche Zusatzstoffe verzichtet werden.

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen**
Dr. Christian Vedder | christian.vedder@ilt.fraunhofer.de Prof. Johannes Henrich Schleifenbaum
johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de

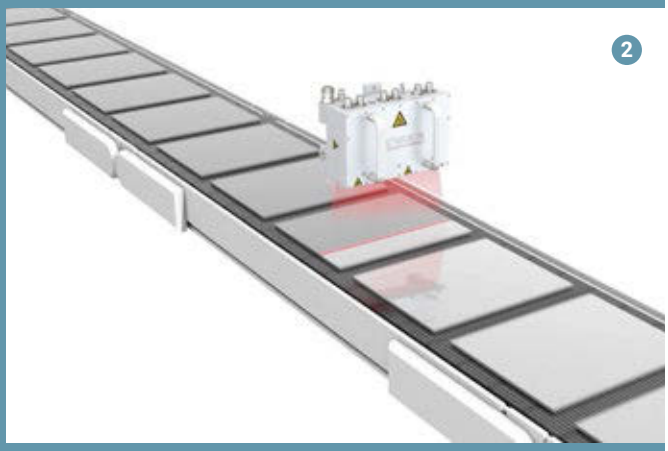
# Photonen-induzierte, großflächige thermische Aktivierung und Strukturierung von energetischen Funktionsschichten

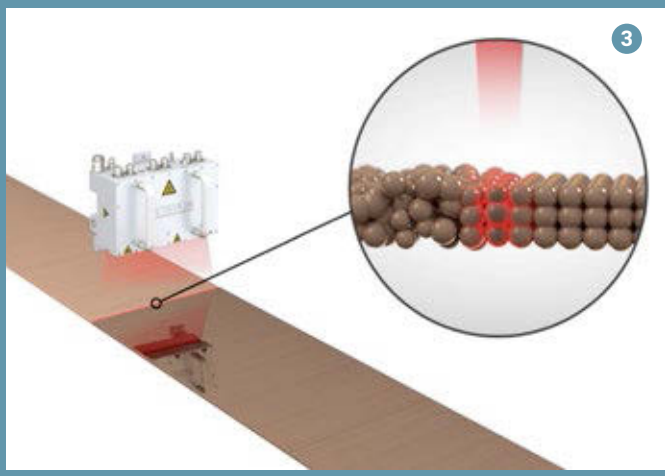
Die Erzeugung und Speicherung von elektrischer Energie erfolgt typischerweise in dünnen Schichtsystemen mit photoelektrischen oder elektrochemischen Konversionsschichten. Die verwendeten Materialien weisen durch die verfügbaren Beschichtungstechnologien immer noch signifikante funktionale Verluste auf, die nur mit einer intensiven, selektiven thermischen Umformung durch flächig appliziertes Laserlicht auf ein Minimum reduziert werden können.

1 4 Das LIMO Activation Line Laser System

2 Je nach Verfahren (Rolle-zu-Rolle/Förderband) ist die thermische Aktivierung und Strukturierung von energetischen Funktionsschichten auf Glas, Papier, Metall oder Halbleitermaterialien möglich

3 Kristallisation/Annealing von Funktionsschichten





## ANWENDUNGSBEREICH

Der Einsatz der LIMO Activation Line Laser Systeme ermöglicht Sintern, Kristallisation und Annealing von Funktionsschichten auf Glas, Metall oder Folien mit Flächenraten von über 30 m² pro Minute und einem elektrooptischen Prozesswirkungsgrad von über 50 Prozent und ist damit einer der energieeffizientesten Heizprozesse. Der Einsatz von Laserlicht für die zerstörungsfreie Erwärmung und Optimierung von Materialeigenschaften ermöglicht kurzzeitig hohe Prozesstemperaturen auf funktionalen Oberflächen und Beschichtungen, ohne dass die darunterliegenden Materialien oder Substrate in ihren Eigenschaften geändert werden.

Das Licht erwärmt also wirklich nur das Materialvolumen, das umgeformt werden soll. Der Laserprozess ermöglicht damit erstmalig kostengünstige Hochtemperaturprozesse auf Oberflächen ober Beschichtungen für die energieeffizienten Energiequellen und Energiespeicher für eine globale Energiewende. Für eine wirtschaftliche Bearbeitung mit großen Flächenraten eignet sich die Kombination aus Laserquellen und lichtformenden mikro-optischen Strahlformungssystemen, die eine definierte simultane gleichförmige Bestrahlung in Inline-Fertigungsprozessen durch Linienstrahlformen ermöglichen. Die Verwendung von klassischen isothermischen Öfen ermöglicht nur niedrige Prozesstemperaturen, bei denen das nicht aktive Trägermaterial noch keine Degradation oder Zerstörung aufweist.

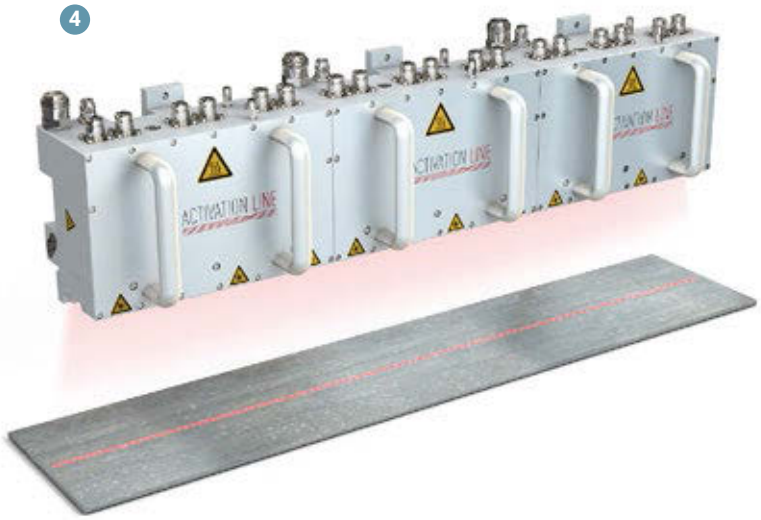
Mit dem neuen Laserverfahren können die Leitfähigkeit z. B. von TCO Schichten und gedruckten Leiterbahnen deutlich verbessert werden und sogar dicke Siliziumschichten auf Glassubstraten bei 1500 °C kristallisiert werden, ohne dass Substratmaterial zerstört wird. Durch den Wegfall von langen Aufheiz- und Abkühlphasen kann der Laserheizprozess innerhalb von wenigen 100 Mikrosekunden eine definierte und regelbare Temperatur generieren und eignet sich dadurch auch als quasi digital einstellbare Heizung für die Industrie 4.0.

## TECHNOLOGIE

In Zusammenarbeit mit dem IPHT, den Helmholtz Zentren in Dresden-Rossendorf und Berlin sowie Anwendern aus der Glasindustrie, der Photovoltaik und der Batterieindustrie konnten durch Sintern, Annealing und Kristallisationsprozesse die elektrischen Eigenschaften von Metallen, Halbleitern und elektrisch leitenden Schichten deutlich verbessert werden.

