

LASER COMMUNITY.

Über Menschen und Photonen

DER CHIP- INDUSTRIE GEHT EIN LICHT AUF

Mikrochip-Fertigung
bis Quantenprozessor:
Die Zukunft des Computings
steckt im Photon.



Liebe Leserinnen und Leser,

Künstliche Intelligenz, vernetzte Fabriken und autonomes Fahren – unsere Alltags- und Berufswelt wandelt sich rasant. Möglich machen das immer leistungsfähigere Mikrochips. Diese effizient herzustellen, ist die große Herausforderung der Chip-Industrie. TRUMPF arbeitet seit vielen Jahren eng mit den führenden Unternehmen dieser Branche zusammen. Auch deshalb haben wir den Chips diese Ausgabe der *Laser Community* gewidmet. Zahlreiche Innovationssprünge sind hier oft nur dank Photonik und Lasertechnik möglich. Ein sehr bekanntes Beispiel dafür ist die EUV-Technologie. Wo der Laser in der Chip-Branche außerdem zum Einsatz kommt und welche Neuerungen wir hier in den kommenden Jahren erwarten dürfen, lesen Sie *ab Seite 12*.

Einem anderen, aber nicht weniger spannenden Einsatzbereich für unsere Laser gehen wir *ab Seite 18* nach: Weltraumschrott. Prallen größere Teile auf Satelliten, können ganze Kommunikationsnetzwerke auf der Erde ausfallen. Treffen sie auf die Raumstation ISS, könnte es zur Katastrophe kommen. Wie Laser Trümmerteile von ihrem Kollisionskurs abbringen, lesen Sie im Interview mit Wolfgang Riede vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Zusammen mit seinem Team arbeitet er täglich daran, das All von herumfliegenden Teilen zu befreien.

Atommüll beseitigen können Laser in absehbarer Zeit zwar noch nicht, wohl aber schon bald Atommüllfässer durchleuchten. Warum das wichtig ist? Über 126.000 nukleare Abfallbehälter liegen allein im niedersächsischen Zwischenlager Asse. Dort muss der nukleare Abfall früher oder später wieder raus. Eine gefährliche Aufgabe, denn bei vielen Fässern weiß niemand, was genau drin ist und wie stark und wie lange der Inhalt noch strahlt. Röntgenstrahlen können diese Fässer nicht durchleuchten. Deswegen arbeitet TRUMPF gemeinsam mit Focused Energy, RWE und weiteren Partnern daran, dieses Problem zu lösen. Wie das mithilfe von Lasertechnik gelingen kann, lesen Sie *ab Seite 24*.

Dass Laser ihre Stärken insbesondere auch im Industrialltag unter Beweis stellen, zeigt das Joint Venture EKPO. Das Partnerunternehmen von ElringKlinger und OPmobility sorgt für die Power von Brennstoffzellen. Brennstoffzellen wiederum sorgen in Autos, Lkw, Bussen, aber auch in der Zug- und Schifffahrt für Antrieb. Kernkomponenten dieser Brennstoffzellen sind Bipolarplatten. Diese dünnen Metallfolien zu schweißen, erfordert höchste Präzision und gelingt am besten mit unseren Faserlasern. Warum die Lasertechnik hier besonders hilft, die Mobilitätswende voranzubringen, zeigen wir *ab Seite 26*.

Viele Anregungen und viel Freude beim Lesen dieser Ausgabe wünscht Ihnen Ihr

LASER COMMUNITY. #40

AUSGABE Sommer 2025 **HERAUSGEBER** TRUMPF SE+Co. KG, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen, Deutschland; www.trumpf.com
V.I.S.D.P. UND CHEFREDAKTION Gabriel Pankow, Telefon +49 7156 303-31559, gabriel.pankow@trumpf.com
VERTRIEB Telefon +49 7156 303-31559, gabriel.pankow@trumpf.com, www.trumpf.com/de_DE/newsroom/kundenmagazine
REDAKTION Die Magaziniker GmbH, Stuttgart, Florian Burkhardt, Martin Reinhardt **AUTOREN** Florian Burkhardt, Thilo Horvatitsch, Martin Reinhardt, Carolin Schlegel, Sebastian Stamm **FOTOGRAFIE UND ILLUSTRATION** Tobias Gerber, Christoph Kalscheuer, Jeannette Petri, Bryan Tarnowski, Gernot Walter **GESTALTUNG UND PRODUKTION** Die Magaziniker GmbH, Stuttgart, Gernot Walter (AD), Martin Reinhardt **ÜBERSETZUNG** Apostroph Group, Hamburg **REPRODUKTION** raff digital, Riederich **HERSTELLUNG** W. Kohlhammer Druckerei GmbH+Co. KG, Stuttgart

Illustration Titelseite: Die Magaziniker & AI; Foto Seite 2: Gernot Walter

Julian Rentzsch

DR. RER. NAT. HAGEN ZIMER

Chief Executive Officer Laser Technology
Mitglied des Vorstands der TRUMPF SE+Co. KG

**Achso**

Okay, wir geben es zu, auch die Redaktion fiel drauf rein. Als die Falschmeldung grasierte, es gäbe ein Foto eines Photons, waren wir begeistert. Bis dann auch bei uns der Verstand wieder einsetzte: **Seite 10**.

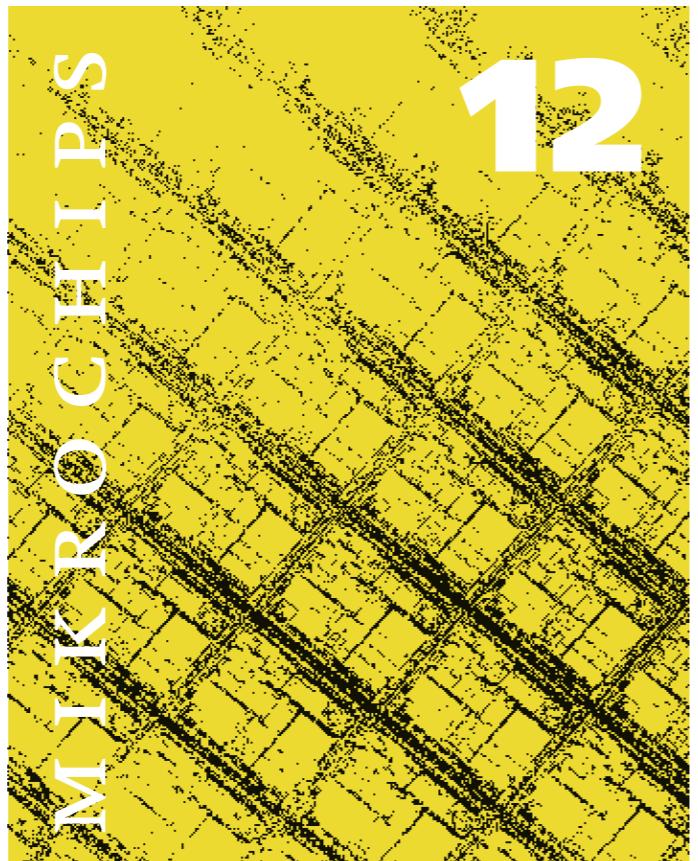
**Achja**

2013 sagten wir in der *Laser Community* Laserverfahren für Mikrochips voraus, die heute alle Standard sind. Mal schauen, ob es wieder klappt: ab **Seite 12**.

**Maya**

Astronomie, Chemie, Kunstgeschichte – schon viele Wissenschaften haben von Lasertech profitiert. Jetzt auch die Archäologie und die Maya-Forschung auf **Seite 26**.

LASER COMMUNITY.



18 WELTRAUMSCHROTT

Bryan Tarnowski, Clemens Walter, Benjamin Yuen

Fraunhofer ILT / Ralf Baumgarten, Die Magaziniker & Al, Bryan Tarnowski
Jeannette Petri, TRUMPF

THEMA**12 RECHNEN = LASER**

In der Mikrochip-Industrie wird's immer verrückter. Lasertechnologie hilft ihr dabei, nicht durchzudrehen und immer wieder neue Chip-Generationen zu meistern.