Die Umformungstemperaturen lagen dabei bis zu einem Faktor 3 oberhalb der Zerstörungsschwelle der Substratmaterialien. Die selektive Hochtemperatur-Laserheizung mit skalierbarem Linienfokus eröffnen damit völlig neue Anwendungsgebiete und Materialeigenschaften für die smarten, energieeffizienten stationären und mobilen Anwendungen des 21. Jahrhunderts.

4




## NACHHALTIGKEIT

Die Nachhaltigkeit der Photonen-induzierten thermischen Aktivierung von energetischen Funktionsschichten setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- Aufgrund der selektiven und schnellen Erwärmung von absorbierenden Schichten innerhalb von wenigen 100 Mikrosekunden ergibt sich ein hoher Heizwirkungsgrad. Durch den Einsatz vom Diodenlaserquellen können über 50 Prozent der elektrischen Energie im Prozess verwertet werden.
- Die Hochtemperatur-Umformung ermöglicht den Einsatz von neuen kostengünstigen und gut verfügbaren Materialsystemen, die mit den bisherigen isothermischen Prozessen nicht verwendet werden konnten (z. B. Silizium).
- Durch Laserquellen mit einem Linienfokus und einer hoher Flächenrate lässt sich eine skalierbare Produktivität realisieren.

**LIMO GmbH**
Dirk Hauschild | d.hauschild@limo.de

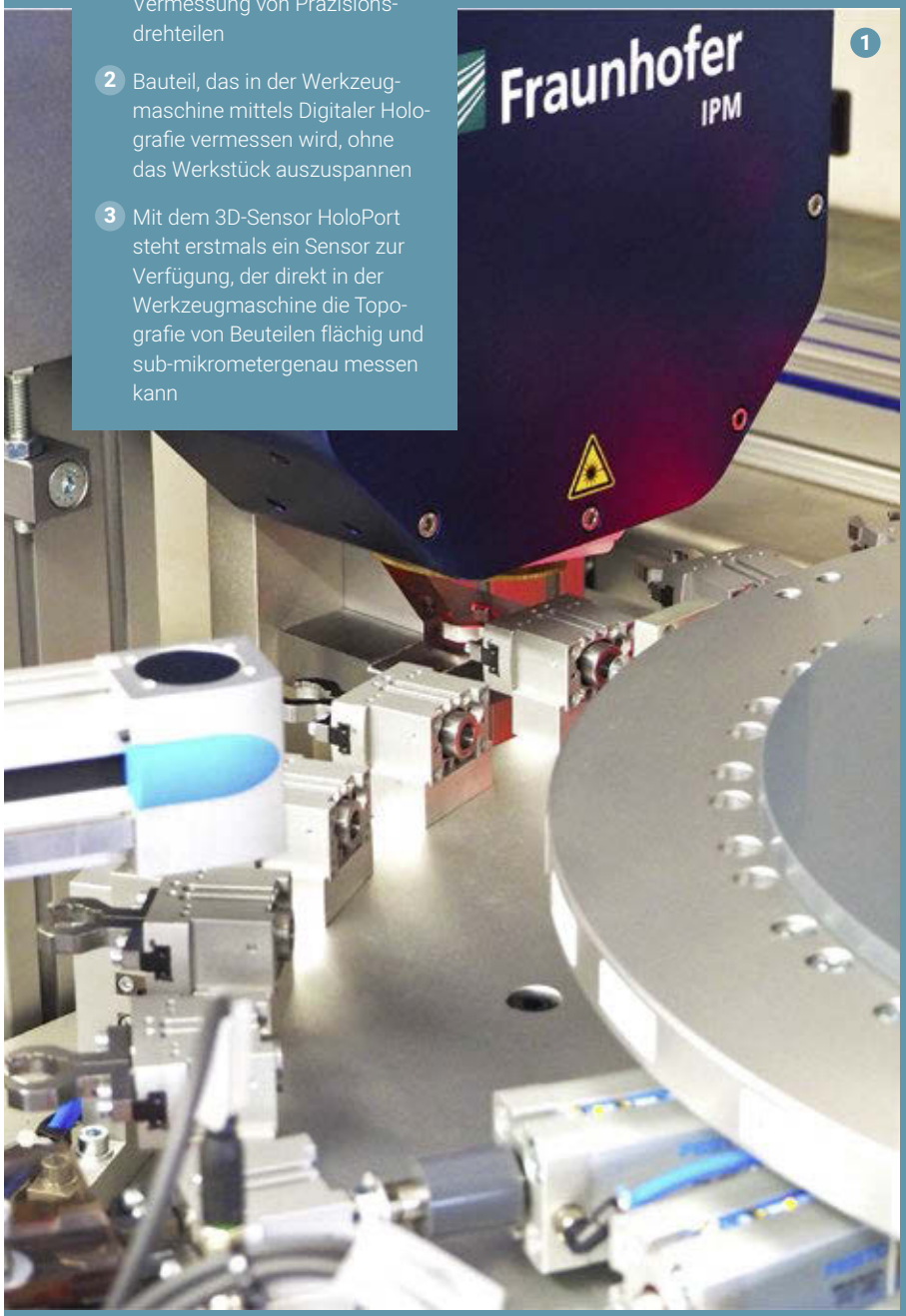
# Digitale Holografie in der Produktionskontrolle

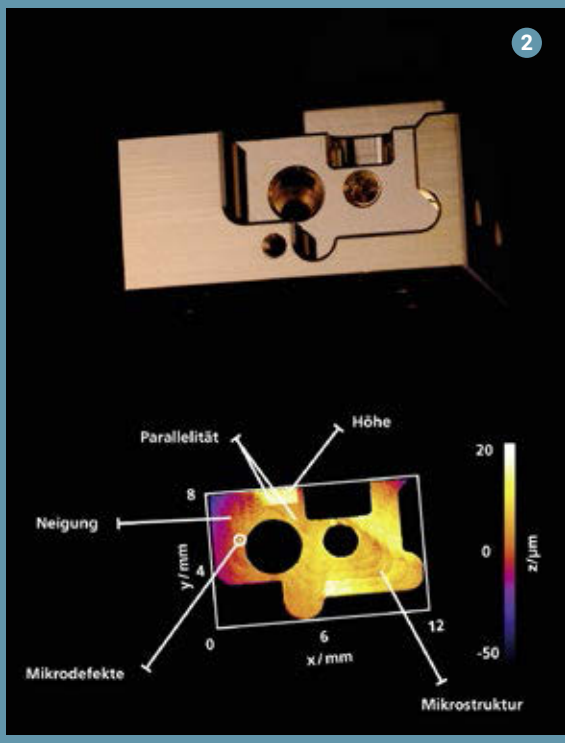
Bauteile können mit der digitalen Holografie im Produktionsprozess sehr schnell und hochpräzise vermessen werden. Dadurch ist eine 100-Prozent-Kontrolle möglich und Ausschuss wird vermieden.