6 Pack die Power aus!

Ein neuer, kraftstrotzender Ultrakurzpuls laser muss für die Industrie gezähmt werden. Das übernehmen die Dompteure vom Fraunhofer ILT.

10 POWER

Schlagen Sie diese Seite auf, wenn Sie kein Photon sehen wollen.

11 GLORY

Nobelpreisträger: vom Blaulicht zum UV-Licht.

18 „Bisher gibt es für Weltraumschrott nur Notnagel-Verfahren. Aber jetzt haben wir die Lösung gefunden!“

Wolfgang Riede vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt erklärt uns das Laserschubsen.



6 PROJEKT UKP



23 ATOMMÜLL



26 ARCHAEOLOGY

23 Durchblick beim Atommüll

Kann bitte mal jemand nachschauen, was genau in diesen nuklearen Fässern ist?

26 AHEAD

LIDAR öffnet ein Fenster in die versunkene Kultur der Maya.

28 Die Straße zum Erfolg

Die Mobilitätswende via Brennstoffzelle hängt am Faserlaser.

30 LASERLAND

So lasert Südkorea.

31 WO STECKT DER LASER?

Um Real Madrid herum.

Dennis Haasler vom Fraunhofer ILT
wirft zusammen mit ...

... Steffen Rübling von TRUMPF einen ersten
Blick in den neuen Kilowatt-UKP-Laser.

PACK DIE POWER AUS!

Ein neuer, extrem starker Ultrakurzpuls laser steht bereit. Aber wie bändigt man dessen ungeheure Kraft für die industrielle Materialbearbeitung? Und wofür kommt die Strahlquelle überhaupt in Frage? Ein Team am Fraunhofer ILT kennt die Antworten.



Unzählige Branchen sehnen sich nach leistungsstarken Ultrakurzpulslasern (UKP): Batterie- und Brennstoffzellenindustrie, der Werkzeugbau, Luft- und Raumfahrttechnik, Halbleiterproduktion und so weiter und so fort. Überall dort, wo jemand hochgenau strukturieren, feinbohren oder großflächig abtragen möchte, gelingt das am präzisesten und materialschonendsten mit UKP-Lasern. Doch leider ist die Welt kein Paradies: Die UKP-Ergebnisse sind zwar bestens. Der Prozess ist aber für einige Anwendungen zu langsam und daher nicht wirtschaftlich genug. Schon so manches erträumte Produkt ist an dieser Hürde hängen geblieben.

Wenn's schneller werden soll, gibt es in der Lasertechnologie ein bewährtes Rezept: eine Strahlquelle mit mehr Power! Dennis Haasler ist Experte für Prozesstechnik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT. Er sagt: „Viele Anwendungen schreien geradezu nach höherer mittlerer Leistung, damit sich der Einsatz von UKP-Lasern rechnet.“



„Viele UKP-Anwendungen schreien geradezu nach höherer mittlerer Leistung.“

Dennis Haasler, Fraunhofer ILT

Einer der Versuche:
Highspeed-Abtrag
einer Polymermatrix bei
Compound-Bipolarplatten
für die Brennstoffzelle.



Haasler und sein Team haben seit Sommer 2024 einen kraftstrotzenden Gast in ihrem Labor: Das Vorabmodell des TruMicro 9000, der demnächst auf den Markt kommt. Der neue Laser von TRUMPF verfügt über ein Kilowatt mittlere Leistung – ein Vielfaches dessen, was für industrielle UKP-Anwendungen bislang verfügbar ist. Die Ingenieure am Fraunhofer ILT haben es sich zur Aufgabe gemacht, herauszufinden, wie sich der Hochleistungs-UKP-Laser am besten für verschiedene Branchen nutzbar machen lässt. „Bei so einem riesigen Leistungssprung müssen wir Bearbeitungsstrategien und Prozesstechnologien überdenken und neu ausprobieren“, sagt Haasler. Mit so viel mehr Power kommen auch neue Herausforderungen.

UNGEZÄHMTER HENGST „So ein Kilowatt-Laser ist erstmal ein bisschen wie ein ungezähmter Hengst“, beschreibt Haasler die Anfangszeit des Projekts. Die hohe mittlere Leistung bringt Dinge mit sich, die man aus der UKP-Welt bislang nicht kennt. „Was bei zehn Watt UKP-Leistung noch egal war, etwa ein Staubkorn auf einem beschichteten Umlenkspiegel, bringt einem bei einem Kilowatt buchstäblich die Optik zum Platzen.“

Mit der Leistung wächst die Komplexität: Die Experten kapseln den Strahlengang sicher ein, um ihn vor Dreck zu schützen, und überwachen zusätzlich die Strahlführung. Bei hoher mittlerer Leistung kann es zudem in den Optiken zu thermischen Effekten kommen, die den Fokus ablenken. Das umgehen die ILTler durch geschickte Steuerung. Und wer hochproduktiv viel Material in extrem wenig Zeit abträgt, der stolpert plötzlich über seinen eigenen Erfolg. „Manchmal hat das Abtragprodukt schlicht nicht genug Zeit zu verschwinden und der nächste Laserpuls trifft primär auf Rauch und Staub – nicht mehr aufs Zielmaterial.“

Das Team am Fraunhofer ILT hat systematisch untersucht, wie sich solche Effekte vermeiden oder beherrschen lassen. Zu den Lösungen gehören optimierte Scannerpfade, Crossjets und Absaugungen, angepasste Bearbeitungsstrategien sowie diverse Systemtechnikstrategien.

Und wie nutzt man jetzt die neue UKP-Power am besten? „Immer nur punktuell“, sagt Haasler. Das ist keine bittere Enttäuschung, sondern das, was der Gruppenleiter eh erwartet hat. „Viele Prozesse lassen sich nicht kontinuierlich mit voller Leistung fahren. Häufig ist der Laser nur

einen Bruchteil der Zeit wirklich an. Zum Beispiel, weil der Scanner erst beschleunigen, springen oder abbremsen muss. Aktuelle Hardware ist häufig noch nicht schnell genug.“ Der sogenannte Duty Cycle, also der effektive Nutzungsgrad der Laserleistung, liegt teils nur bei 10 bis 20 Prozent.

Abhilfe schaffen vier Strategien. Die sogenannte Burst-Technologie etwa setzt mehrere Pulse ultrakurz hintereinander ab, was zu mehr Materialabtrag führt. Beim Optical Stamping wird das gewünschte Bearbeitungsmuster direkt in die Strahlform integriert – ein Licht-Stempel sozusagen, der ganze Strukturen auf einmal ins Material „drückt“, statt die Struktur mit einem kleinen Spot nachzuzeichnen. Mit rotierenden Polygon-Scannern kann man bei der Pulsfrequenz richtig aufdrehen, weil sie eine extrem hohe Ablenkrate haben. Sprich: Die Polygon-Scanner lenken die Pulse viel schneller ab als normale Scanner. Und durch Parallelisierung mit Multistrahloptiken kann ein einzelner superkärfiger Laserstrahl in viele mittelkräfige Teilstrahlen aufgeteilt werden. Damit lassen sich etwa hunderte Löcher gleichzeitig bohren. „Das sind die vier Grundstrategien, die wir je nach Anwendung kombinieren.“

WEM NÜTZT DAS? Am Ende geht es um echte Anwendungen. Und da hat das Fraunhofer-Team bereits beachtliche Ergebnisse vorzuweisen: Etwa bei der Mikrostrukturierung von Batterie-Elektroden, wo der Laser 12 Millionen winzige Löcher pro Minute erzeugt. Oder beim Highspeed-Schneiden von Folien, Wafern, Papier, Stoffen oder Displays. Auch die selektive Entschichtung von Bipolarplatten für Brennstoffzellen gelingt im Labor bereits mit hoher Flächenrate. Für mögliche Anwendungen in der Lebensmittel- und Displayindustrie werden jetzt extrem feine Filter möglich. Der neue TruMicro bohrt 900 solcher Minilöcher auf einen Schlag.