1 Prüfmaschine im Dauereinsatz in einer Produktionslinie zur Vermessung von Präzisionsdrehteilen

2 Bauteil, das in der Werkzeugmaschine mittels Digitaler Holografie vermessen wird, ohne das Werkstück auszuspannen

3 Mit dem 3D-Sensor HoloPort steht erstmals ein Sensor zur Verfügung, der direkt in der Werkzeugmaschine die Topografie von Beuteilen flächig und sub-mikrometergenau messen kann



## ANWENDUNGSBEREICH

Die Vermessung dreidimensionaler Oberflächen mit kleinen 3D-Strukturen ist eine Herausforderung für die industrielle Messtechnik. Gängige optische Verfahren wie Streifenreflexion, Lasertriangulation oder Weißlicht-Interferometrie sind für viele Inline-Messaufgaben zu ungenau, zu langsam oder zu wenig robust. Das am Fraunhofer IPM entwickelte Messsystem „HoloTop" nutzt die digitale Mehrwellenlängen-Holografie für die schnelle 3D-Inline-Kontrolle. Holografische Messverfahren werden heute vorwiegend in der Mikroskopie im Labor eingesetzt. Im Gegensatz dazu können mit den von Fraunhofer IPM entwickelten Systemen Messfelder einer Größe von 20 x 20 $mm^2$ vermessen werden. Die Sensoren messen dabei die Oberflächentopografien vom (Sub)Mikrometer- bis in den Millimeter-Bereich – und das mit bisher unerreichter Messgeschwindigkeit und Robustheit.

Für die Werner Gießler GmbH hat Fraunhofer IPM eine vollautomatische Inline-Prüfanlage für Präzisionsdrehteile entwickelt, da der Kunde der Firma eine 100-Prozent-Kontrolle für die Teile fordert. Das System prüft im Sekundentakt die Dichtflächen etwa münzgroßer Präzisionsdrehteile – diese stecken weltweit in 70 Prozent aller Lkw Common-Rail-Dieseleinspritzungen.

## TECHNOLOGIE

Die digital-holografische 3D-Messtechnik ermöglicht die schnelle (sub-Sekunden) und gleichzeitig hochpräzise (Sub-µm-Bereich) Messung von 3D-Geometrien typischerweise streichholzschachtelgroßer technischer Bauteile.

Im Gegensatz zur Fotografie, bei der die räumliche Verteilung der Lichtintensität gespeichert wird, zeichnet die Holografie zusätzlich die Phaseninformation. Voraussetzung hierfür ist eine kohärente Lichtquelle – typischerweise ein Laser. Wird die Oberfläche eines Prüflings mit Laserlicht beleuchtet, ist in der Phasenverteilung der rückgestreuten Lichtwelle die Form des Prüflings gespeichert. Durch die interferometrische Aufzeichnung und anschließende digitale Rekonstruktion wird diese Information zugänglich und genutzt, um Oberflächen dreidimensional zu vermessen.

Durch den Einsatz mehrerer schmalbandiger Laser werden verschiedene synthetische Wellenlängen generiert. Dank dieser unterschiedlichen Wellenlängen erschließt sich ein breites Messspektrum, je nach Rauigkeit der Oberfläche vom (Sub-) Mikrometer- bis in den Millimeterbereich. Die rechenaufwändige digital-holografische Rekonstruktion der komplexwertigen Wellenfelder, in denen die Prüflingstopografie gespeichert ist, erfolgt auf modernen Grafikkarten und wurde in den vergangenen Jahren um mehrere Größenordnungen beschleunigt. Der von Fraunhofer IPM entwickelte 3D-Sensor „HoloTop" wertet mehr als 100 Mio. Messpunkte pro Sekunde aus und besitzt damit hinsichtlich Genauigkeit und Geschwindigkeit eine Alleinstellung.

## NACHHALTIGKEIT

Industrielle Qualitätssicherung reduziert den Ausschuss und sorgt für die lange und fehlerfreie Funktion von Bauteilen und Geräten. Damit leistet optische Messtechnik auf diesem Gebiet unmittelbar einen Beitrag zur Ressourceneffizienz. Oft müssen komplexe 3D-Bauteile mit Mikrometergenauigkeit und hohen Durchsatz geprüft werden. Durch das neue Messverfahren konnte beispielsweise der Pseudoausschuss der Fa. Gießler GmbH massiv reduziert werden. Darüber hinaus erlaubt das Messverfahren, die Herstellungsprozesse weiter zu optimieren. Da die Qualität der Präzisionsdrehteile der Fa. Gießler GmbH direkten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Dieselmotoren und damit auf Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß hat, trägt das Messverfahren damit auch indirekt zu einer Umweltverbesserung bei.

**Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg**
Dr. Alexander Bertz | alexander.bertz@ipm.fraunhofer.de

ANWENDUNGSBEISPIELE

# LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

# Ökologische Nachhaltigkeit durch Photonik in der Land- und Forstwirtschaft

Die Digitalisierung erhält Einzug in die Landwirtschaft. Mittels Smart Farming oder Landwirtschaft 4.0 werden die Ressourceneffizienz sowie der Ernteertrag gesteigert und die Landwirtschaft nachhaltiger gestaltet. Dazu kommen datengetriebene Lösungen und Hardware zum Einsatz, die überwiegend auf optische Sensoren zurückgreifen. Eine wichtige Rolle spielen dabei Dronen, die über optische Systeme einen Teil dieser Aufgaben übernehmen und als Bindeglied im System funktionieren.

Was wie Science Fiction klingt, wird mehr und mehr zur Realität. Laut einer Befragung von Bitkom nutzen bereits mehr als 50 Prozent der landwirtschaftlichen Betriebe digitale Anwendungen – Tendenz steigend.

Das Potenzial ist groß, angefangen vom Erfassen umfangreicher Wetterdaten, über die Analyse von Feldern, etwa zur Bewässerung, zur Düngung, zur Beikrautbekämpfung, zum Schutz vor Schädlingen oder zur Beurteilung der Erntebedingungen, bis hin zur Vernetzung von landwirtschaftlichen Maschinen und der Steuerung führerloser Nutzfahrzeuge. Moderne Verfahren des Precision Farming zur Bekämpfung ungewollten Beikrauts unterscheiden beispielsweise mithilfe von Kamerasensoren zwischen Nutzpflanzen und Beikraut und ermöglichen so einen punktgenauen und damit reduzierten Einsatz von Herbiziden. Auch teurere Mittel wie Bioherbizide, die biologisch besser abbaubar sind, können so eine Alternative darstellen.

Wissenschaftler des Laser Zentrums Hannover gehen sogar noch einen Schritt weiter und arbeiten an einer Lösung, bei der Laser statt Herbizide zum Einsatz kommen und Beikraut durch Verödung des Wachstumszentrums physikalisch bekämpft wird.

Ein weiteres Beispiel für mehr Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft durch Photonik ist etwa der Einsatz von speziellen LEDs in Gewächshäusern, wodurch der Strom- und Düngerverbrauch stark reduziert werden kann.

Auch in der Forstwirtschaft spielen optische Lösungen eine immer wichtigere Rolle. Immer höhere Temperaturen aufgrund des Klimawandels führen zu immer größerer Trockenheit. Folglich steigt die Waldbrandgefahr weltweit. Ein Trend, der bereits in den vergangenen Jahren deutliche Spuren hinterlassen hat und der in 2018 zu einem neuen Schadenrekord weltweit führte. Mit entsprechend katastrophalen Auswirkungen auf die Umwelt: Laut Greenpeace verursachen Feuer in der Natur globale $CO_2$-Emissionen von etwa acht Milliarden Tonnen jährlich. Terrestrische, digitale Fernbeobachtungssysteme für die frühzeitige Erkennung von Wald- und Buschbränden sind in der Lage, größere Waldgebiete permanent zu beobachten, auf eine Rauchentwicklung zu prüfen und Einsatzkräfte zu alarmieren.