Haasler zieht Zwischenbilanz: „Zusammen mit TRUMPF haben wir den Kilowatt-UKP-Laser für die Industrie nutzbar gemacht. Und wir haben noch viele Ideen, für welche Anwendungen wir ihn noch einsetzen können.“ ■

Kontakt: Dennis Haasler, Fraunhofer ILT,
Telefon: +49 241 8906-8321, dennis.haasler@ilt.fraunhofer.de

4 STRATEGIEN, DIE UKP-POWER ZU BÄNDIGEN

01

BURSTS

Ein Bündel kräftiger Pulse, danach eine kurze Pause; erhöht den Materialabtrag.

02

FOKUS-STEMPTEL

Die Intensitätsverteilung des Fokus' wird so eingestellt, dass der Laser ganze Strukturen auf einmal bearbeitet.

03

POLYGON-SCANNER

Der rotierende Scanner verteilt hochfrequente Pulse sehr schnell über Werkstück; erhöht die Geschwindigkeit.

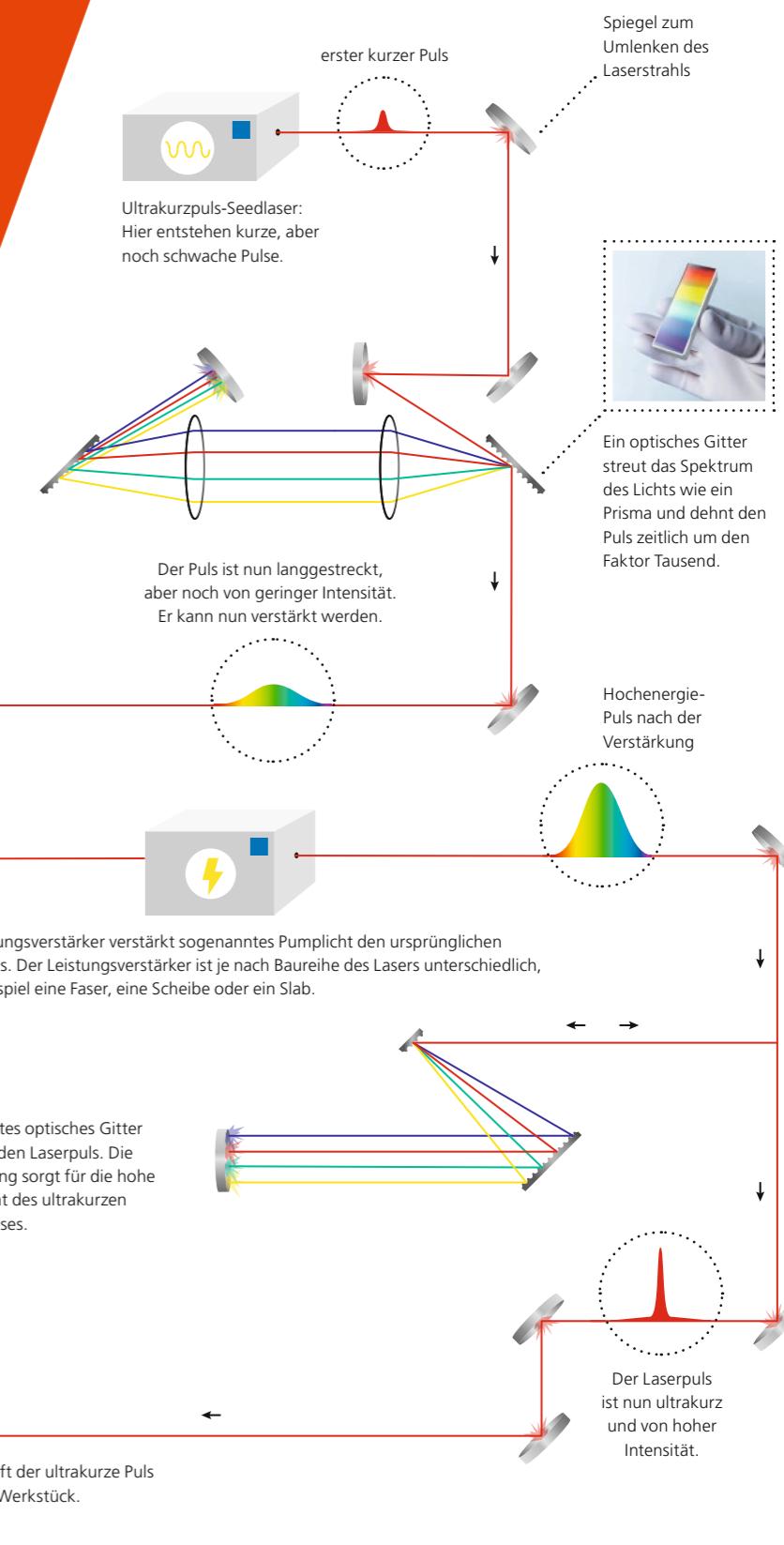
04

MULTI-BEAM

Die Optik teilt den Laserstrahl auf viele Spots auf; so gelingen bis zu 900 Bohrungen gleichzeitig.

UKP-Laser haben einst die Feinbearbeitung und Oberflächenstrukturierung revolutioniert (siehe rechts). Jetzt bekommen sie noch mehr Kraft (siehe links).

SO FUNKTIONIERT EIN UKP-LASER



POWER

Lichtbote,
wo bist du?
Dieses Bild einer
Intensitäts-
verteilung zeigt,
wie wahrscheinlich
es ist, ein Photon
anzutreffen.

DIES IST KEIN PHOTON

Für einen kurzen Moment dachte die Welt, es gäbe das erste Foto eines Photons.
Falsch gedacht – macht aber nichts. Denn das, was Sie hier sehen, sorgt bald für bessere
Quantencomputer und Fortschritte in der Lasertechnologie.

In der Wissenschaft passieren oft große Durchbrüche, wenn Forscher eigentlich nach etwas anderem suchen. So erging es einem Team der University of Birmingham. Sie wollten herausfinden, wie Atome und Moleküle Photonen emittieren. Dafür entwickelten sie ein komplexes mathematisches Modell, das die Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie erst stark vereinfacht und dann simuliert. Als unbeabsichtigtes Nebenprodukt entstand dieses zitronenähnliche Bild – eine Visualisierung der Form eines Photons. Zum ersten Mal in der Physik! Vielleicht aus Freude über diese Weltneuheit machte die Presse schnell ein Photonen-Foto daraus. Zugegeben, für Laien klingt das nach keinem großen Unterschied – ist es aber: Das Bild zeigt nicht die physische Erscheinung eines Photons, sondern nur die Verteilung seiner Wahrschein-

lichkeit. Also mit welcher Wahrscheinlichkeit die Forscher während einer Messung das Photon an einem bestimmten Ort und in einem bestimmten Zustand antreffen. An den hellen Stellen ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon dort während einer Messung erscheint, höher. Die Zitrone ist also definitiv kein Bild eines Photons. Das macht aber nichts: Das Verständnis dafür, wie Licht und Materie miteinander interagieren, ist durch die Studie größer als je zuvor. Und das hilft Wissenschaftlern dabei, genau dieses Zusammenspiel gezielt zu beeinflussen und damit noch leistungsfähigere Technologien zu entwickeln. Abhörsichere Kommunikationssysteme zum Beispiel, oder gar optische Sensoren, die Krankheitserreger erkennen. Quantencomputer werden besser – und natürlich gibt es schon einige spannende Ideen für die Lasertechnologie. ■

Benjamin Yuan

LASER COMMUNITY #40

GLORY

HIROSHI KANN'S NICHT LASSEN

Hiroshi Amano ist Miterfinder des LED-Lichts und bekam dafür 2014 den Nobelpreis. Jetzt entwickelt er das nächste große Ding.

Schon in den 1980er Jahren weiß jeder, dass Licht aus Leuchtdioden (LED) zigfach effizienter wäre als aus Glühbirnen oder Leuchtstoffröhren. Allein: Am Blau beißen sich alle die Zähne aus. Alle anderen Farben gehen schon, aber für ein schönes weißes Licht braucht man noch eine Blaubeimischung.

Drei japanische Forscher bleiben hartnäckig und haben teils unabhängig voneinander die richtigen Einfälle, die sich zu einem strahlenden Ganzen fügen: blauem LED-Licht. Die LEDs treten jetzt ihren Siegeszug über die ganze Welt an. Das Nobelpreiskomitee zeichnet die drei Wissenschaftler 2014 für ihren Durchbruch aus. Einer davon ist Hiroshi Amano.

Statt in den Ohrensessel zu sinken und seinen Ruhm zu genießen, geht der 1960 geborene Amano weiterhin jeden Tag ins Labor. Sein nächstes großes Projekt: Laserdioden für tief-ultraviolettes Licht (DUV). Dieses Licht ist deshalb so spannend, weil es Viren und Bakterien zerstört. Flächen wie OP-Tische und sogar Raumluft oder Trinkwasser lassen sich damit extrem einfach desinfizieren. Die ersten DUV-Dioden funktionieren bereits, könnten aber effizienter sein. Hiroshi Amano bleibt dran. ■

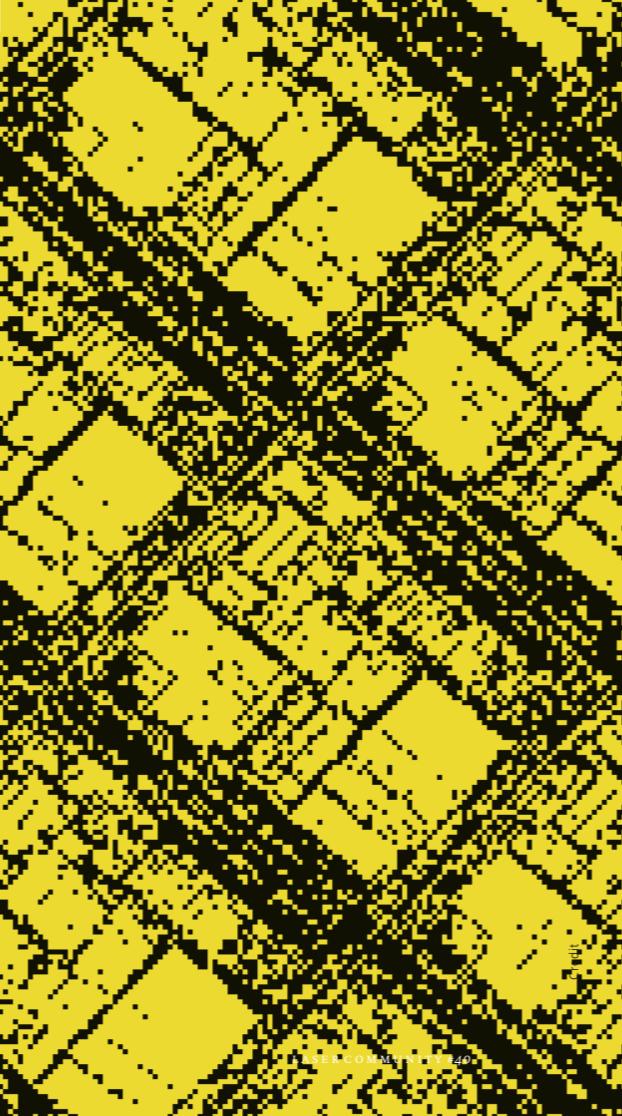
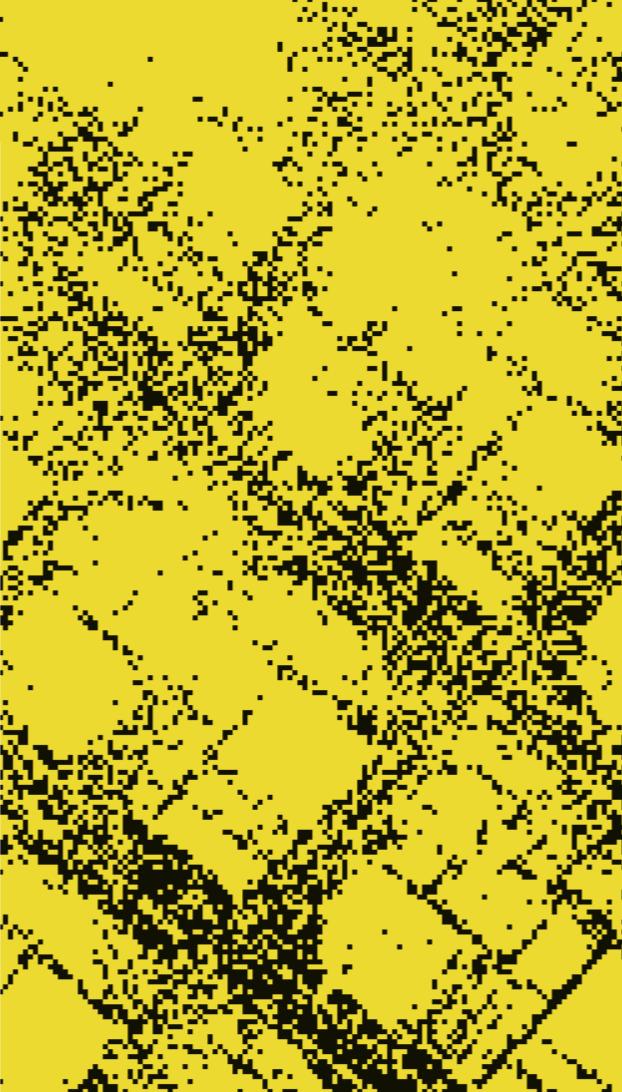
Hiroshi Amano ist
Physiker an der
japanischen Nagoya
Universität. Auf
diesem Foto von 2014
zeigt er seine erste
große Erfindung:
blaue LEDs.

Jiji Press Photo

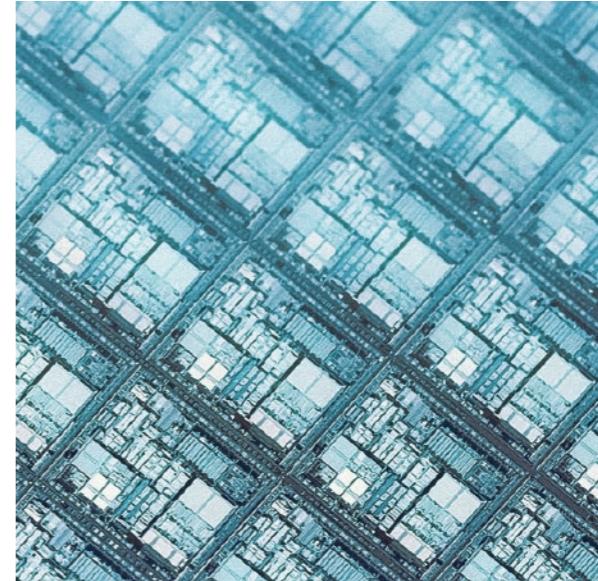
LASER COMMUNITY #40

rechnen = laser

An kaum etwas wird so hart gearbeitet wie daran, die Rechenkraft von Mikrochips zu steigern. Fortschritte in der Lasertechnologie spielen dafür eine immer größere Rolle. Blick und Ausblick auf die vier wichtigsten Entwicklungssprünge.



TRUMPF



01

DIE EUV-SAGA — ODER: DER CO₂-LASER RETTET DEN FORTSCHRITT

Der CO₂-Laser ist auf dem absteigenden Ast, dachten alle. Der gute alte Arbeitsgaul der 1990er Metallbearbeitung wirke inzwischen etwas klobig und steif, denn sein Licht mag nicht durchs Laserlichtkabel. Die Metaller neigen Anfang der 2000er nach und nach zu jüngeren und geschmeidigeren Laserkonzepten wie etwa Scheiben- und Faserlasern, die mehr Flexibilität versprechen. Nur noch dort, wo es wirklich hart und dreckig zur Sache geht, findet der CO₂-Laser sicheren Unterschlupf.