Satellitengestütze Systeme wie die Mission FireBIRD detektieren Hochtemperaturereignisse vom All aus.

Die Daten können von Lagezentren, Behörden oder Hilfsorganisationen genutzt werden und sie helfen dabei, das Verhalten und die Entwicklung von Großbränden in Zukunft besser vorauszusagen.

**ANWENDUNGSBEISPIELE**

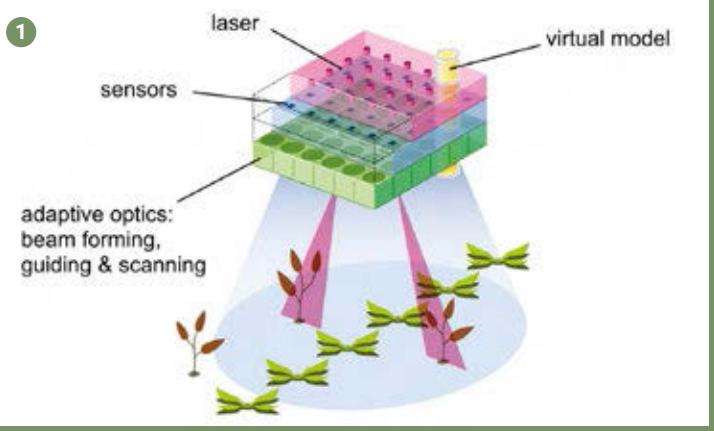
Laser versus „Unkraut“:
Herbizide im Pflanzenbau reduzieren → **Seite 82**

Optische Früherkennung von
Wald- und Flächenbränden → **Seite 84**

# Laser versus „Unkraut“: Herbizide im Pflanzenbau reduzieren

Das Laser Zentrum Hannover (LZH) arbeitet an einem neuen Ansatz für die Bekämpfung unerwünschter Beikräuter in der Pflanzenproduktion. Statt Herbizide nach dem Gießkannenprinzip auszubringen, soll Unkraut physikalisch bekämpft werden.

1

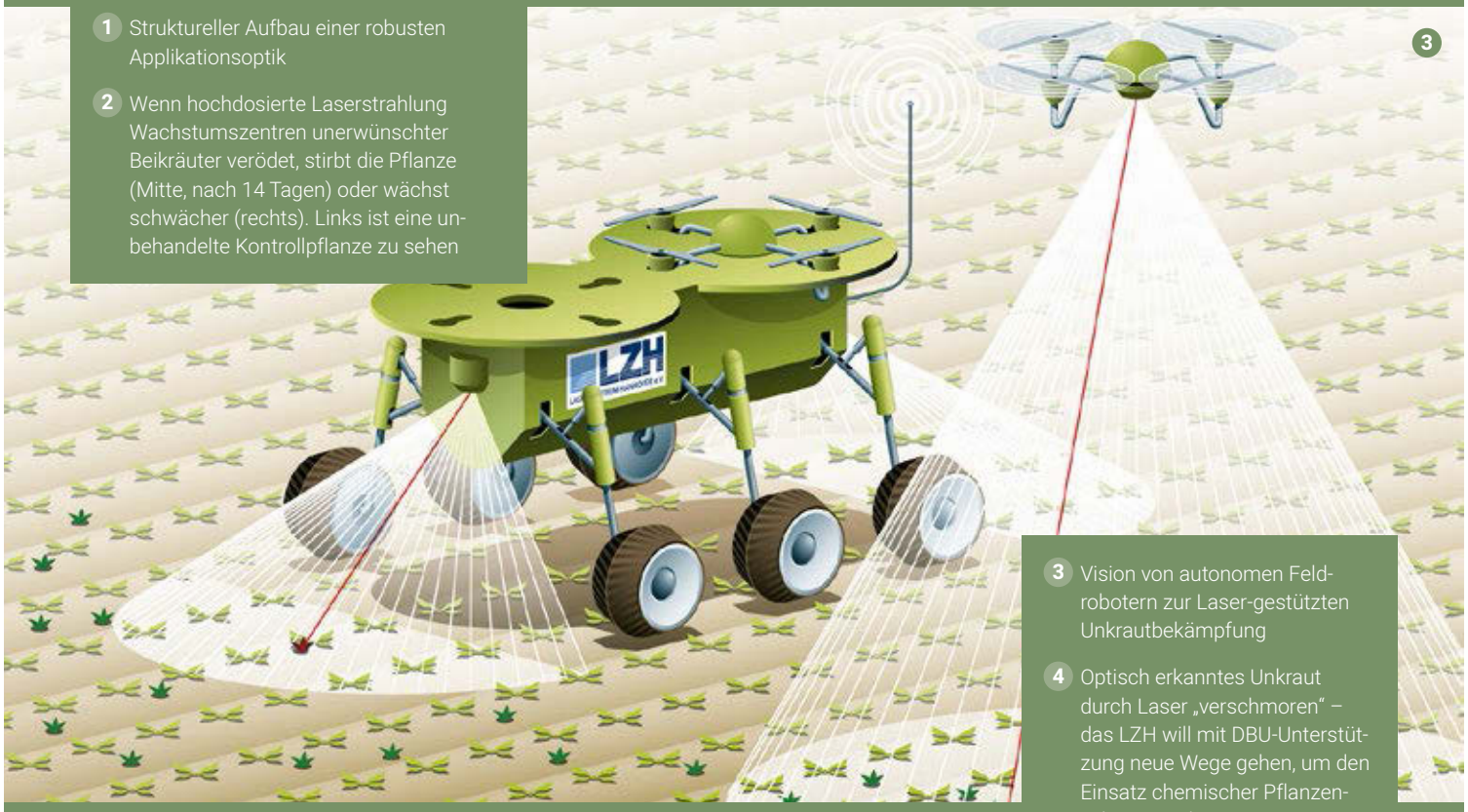



2

1 Struktureller Aufbau einer robusten Applikationsoptik

2 Wenn hochdosierte Laserstrahlung Wachstumszentren unerwünschter Beikräuter verödet, stirbt die Pflanze (Mitte, nach 14 Tagen) oder wächst schwächer (rechts). Links ist eine unbehandelte Kontrollpflanze zu sehen

3




3 Vision von autonomen Feldrobotern zur Laser-gestützten Unkrautbekämpfung

4 Optisch erkanntes Unkraut durch Laser „verschmoren“ – das LZH will mit DBU-Unterstützung neue Wege gehen, um den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel zu verringern

## ANWENDUNGSBEREICH

Der Ruf in der Gesellschaft ist groß, nachhaltige Konzepte für die landwirtschaftliche Produktion zu entwickeln und umzusetzen. Und das nicht erst seitdem der Einsatz des Unkrautvernichtungsmittels Glyphosat in Politik und Justiz intensiv diskutiert wird. Die Suche nach innovativen Alternativen zur Verwendung chemischer Herbizide in der Landwirtschaft ist in vollem Gange.

Das Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH) arbeitet an einem photonischen Ansatz für die Unkrautbekämpfung in der Pflanzenproduktion. Statt Herbizide nach dem Gießkannenprinzip auszubringen, soll Unkraut physikalisch bekämpft werden, indem das empfindliche Wachstumszentrum der unerwünschten Pflanzen verödet wird.