Da naht um 2005 herum die Rettung aus der wohl unwahrscheinlichsten Ecke: Ausgerechnet die filigrane und reinliche Halbleiterindustrie schaut sich den getreuen Grobian CO₂-Laser einmal genauer an. Er soll helfen, das stets wiederkehrende Problem der Chip-Architekten zu lösen: Wie kriege ich mehr Rechenkraft auf weniger Platz unter? Oder anders: Wie schrumpft der Mikrochip? Die Idee ist, extrem kurzwelliges ultraviolettes Licht (EUV) zu verwenden, um damit noch winzigere Transistorstrukturen auf Silizium-Wafern zu belichten (Lithografie). Aber wie kommt man an das EUV-Licht?

Zum ersten Mal liefert der Laser eine neue Antwort auf die existenzielle Frage der Halbleiterindustrie.

Um es kurz zu machen: Es stellte sich heraus, dass nur hochzuverlässige High-Power-CO₂-Laser von TRUMPF den Initialstrahl liefern können, an dessen Ende industriell einsetzbares EUV-Licht entsteht. 2017 liefert der niederländische Lithografie-Gigant ASML die erste EUV-Anlage der Welt aus. Heute tragen wir alle EUV-belichtete Mikrochips in der Hosentasche oder am Handgelenk mit uns herum. Die Heldentaten der Ingenieure von TRUMPF, ASML und allen weiteren Technologiepartnern sind an anderen Stellen schon wortreich besungen worden. Der amerikanische Tech-Autor Chris Miller etwa nennt in seinem Bestseller-Standardwerk *Chip War* von 2022 die neue Belichtungsanlage „the most complex machinery ever made“. Für unsere Geschichte hier ist jedoch wichtiger: EUV ist zwar weder der erste noch der einzige Einsatz von Lasertechnologie in der Halbleiterindustrie. Aber bei EUV liefert der Laser eine neue Antwort auf die existenzielle Frage der Branche nach mehr Rechenkraft. Es wird nicht das letzte Mal so sein. ■

jüngste
Vergangenheit

02

Gegenwart



CHIPS STAPELN – ODER: GLAS STATT SILIZIUM DANK LASERKONTAKTIEREN

Wie gesagt ist es immer dasselbe: Die Halbleiterindustrie hetzt der Anforderung hinterher, immer höhere Rechenleistung auf immer kleinerem Raum zu binden. Derzeit ist dafür das sogenannte Advanced Packaging das Mittel der Wahl. Die Idee: Statt einen einzigen großen, hochintegrierten Chip zu bauen, sollen viele kleinere, spezialisierte Chips eng und effizient zu einem leistungsfähigeren Gesamtsystem zusammengeschaltet werden; also inselbegabte Teilchips für Prozessor, Speicher, Grafik oder KI-Beschleunigung. Neben den Mantras Leistung und Kompaktheit hat das den Sinn, die thermische Last in den Chips geschickter zu verteilen. Sie überhitzen nicht, auch wenn sie mal richtig viel Rechenleistung liefern. Um die Signalwege zu verkürzen und damit die Rechengeschwindigkeit zu beschleunigen, gehen Hersteller wie Nvidia oder TSMC zusätzlich dazu über, die Spezial-Chips aufeinanderzustapeln, statt neben-einanderzulegen.

Es stellt sich aber die Frage:

Wie können die Hersteller die Chip-Stapel prozesssicher mit-einander kontaktieren? Auftritt Laser: Hochpräzise Ultrakurzpuls-laser bohren sogenannte Vias, also Verbindungslöcher, ins Trägermaterial, auf dem die Chips hocken (in der Fachsprache wird dieser Boden Interposer genannt). Die Löcher werden später mit Metall gefüllt, um die Chip-Ebenen elektrisch zu kontaktieren.

Die neueste Lasertechnologie eröffnet darüber hinaus eine weitere charmante Möglichkeit. TRUMPF und die Schmid

Warum eigentlich nicht günstiges Glas statt teurem Silizium? Mit Laser ist das möglich.

Group, ein Glas- und Elektronikspezialist aus dem süddeutschen Freudenstadt, haben sich zusammengetan und über den Chip-Boden frisch nachgedacht. Statt dafür wie bislang üblich teures Silizium zu verwenden, greifen sie eine in der Branche umhergeisternde Idee auf: Könnte man als Chip-Boden nicht einfach günstiges Glas nehmen? Glas hat ziemlich genau dieselben thermischen Eigenschaften und eine ähnlich hohe Ebenheit wie Silizium, es ändert sich also nix in der rechnenden Praxis.

Leider ist die Effizienz der Bearbeitung das Problem. Doch die beiden Entwicklungspartner greifen zur mathematisch hochkomplexen Wellenoptik, die TRUMPF seit Jahren aus dem Effeff beherrscht. Damit ist es null problema, Bohrlöcher per Laser extrem schnell in Glas einzubringen bei gleichzeitig höchster Qualität, sogenannte Through Glass Vias. Das ist aber noch nicht alles, wenn Glas das Silizium ablöst.

So. Jetzt dürfen wir alle mal kurz durchschnaufen, denn das hier versteht jedes Schulkind: Mikro-

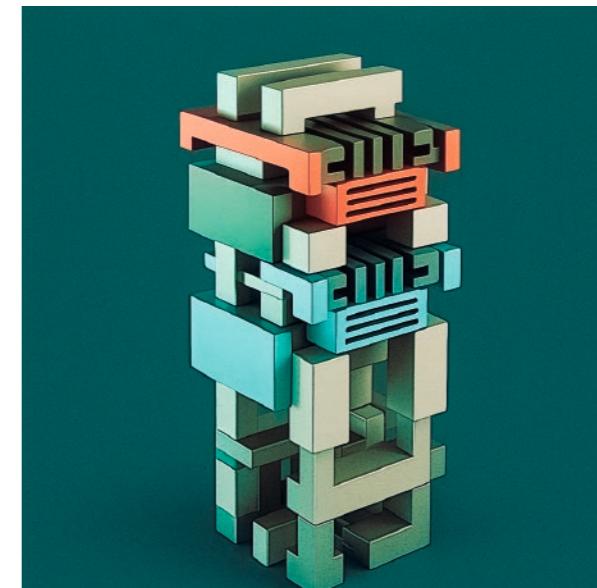
chips sind der Sache nach eine eckige Angelegenheit. Siliziumscheiben wachsen aber aus chemischen Gründen nur rund. Wenn man rechteckige Strukturen auf einen kreisrunden Boden baut, bleiben immer unbenutzte Reste übrig, die danach weggeschmissen werden. Glas hingegen lässt sich problemlos eckig herstellen; ein Blick zum Fenster beweist es. Verwendet man also beim Advanced Packaging billiges, eckiges Glas als Chip-Boden statt teurem, rundem Silizium, spart man bei gleicher Qualität dreifach: günstigeres Material, mehr Ausbeute, kaum Abfall. ■

TRUMPF

Die Magaziniker & Al

03

nahe Zukunft



3D-ARCHITEKTUR VON TRANSISTOREN – ODER: LASERMETROLOGIE FÜR FORTGESCHRITTENE

Niemand weiß so exakt, was er die kommenden Jahre tun wird, wie die schlauen Köpfe aus der Halbleiterindustrie. Die Pläne für neuartige Mikrochips, Roadmaps genannt, liegen oft viele Jahre lang in den Schubladen und bauen allesamt aufeinander auf: Mit jedem Schritt wird es komplizierter, mit jedem Sprung landet man stets ein paar Meter jenseits der Grenze des bislang technisch Vorstellbaren. Derzeit entwickelt die Branche die sogenannte Nano-Sheet-Architektur für Transistoren, bei der das Gate, also der Steuerkontakt, komplett um den Stromkanal greift. Egal, Sie müssen nur verstehen: Heute ist das massenhaft noch nicht möglich, aber morgen werden die Transistoren dadurch leistungsstärker, kleiner und energiesparsamer – wie immer halt.

Dieses „morgen, wenn man weiß, wie“ ist zwar erst für 2027 geplant, aber irrerweise sind die Nano-Sheets irgendwie schon heute kalter Kaffee. Denn sämtliche Hersteller und potenziellen Zulieferer der Halbleiterindustrie bringen sich bereits für die übernächste Chip-Generation in Stellung: den sogenannten CFET (Complementary Field-Effect Transistor). Bei dem soll es erst ab Mitte 2030 ernst werden mit der Entwicklung. Wer wird das Rennen machen um die sicherste und produktivste Herstellungsmethode des CFET und alle Prozessschritte davor und danach?

Der CFET soll einmal eine sogenannte echte 3D-Struktur sein: Die beiden unterschiedlichen Transistorarten – für die Nerds: die p- und n-dotierten –, die bei allen FETs sonst immer nebeneinanderliegen, werden künftig platzsparend aufeinandergestapelt. Ein Transistor-türmchen. (Nicht zu verwechseln mit den Chip-Stapeln aus dem vorherigen Kapitel.) Neben hundert anderen Detailfragen zerbrechen sich die Fachleute gerade vor allem über eine den Kopf: Wie soll man beim Türmchen die Bauqualität inspizieren, wenn man doch immer steil von oben draufschaut, nur die oberste Etage sieht und die unten liegenden Transistoren unsichtbar bleiben?

Die Qualitätskontrolle nach jedem Produktionsschritt ist der Halbleiterbranche so heilig, dass sie dafür ein eigenes Wort führt: Metrologie.

Bei einem so absurdnen Produkt wie Mikrochips – einerseits stets am Rande des physikalisch Machbaren taumelnd, andererseits ein Massenartikel für Jedermann-Dinge – bedeutet der Yield, der Ertrag pro Wafer, betriebswirtschaftlich alles. Nur durch penible Metrologie lassen sich teure Fehlproduktionen vermeiden.

Es gibt mehrere Metrologie-Verfahren. Eines davon ist die OCD-Metrologie (Optical Critical Dimension). Einfach gesagt wird dabei die Transistorstruktur auf dem Wafer von oben herab mit einem breiten Spektrum an optischen Wellenlängen beleuchtet. Das zurückgestreute Licht ergibt ein wildes Muster, aus dem nur noch ein Spezial-Algorithmus schlau wird und dann entscheidet, ob's passt oder nicht.

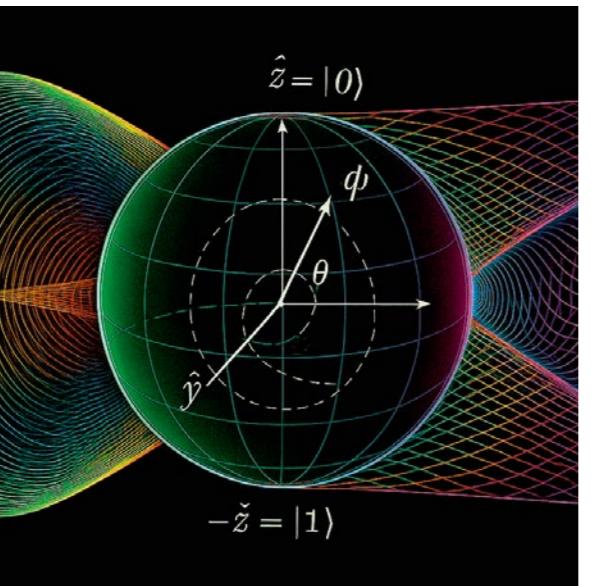
Das Problem ist jetzt, dass die heutigen OCD-Systeme nur mit Licht mit einer Wellenlänge zwischen 300 und 1.000 Nanometer arbeiten. Viel zu lang, um die etwa 20 Nanometer kleinen Strukturen der künftigen

CFETs auszumessen. In die Mini-Schluchten zwischen den Transistor-türmchen gelangen die Strahlen erst recht nicht, um auch noch die untere Struktur zu prüfen.

Die Entwickler der TRUMPF Tochter Active Fiber Systems in Jena haben sich deshalb einen Trick ausgedacht, der schon wieder so aberwitzig klingt, dass es eigentlich kaum zu glauben ist: Sie schicken einen hochfeinen Infrarot-Laserstrahl von etwa einem Mikrometer Wellenlänge aus einem TRUMPF Laser durch eine Wellenlängen-Schrumpfungs-maschine – High Harmonic Generation (HHG) genannt –, an deren Ende ein neuer, viel, viel kurzwelligerer Laserstrahl mit einem Spektrum von gut 13.5 Nanometern rauskommt. Klein genug für die CFET-Schluchten.

Die physikalische Erklärung für das Zauberwerk: Die Laser-Cracks aus Jena erzeugen mit der HHG die 77ste Harmonische des Infrarot-Laserstrahls – das ist musikalisch gesprochen gleichsam der 77ste Oberton des Strahls. Die drei Wegbereiter dieser Methode wurden 2023 mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet. Die Jungs und Mädels von Active Fiber Systems sind sich ziemlich sicher, dass sie damit bis 2030 den Wettlauf um die Metrologie beim CFET gewinnen werden. ■

04



Zukunft

**LICHT RECHNET SELBST – ODER:
DIE PHOTONEN ÜBERNEHMEN BALD**

Schon in weniger als zehn Jahren mögen Mikrochip und Laserlicht zur konsequentesten Symbiose finden: Statt elektrischen Transistoren weiter beim Schrumpfen zu helfen, könnte Laserlicht die Rechnerei gleich selbst übernehmen. Allerorten tüfteln Forscher und Ingenieure an alltagstauglichen photonischen Prozessoren und am optischen Quantencomputer.

Die TRUMPF Tochter Q.ANT stellte Ende 2024 den ersten kommerziell nutzbaren photonischen Prozessor vor, die Native Processing Unit (NPU). Das ist im Prinzip ein Licht-Prozessor, an den herkömmliche Computer in Datencentern besonders komplexe Berechnungen auslagern können. Statt Transistoren per Strom zu schalten, nutzt die photonische NPU elektrische Felder zur Modulation des Lichts für Berechnungen. Die Methode dahinter nennt sich Elektro-Optische Modulation. Da photonische Komponenten komplexe mathematische Operationen wie die Berechnung des Sinus oder gar Fouriertransformationen in einem einzigen Schritt ausführen können – statt streng hintereinander in einer hohen Anzahl wie bei klassischen Transistoren –, ist die photonische NPU schlicht schneller. Ein optisches Element ersetzt Millionen von Transistoren. Praxistests zeigen, dass schon die heutige erste photonische NPU-Generation die Anzahl der notwendigen Rechenschritte auf ein Zehntel reduziert. Die Lichtdompteure von Q.ANT zielen mit ihrem Prozessor auf die intensive Nutzung neuronaler Netzwerke für Künstliche Intelligenz – und lindern nebenbei einen heißen Schmerz der KI-Branche: Die photonische NPU braucht für dieselbe Leistung lediglich ein 30stel der Energie wie stromgeschaltete Transistoren.

In eine ähnliche Richtung zielen die Entwickler von Quantencomputern. Auch hier sollen herkömmliche Systeme besonders schwierige Rechenoperationen lieber dem ultraschnellen Quantencomputer überlassen. Das magische Wort lautet Qubit. Der Qubit ist das quantenmechanische Äquivalent zum Transistor. Je mehr Qubits je länger zusam-

mengeschaltet werden können, desto höher die Rechenkapazität. Es gibt mehrere Ansätze, an Qubits zu kommen. Zwei der wichtigsten sind der supraleitende elektronische und der optische. Beim supraleitenden elektronischen Ansatz muss der Quantenprozessor immens aufwendig auf kurz vor den absoluten Nullpunkt von minus 273 Grad Celsius heruntergekühlt werden. Inzwischen schaffen es die Entwickler auf diese Weise, Hunderte von Qubits zur Zusammenarbeit zu zwingen, bis sie wieder auseinanderfallen – man spricht von der Kohärenzzeit. Diese hält allerdings gerade mal ein paar hundert Mikrosekunden lang an. In dieser Mini-Spanne muss die Rechenoperation gelungen sein, sonst wird es nix mehr.