4

Im Labor ist die Wirksamkeit schon seit längerem belegt. Um im Freiland verlässliche Ergebnisse zu erzielen, liegt der Fokus derzeit auf der Entwicklung eines robusten, feldtauglichen und sicheren Lasersystems bzw. Laserapplikators. Die Technologie soll möglichst schnell zur Marktreife gebracht werden. Gefördert wird das Projekt „NUBELA“ von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit insgesamt rund 315.000 Euro. Neben dem LZH sind an dem Projekt die Firmen LASER on demand in Burgdorf, Niedersachsen, und IPG Laser in Burbach, Nordrhein-Westfalen, als Kooperationspartner beteiligt.

## TECHNOLOGIE

Für die Unkrautbehandlung mittels Laser werden die Pflanzen auf der Anbaufläche per Bilderkennung als Nutzpflanze oder unerwünschtes Beikraut klassifiziert. Per Scanner wird der Laserstrahl dann gezielt nur auf das Unkraut gerichtet. Die Nutzpflanzen bleiben unbehandelt. Je nach applizierter Dosis und Lokalisation des Laserstrahls auf der Unkrautpflanze, werden die Pflanzen ganz abgetötet oder nur zunächst in ihrem Wachstum gestoppt. Die erzielte Wuchshemmung verschafft den Nutzpflanzen den Entwicklungsvorsprung, den sie benötigen, damit der Ertrag nicht durch Konkurrenz mit dem umstehenden Beikraut verringert wird.

## NACHHALTIGKEIT

Der laserbasierte Ansatz hat gleich mehrere Vorteile: Pflanzenbauer brauchen weniger Herbizide, die Pflanzen können keine Resistenzen gegen die Laserstrahlung entwickeln und für die aus Sicht der Biodiversität nützlichen Beikräuter und Nützlingsinsekten auf den Flächen entstehen weniger Nachteile. So könnte auch ohne Gentechnik der Pflanzenbau der Zukunft gesichert werden.

**Laser Zentrum Hannover e. V.**
PD Dr. Merve Wollweber | m.wollweber@lzh.de

# Optische Früherkennung von Wald- und Flächenbränden

IQ FireWatch ist ein terrestrisches, automatisiertes System für die frühzeitige Erkennung von Wald- und Flächenbränden. Mittels moderner in-situ-Sensoren kann es große Waldgebiete überwachen und rund um die Uhr auf Rauchentwicklung prüfen.

1 IQ FireWatch-Sensor im Einsatz in Spanien

2 Erkennungen des Systems bei Tag

3 Beispiel für eine Installation auf einem ehemaligen Feuerwachturm in Brandenburg

## ANWENDUNGSBEREICH

IQ FireWatch ist ein System zur automatischen Früherkennung von Waldbränden über große Entfernungen mit Datenübertragung in eine beliebige Zentrale zur visuellen Endkontrolle durch einen Operator, der in der Regel 12 – 16 Türme parallel betreut.

Der rotierende Mulispektralsensor kann auf ebenem Gelände rund 700 km² innerhalb von 4 – 6 Minuten kontinuierlich überwachen und funktioniert am Tag, in der Nacht und auch unter schwierigen Wetterbedingungen verlässlich.

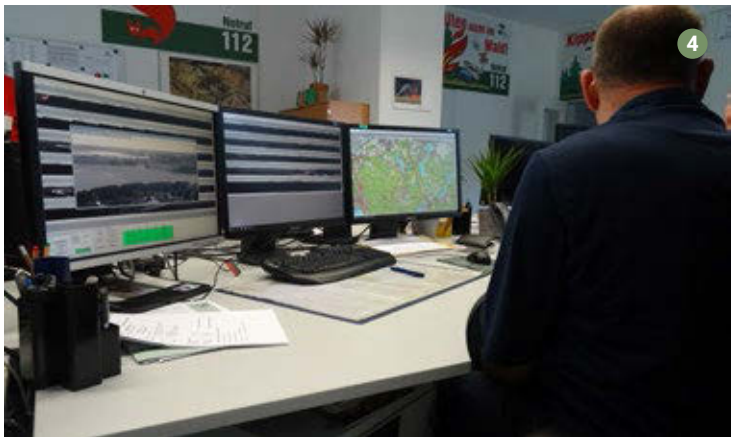
Die Basistechnologie wurde in Kooperation mit dem DLR entwickelt und im Rahmen der Rosetta-Mission als eine Schlüsselkomponente eingesetzt. Seitdem wird IQ FireWatch kontinuierlich optimiert und vereint über Jahrzehnte gewachsene Erfahrung mit modernsten Technologien, wie z. B. machine learning. Über 300 Sensoren schützen weltweit rund 6 Million Hektar Wald.

In Deutschland werden seit fast 20 Jahren erfolgreich der Forst Brandenburgs sowie Waldgebiete in Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Sachsen überwacht, denen die EU augrund einiger Besonderheiten ein vergleichbares Risiko bescheinigt wie den einschlägigen Regionen Südeuropas.

## TECHNOLOGIE

Die IQ FireWatch-Einheit wird auf einem Turm, Mobilfunkmast oder einer anderweitig günstigen Position aufgesetzt und rotiert kontinuierlich um 360°. Drei integrierte Sensoren (Monochrom, Farbe, NIR) liefern hochauflösende und nicht komprimierte Videodaten, die durch eine Rechnereinheit vor Ort verarbeitet und analysiert werden.

Sobald Rauch bzw. rauchähnliche Ereignisse auftreten, wird ein Operator automatisch darüber informiert. Die visuelle Endkontrolle ist für eine Einsatzentscheidung notwendig, da der Rauch eines Waldbrands sich nicht zum Beispiel von dem eines Holzkohlegrills unterscheidet.



4

5

## NACHHALTIGKEIT

Obwohl Waldbrände Bestandteil unseres Ökosystems sind, haben weltweit nur 4 Prozent natürliche Ursachen. In allen anderen Fällen ist der Mensch das Problem, direkt oder indirekt, fahrlässig oder vorsätzlich.

Neben wirtschaftlichen Faktoren und der Gefahr für Leib und Leben, sind die Folgen für unser Klima katastrophal, denn Waldbrände leisten einen gigantischen Beitrag zu den weltweiten Treibhausgasemissionen.

Das beschleunigt den Klimawandel und treibt die Erderwärmung voran, was wiederum Brände begünstigt – ein Teufelskreis, dem man mit frühzeitiger Erkennung und Bekämpfung entgegenwirken kann.

4 Waldbrandzentrale in Wünsdorf/Brandenburg

5 IQ FireWatch im Einsatz in der Slowakei

**IQ wireless GmbH**
Alexander Singer | info@iq-wireless.com

# Die Autoren

in alphabetischer Reihenfolge

## STUDIENIDEE/-KONZEPT

Mike Bähren | SPECTARIS e. V.

Axel Bauer | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Jonas van Bebber | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Jörg Mayer | SPECTARIS e. V.

Univ.-Prof. Dr. Reinhard Poprawe | Fraunhofer-Institut
für Lasertechnik ILT/RWTH Aachen University

Katja Stolle | Messe München GmbH

Dr. Wenko Süptitz | SPECTARIS e. V.