Dieses Problem hat der optische Quantencomputer nicht. Vereinfacht gesagt schickt hier ein ultraexakt steuerbarer Laser ein Photonenpäckchen in einen Irrgarten aus Spiegeln, Strahlteilern, Phasenschiebern, nichtlinearen Kristallen und anderen optischen Elementen. Von Natur aus ignorieren Photonen einander. Aber im Lichtlabyrinth wenden die Entwickler ausgelügelte quantenmechanische Kniffe an, die die Photonen dazu bringen, miteinander zu interagieren. Dadurch werden sie zu sinnvollen Informationsträgern und man kann mit ihnen rechnen. Die Anzahl der „schaltbaren“ Photonen-Qubits ist Stand heute mit um die 20 noch wenig beeindruckend. Den Nachteil machen sie jedoch wett mit einer hohen, sekundenlangen Kohärenzzeit: Photonen-Qubits können also um Größenordnungen länger bei der Sache bleiben als ihre tiefgekühlten Geschwister im Supraleiter.

Der Hauptvorteil des optischen Quantencomputers wird seine Alltagstauglichkeit sein: Er braucht keine energiefressende Nullpunktkekühlung, sondern funktioniert bei Raumtemperatur mit gewöhnlicher Luft als Medium. Forscher erwarten, dass optische Quantencomputer Mitte der 2030er Jahre ausgereift sind.

Überall zeigt sich: Mit mehr Licht ist zu rechnen. ■

Die Magaziniker & AI
LASER COMMUNITY #40

Laseranwendungen in der Mikrochip-Produktion

Vor nach und während beinahe jedes einzelnen Produktionsschritts in der Chipfertigung leistet Lasertechnologie ihren Beitrag. Jeder Hersteller und Weiterverarbeiter hat seine eigene Prozesskette, in der er an unterschiedlichen Stellen Laser einsetzt.

Hinter dieser Seite finden Sie eine beispielhafte Übersicht.

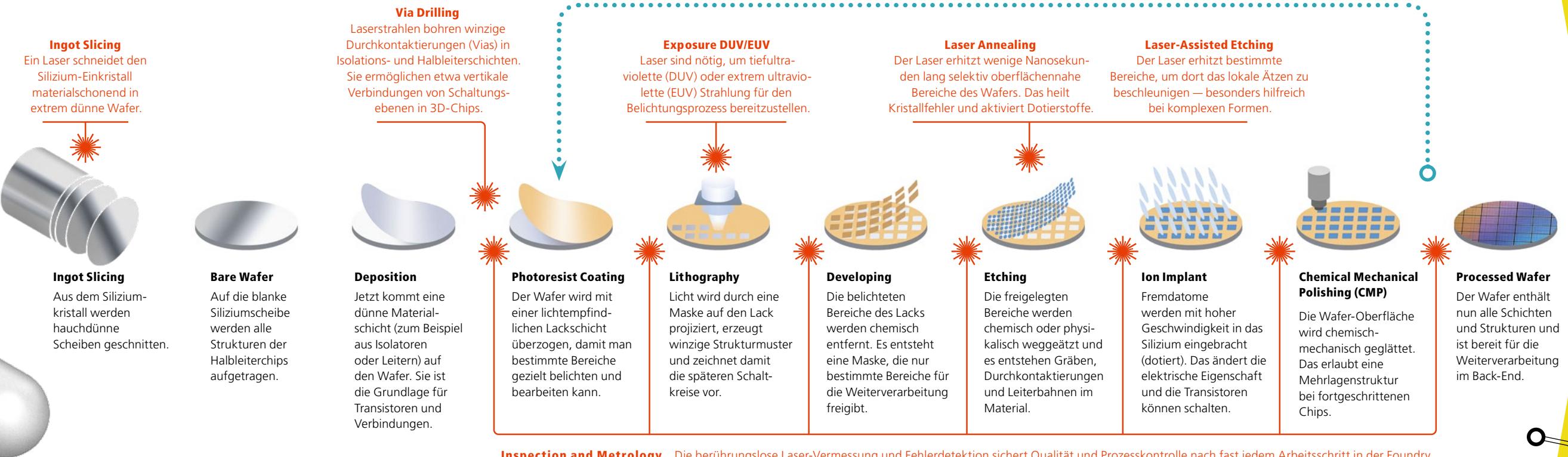


01

Front-End

Vom Siliziumkristall bis zum Wafer mit den fertigen Chipstrukturen. Dieser Prozess findet in großen Front-End-Fabriken statt, den sogenannten Foundrys.

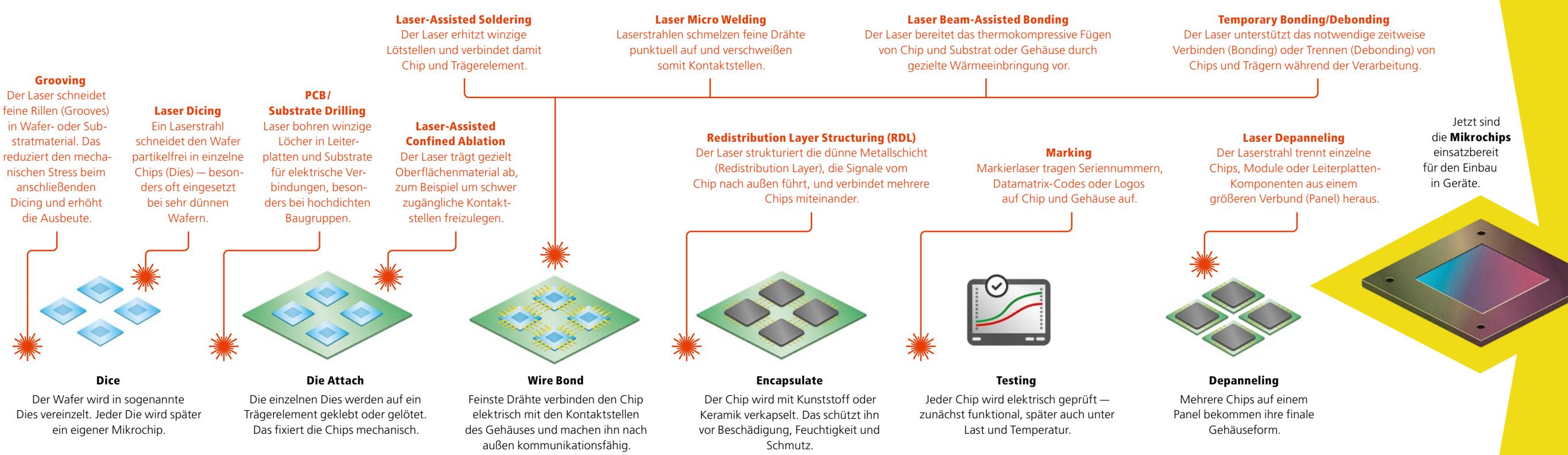
Mit dem gezüchteten Silizium-Einkristall-Zylinder fängt alles an.