## REDAKTION

Redaktionsleitung:
Mike Bähren | SPECTARIS e. V.

Projektkoordination für den Fraunhofer-Verbund
Light & Surfaces:
Axel Bauer | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Jonas van Bebber | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Claudia Ellebracht | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

## MITWIRKENDE AUTOREN

Mike Bähren | SPECTARIS e. V.

Axel Bauer | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Jonas van Bebber | Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Jacques Cochard | TEMATYS

Univ.-Prof. Dr. Reinhard Poprawe | Fraunhofer-Institut
für Lasertechnik ILT/RWTH Aachen University

Benoît d'Humières | TEMATYS

## AUTOREN DER ANWENDUNGSBEISPIELE

Die Autoren der Anwendungsbeispiele sind
unter den jeweiligen Texten aufgeführt.

# Messe München GmbH
# LASER World of PHOTONICS

## Weltleitmesse und führende Plattform der Laser- und Photonikindustrie

Die Weltleitmesse LASER World of PHOTONICS ist die führende Plattform der Laser- und Photonikindustrie. Die Messe bietet den kompletten Marktüberblick – von der Optoelektronik über Laserfertigung bis hin zu Imaging, Sensorik und Biophotonik. Viele Aussteller entwickeln optische Komponenten und Systeme nicht nur für einen einzigen Anwendungsbereich, sondern sind auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie aktiv, treiben Fortschritte im Halbleiter- und Elektronikbereich voran oder tragen mit neuen Bildgebungsverfahren zur Qualitätssicherung der Lebensmittelindustrie bei. Und es kommen immer neue Anwendungsfelder hinzu.

Neben dem Ausstellungsbereich bietet die Messe ein breites Rahmenprogramm mit Awards, Start-up-Programmen, Live-Demonstrationen, Guided Tours und vielem mehr.

### WORLD OF PHOTONICS CONGRESS

Parallel zur Messe findet der europaweit größte World of Photonics Congress statt. Die Kongressteilnehmer erwartet ein zukunftsweisender Kongress mit sieben Einzelkonferenzen von weltweit führenden Organisationen und über 5.000 Experten aus aller Welt. Kurz: ein Event der Superlative, das tiefe Einblicke in die Zukunft der Photonik gibt.

Die LASER World of PHOTONICS wird seit 1973 alle zwei Jahre von der Messe München organisiert; die nächste Ausgabe findet vom 24. bis 27. Juni 2019 in München statt, der nächste World of Photonics Congress parallel vom 23. bis 27. Juni 2019 im ICM – Internationales Congress Center München.

**Messe München GmbH**
info@world-of-photonics.com | www.world-of-photonics.com

Messe München

# Industrieverband SPECTARIS

SPECTARIS ist der Industrieverband für
optische, medizinische und mechatronische Technologien

**SPECTARIS**

Der Verband vertritt über 400 innovative Unternehmen. Namhafte Vertreter sind etwa Carl Zeiss, Jenoptik, Leica, Rodenstock, Dräger, Sartorius, Karl Storz, Otto Bock oder Eppendorf. Die Mehrzahl der Mitgliedsfirmen sind jedoch mittelständische Hersteller, die in ihren Segmenten als „Hidden-Champions" am Weltmarkt agieren.

SPECTARIS vereint dabei faszinierende, zukunftsfähige und innovative Branchen: Consumer Optics (Augenoptik), Photonik, Medizintechnik sowie Analysen-, Bio- und Labortechnik. Zusammen erzielten sie im Jahr 2018 einen Gesamtumsatz von knapp 72 Milliarden Euro und beschäftigten rund 316.000 Menschen. Die mittelständische Struktur, das enorme Innovationspotenzial und die ausgeprägte Exportorientierung bilden den gemeinsamen Rahmen der Industrien, deren Produktlösungen in vielen Wirtschaftszweigen zur Anwendung kommen, oftmals Schlüsseltechnologien sind und den Menschen ein hohes Maß an Lebensqualität bescheren.

SPECTARIS bildet ein leistungsfähiges Netzwerk, organisiert einen permanenten Austausch seiner Mitglieder untereinander und bietet eine Plattform für den Dialog mit der Politik, anderen Verbänden, wichtigen Anwendern und Absatzmittlern. Als Dienstleister verschafft SPECTARIS seinen Mitgliedern nicht nur Zugang zu wertvollen Markt- und Branchendaten, sondern bietet auch gezielte Unterstützung für den Außenhandel oder Informationen zu Zulassungsfragen, wichtigen Gesetzesänderungen sowie betriebswirtschaftlichen Themen.

**Industrieverband SPECTARIS**
Werderscher Markt 15 | 10117 Berlin
info@spectaris.de | www.spectaris.de

SPECTARIS
Verband der Hightech-Industrie

# Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

## Lasertechnik für maßgeschneiderte Lösungen

### FRAUNHOFER ILT

Mit über 540 Mitarbeitern und mehr als 19 500 m² Nettogrundfläche zählt das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT weltweit zu den bedeutendsten Auftragsforschungs- und Entwicklungsinstituten im Bereich Laserentwicklung und Laseranwendung.

Die Kernkompetenzen des Fraunhofer ILT umfassen die Entwicklung neuer Laserstrahlquellen und -komponenten, Lasermess- und Prüftechnik sowie Laserfertigungstechnik.

1

Hierzu zählen beispielsweise das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie das Oberflächenvergüten, die Mikrofertigung und das Additive Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik. Das Leistungsspektrum reicht von Machbarkeitsstudien über Verfahrensqualifizierungen bis hin zur kundenspezifischen Integration von Laserprozessen in die jeweilige Fertigungslinie.

Das Fraunhofer ILT ist eingebunden in die Fraunhofer-Gesellschaft, die mit 72 Instituten, mehr als 26 600 Mitarbeitern und 2,6 Milliarden Euro Forschungsvolumen jährlich zu den bedeutendsten Forschungseinrichtungen in Deutschland gehört.

2

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT**
www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer ILT

# Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces

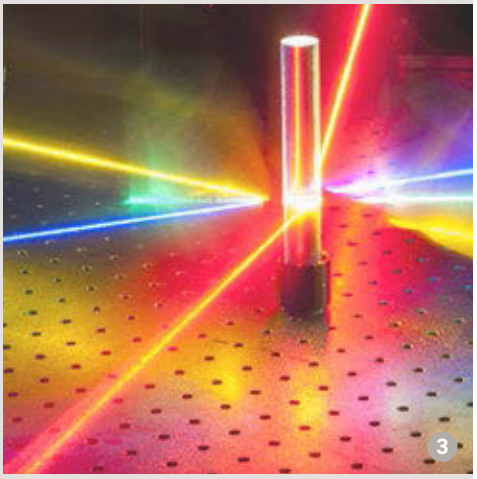
## Kompetenz durch Vernetzung

### LIGHT & SURFACES

Im Fraunhofer-Verbund »Light & Surfaces« kooperieren sechs Fraunhofer-Institute auf den Gebieten Laser-, Optik-, Mess- und Beschichtungstechnik. Basierend auf grundlegenden Arbeiten in verschiedenen Anwendungsfeldern gewährleistet der Verbund eine schnelle und flexible Realisierung kundenspezifischer Systemlösungen in diesen Bereichen.

Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Markts ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten für den Kunden. In Kooperation mit den jeweils ortsansässigen Universitäten bieten die Institute das gesamte Spektrum der studentischen Ausbildung bis hin zur Promotion.

Auf diese Weise sind die Fraunhofer-Institute nicht nur Innovationspartner für technologische Entwicklungen, sondern dienen auch kontinuierlich als Quelle des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.




1 Laserstrahlbohren von Leitschaufelsegmenten

2 Inline-Großflächenbeschichtung am Fraunhofer IST

3 Mit Hilfe nicht-linearer Frequenzkonversion lässt sich durchstimmbares Laserlicht in bislang nicht abgedeckten Spektralbereichen erzeugen

i **Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces**
www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

## KERNKOMPETENZEN DES VERBUNDS

Die aufeinander abgestimmten Kompetenzen der sechs Verbundpartner gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die unterschiedlichen Anforderungen aus den Bereichen:

- Laserfertigungsverfahren
- Strahlquellen
- Messtechnik
- Medizin und Life Sciences
- Werkstofftechnik
- Optische Systeme und Optikfertigung
- Mikro- und Nanotechnologie
- Dünnschichttechnik
- Plasmatechnik
- Elektronenstrahltechnik
- EUV-Technologie
- Prozess- und Systemsimulation

## MITGLIEDSINSTITUTE

Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP
www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
www.ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
www.iof.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
www.ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST
www.ist.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
www.iws.fraunhofer.de

4

5

6

4 Hydrophil, hydrophob strukturierte Oberfläche auf einem Edelstahlblech

5 Messung eines Spiegelmoduls mit zwei Freiformspiegeln und Referenzstrukturen durch ein computergeneriertes Hologramm

6 Flexible OLED als Design-Kit

Fraunhofer
LIGHT & SURFACES

# TEMATYS

## Explorer of Photonics Markets

**TEMATYS**

ist ein unabhängiges, mittelständisches Beratungsunternehmen, das sich mit Studien und Strategien in den Bereichen Optik, Photonik, Sensorik, Bildgebung, Werkstofftechnik und deren Anwendungsmärkten beschäftigt.

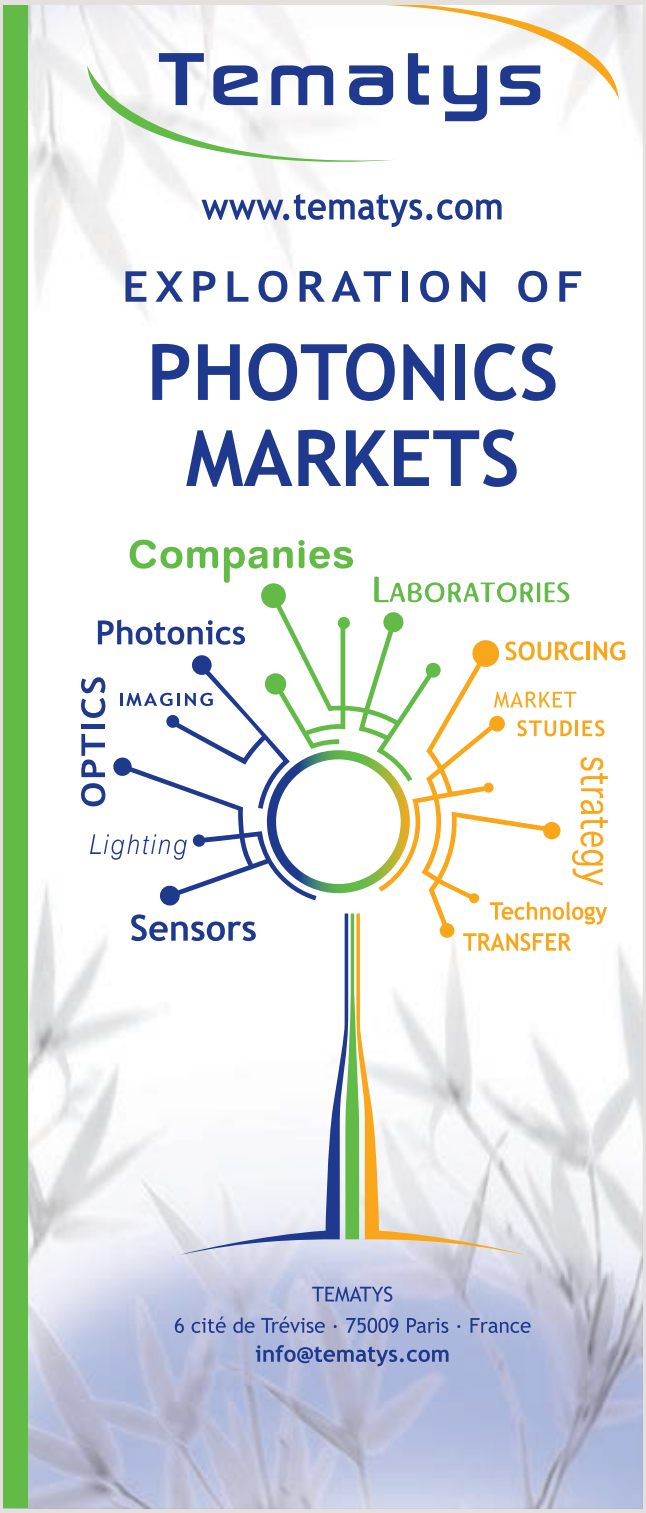
Wir verfügen über ein spezielles Know-how zum Technologietransfer, zur FuE-Verwertung sowie zur Vermarktung entstehender Technologien.

Wir begleiten die kritischen Schritte des Produktentwicklungsprozesses und bieten dabei Dienstleistungen an, die über Marktstudien hinausgehen. Ein Beispiel dafür sind Kundenbedürfnisanalysen zur zielgenauen, nachfrageorientierten Entwicklung von Produkten.

In zahlreichen Anwendungsmärkten der oben beschriebenen Technologien bieten wir Endnutzern passgenaue Marktinformationen und Beschaffungsdienstleistungen. Beispiele hierfür sind etwa die Bereiche Life Science, Sicherheit oder Luftfahrt.

Verbänden, Branchenclustern und öffentlichen Einrichtungen bietet TEMATYS Informationen zur strategischen Entscheidungsfindung.

Zu unseren mehr als 150 internationalen Kunden in Europa, Asien und den USA zählen unter anderem Forschungsorganisationen, öffentliche Institutionen, Konzerne, Industriekonsortien, KMUs und Start-ups.




**TEMATYS**
6 cité de Trévise | 75009 Paris | Frankreich
www.tematys.com | info@tematys.com
Telefon: +33 6 74 64 52 21

Tematys
*Exploration of photonics markets*

# BILDNACHWEIS

**Titel- u. Umschlagseiten** | ©GDE
**Seite 3** | ©Messe München GmbH
**Seite 4** | ©ZEISS (Ohnesorge); ©SPECTARIS (Mayer)
**Seite 6** | ©Fraunhofer ILT, Aachen (Poprawe); ©Jeibmann Photographik/Torsten Proß (Traeger)
**Seite 7** | ©ZEISS (Ohnesorge); ©Anne Günther/FSU (Tünnermann); ©Fraunhofer IPM (Buse); ©Berliner Glas KGaA Herbert Kubatz GmbH & Co. (Nitze);
**Seite 8** | ©TOPTICA Photonics AG (Kaenders); ©Laser Zentrum Hannover (Kracht)
**Seite 9** | ©Adobe Stock/thingamajiggs
**Seite 12** | ©RWTH Aachen University, Peter Winandy (Poprawe); ©Adobe Stock/Avector
**Seite 13** | ©Fraunhofer ILT, Aachen; ©Adobe Stock/photlook
**Seite 14** | ©Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert; ©CNES | Illustration David DUCROS
**Seite 15** | ©Adobe Stock/vladimirfloyd
**Seite 16** | ©Adobe Stock/electriceye; ©Fraunhofer ILT, Aachen
**Seite 18** | ©Adobe Stock/Duncan Noakes; ©Adobe Stock/blue-bay2014; ©Adobe Stock/Thinapob; ©Adobe Stock/Maksim Pakso
**Seite 20** | ©Adobe Stock/Thinapob
**Seite 21** | ©Adobe Stock/Khunatom
**Seite 22** | ©Adobe Stock/afishman64
**Seite 23** | ©Adobe Stock/Thomas Söllner
**Seite 24** | ©Adobe Stock/Vitaly Krivosheev
**Seite 25** | ©Adobe Stock/dugudun
**Seite 26** | ©Adobe Stock/Kadmy
**Seite 27** | ©Adobe Stock/iaremenko
**Seite 31** | ©Adobe Stock/adiruch na chiangmai; ©Adobe Stock/style67; ©Adobe Stock/metamorworks; ©Adobe Stock/malp; ©Adobe Stock/red150770; ©Adobe Stock/scharfsinn86
**Seite 32** | ©Adobe Stock/adiruch na chiangmai
**Seite 34** | ©Clean-Lasersysteme GmbH (Büchter)
**Seite 36** | ©Fraunhofer ILT, Aachen
**Seite 38** | ©Fraunhofer ILT, Aachen (1, 3); ©Clean-Lasersysteme GmbH (2)
**Seite 40** | ©Adobe Stock/Aleksandr Volkov (1); ©Fraunhofer ILT, Aachen (2); ©GDE (3)
**Seite 42** | ©CNES | Illustration David DUCROS (1); ©Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert (3); ©CNES/DLR (2)
**Seite 44** | ©ESA
**Seite 46** | ©Adobe Stock/style67
**Seite 48** | ©Adobe Stock/metamorworks
**Seite 50** | ©Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert (1, 2); ©Adobe Stock/mister767 (3)
**Seite 52** | ©Adobe Stock/Nataliya Hora (1); ©Fraunhofer ILT, Aachen (2, 3)
**Seite 54** | ©Adobe Stock/christophe morgado (1); ©Fraunhofer IOF (2, 3)
**Seite 56** | ©Fraunhofer ILT, Aachen
**Seite 58** | ©Fraunhofer IPM (1, 2); ©DB Netz AG (3)
**Seite 59** | ©Adobe Stock/Ilhan Balta (4); ©Adobe Stock/Frank Krautschik (5)
**Seite 60** | ©AVL Emission Test Systems GmbH (1); ©Fraunhofer IPM (2, 3)
**Seite 62** | ©Adobe Stock/malp
**Seite 64** | ©Adobe Stock/artjazz (1); ©Fraunhofer ILT, Aachen (2, 3)
**Seite 66** | Fraunhofer ILT, Aachen (1, 2); ©Adobe Stock/stockmorrison (3)
**Seite 68** | ©Adobe Stock/red150770
**Seite 70** | ©Fraunhofer ILT, Aachen (1, 3); ©Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert (2)
**Seite 72** | ©Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert (1); ©Fraunhofer ILT, Aachen (2, 3)
**Seite 74** | ©Fraunhofer ILT, Aachen
**Seite 76** | ©LIMO GmbH
**Seite 77** | ©LIMO GmbH
**Seite 78** | ©Fraunhofer IPM
**Seite 80** | ©Adobe Stock/scharfsinn86
**Seite 82** | ©Laser Zentrum Hannover e. V.
**Seite 83** | ©August Falkner/Piclease
**Seite 84** | ©IQ wireless GmbH
**Seite 85** | ©IQ wireless GmbH
**Seite 87** | ©Messe München GmbH
**Seite 88** | ©SPECTARIS
**Seite 89** | ©Fraunhofer ILT, Aachen (1); ©Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert (2)
**Seite 90** | ©Fraunhofer ILT, Aachen (1); ©Fraunhofer IST (2); ©Fraunhofer IPM (3)
**Seite 91** | ©Fraunhofer IWS (4); ©Fraunhofer IOF (5); ©Fraunhofer FEP (6)
**Seite 92** | ©TEMATYS GmbH

## IMPRESSUM

1. Auflage, Berlin/München | Juni 2019

**Herausgeber**

SPECTARIS | Messe München GmbH

**Gestaltung**

GDE | Kommunikation gestalten | www.gde.de

## HAFTUNGSAUSSCHUSS

Die Informationen, Daten und Berechnungen dieser Studie wurden mit größter Sorgfalt erstellt. Sie basieren auf den Angaben der in der Studie genannten Institutionen, Firmen und weiteren Quellen. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität dieser Angaben können die an der Erstellung der Studie beteiligten Partner, die Messe München GmbH, SPECTARIS, das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, der Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces und TEMATYS (im folgenden „Projektpartner" genannt), aber keine Gewähr übernehmen.

Eine Überprüfung der tatsächlichen Rechteinhaberschaft und der damit verbundenen Verwertungsrechte der in der Studie genannten Institutionen und Firmen erfolgte durch die Projektpartner nicht. Eine Gewähr und eine hiermit möglicherweise verbundene Haftung werden durch die Projektpartner insoweit nicht übernommen. Sollten durch die Studie dennoch Rechter Dritter verletzt worden sein, so geschah dies ohne Kenntnis und ohne Absicht der Projektpartner.

Im Falle der Kenntniserlangung solcher Verstöße werden diese durch die Projektpartner nach entsprechender Rücksprache mit der jeweiligen Firma oder dem jeweiligen Institut zukünftig aus der Studie entfernt. Für den Inhalt von Gastbeiträgen ist trotz sorgfältiger Prüfung der jeweilige Verfasser verantwortlich. Die Inhalte von Gastbeiträgen spiegeln nicht zwangsläufig die Meinung der Projektpartner wider.

## UNERLAUBTE VERVIELFÄLTIGUNG DER STUDIE

Die Vervielfältigung der Studie (ganz oder in Auszügen) und die Verwendung der in der Studie enthaltenen Bilder ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung der Herausgeber bzw. der Inhaber der jeweiligen Bildrechte erlaubt. Die Veröffentlichung von Ergebnissen mit Quellenangabe ist zulässig.

Klimaneutral Druckprodukt
ClimatePartner.com/10704-1906-1011

Gedruck auf Papier aus nachhaltiger Waldwirtschaft (FSC)

Eine Studie von
Messe München
SPECTARIS
Verband der Hightech-Industrie
in Kooperation mit
Fraunhofer
ILT
Fraunhofer
LIGHT & SURFACES
Tematys
Exploration of photonics markets