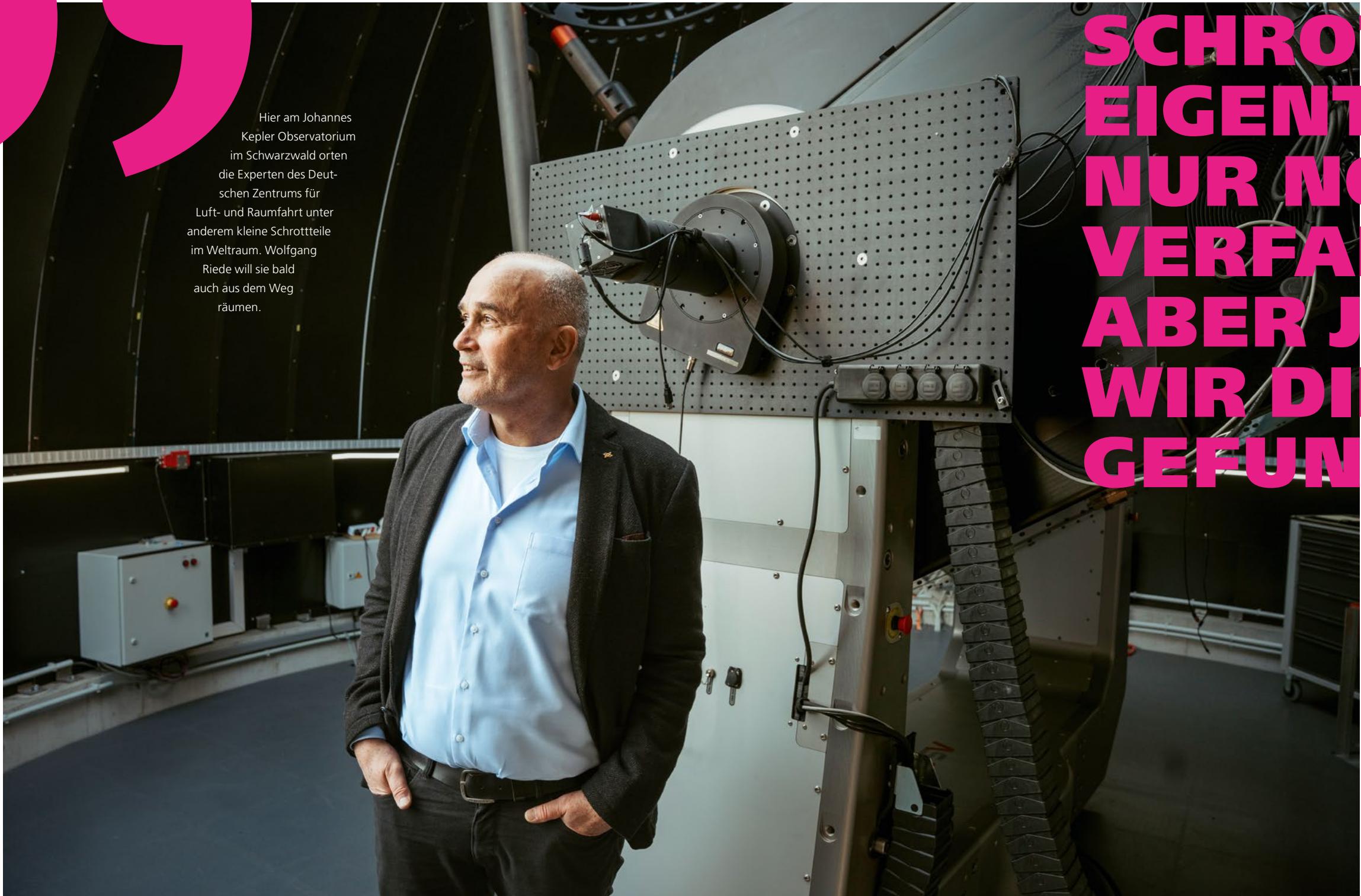
02

Back-End

Hier löst man die Mikrochips vom Wafer und macht sie produktfertig. Diese Prozessschritte führen oft kleinere, weiterverarbeitende Unternehmen aus.



„BISHER GIBT ES
FÜR WELTRAUM-
SCHROTT
EIGENTLICH
NUR NOTNAGEL-
VERFAHREN.
ABER JETZT HABEN
WIR DIE LÖSUNG
GEFUNDEN!“



Hier am Johannes Kepler Observatorium im Schwarzwald orten die Experten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt unter anderem kleine Schrottteile im Weltraum. Wolfgang Riede will sie bald auch aus dem Weg räumen.

Es wird eng im Orbit mit dem ganzen Weltraumschrott.

Und irgendwer sollte mal was erfinden, um künftig Kollisionen mit Satelliten und Raumstationen zu vermeiden.

Wolfgang Riede will das mit Lasern lösen. Ganz einfach sei das, im Prinzip.

Jeanette Petri

Herr Riede, wie groß ist das Problem im Orbit?

Derzeit etwa anderthalb Eiffeltürme groß. So viel Masse an nichtmanövrierbarem Schrott kreist permanent um die Erde, nämlich rund 13.000 Tonnen. Da der Orbit immer weiter und immer schneller mit Satelliten-Infrastruktur gefüllt wird, rechnen wir damit, dass sich die Gesamtmasse von Schrott und Satelliten bis 2030 – also in nur fünf Jahren! – verdoppeln oder gar verdreifachen wird.

Was ist überhaupt Weltraumschrott?

Das reicht von Sandkorngröße bis richtig groß: Er besteht zunächst aus rund 50 großen Objekten wie etwa abgeworfenen Raketenstufen aus 68 Jahren Raumfahrtgeschichte,

zum Beispiel auch der riesige Erdbobachtungssatellit Envisat der europäischen Weltraumorganisation ESA, der 2012 aus ungeklärten Gründen einfach den Geist aufgab. Dann noch zahlreiche kleine kaputte Satelliten. Hinzu kommen etwa 40.000 kleine Teile von mehr als zehn Zentimetern Größe, die wir von der Erde aus tracken können. Außerdem Abermillionen kleinere Teile, von denen wir meistens nicht einmal wissen, wo sie sind.

Das mit den Raketenstufen und den kaputten Satelliten leuchtet ein. Aber wo kommen die ganzen kleinen Schrottteile her?

Die Ursachen sind sowohl unkontrollierte als auch kontrollierte Kollisionen: Viele stammen von

„DIE PHOTONEN IM LASERLICHT ÜBEN DRUCK AUS. DER IST GERING. ABER IM ORBIT KANN ES DEN ENTSCHEIDENDEN UNTERSCHIED MACHEN.“

sogenannten Antisatellitentests. Die US-Amerikaner und die Sowjets wollten sich im Kalten Krieg gegenseitig beweisen, dass sie Satelliten per Rakete abschießen können. Das passiert auch heute noch. 2007 schoss China einen seiner Satelliten ab, 2021 Russland. Beide Explosionen hinterließen riesige Trümmerwolken im Orbit.

Nun gut, da oben ist ja viel Platz ...

Platz schon, aber die Teile sind ja in Bewegung und rasen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 28.000 Kilometern pro Stunde um die Erde – kurz zur Verdeutlichung: Das sind fast acht Kilometer pro Sekunde! Jedes Teil in seiner eigenen Umlaufbahn, die fliegen ja nicht synchron nebeneinanderher, wie man es vielleicht von den Ringen des Saturn kennt, sondern wild durcheinander. Außerdem rotieren die Teile und ändern dadurch immer leicht ihre Umlaufbahn. So passt es, dass die Internationale Raumstation ISS oder einer der vielen funktionierenden Satelli-

ten auf Kollisionskurs mit einem Schrottstück kommen. Treffen die aufeinander, wird eine immense Energie freigesetzt, die können wir auf der Erde kaum nachstellen. Lasertechniker werden mit diesen Werten etwas anfangen können: Ein Teilchen mit einem Durchmesser von einem Millimeter – also winzig – entwickelt bei einer Kollision im Orbit eine Energie von 70 Joule pro Quadratmillimeter – eine Menge! Kurz: Die getroffenen Satelliten werden durchschlagen oder zerbersten gleich ganz. Werte von Abermillionen Euro gehen verloren, die Infrastruktur, die wir auf der Erde nutzen, wird beschädigt. Das ist das Problem.

Uff, und was kann man dagegen tun?

Zwei Möglichkeiten: Wenn wir eine Kollision voraussehen, muss der Satellit ausweichen. Die ISS macht das quasi ständig. Die wird aber auch nachgetankt, die Satelliten nicht. Bei Satelliten ist die Menge an Ausweichmanövern begrenzt, und jedes geht

zulasten der Gesamtlebensdauer, kostet also richtig Geld. Zweitens gibt es immer wieder Reinemach-Weltraummissionen, bei denen halbgroße Schrottteile per Roboterarm gegriffen und sozusagen in die Atmosphäre nach unten geschleudert werden, damit sie dort verglühen. Das ist teuer und kommt für die meisten Schrottteile gar nicht infrage. Sie sehen: Beide Verfahren sind nur Notnägel. Was wir brauchen, ist eine richtige Lösung!

Und Sie haben die richtige Lösung gefunden?

Ich glaube schon. Laser Momentum Transfer, von uns liebevoll Laserschubsen genannt. Unser Team beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR, hat ein Konzept erarbeitet, wie das funktioniert. Und das Prinzip ist wirklich einfach zu verstehen: Die Photonen im Laserlicht üben Druck aus, den sogenannten Lichtdruck. Der ist gering. Aber bei einem rasenden Schrottstück im Orbit kann es den entscheidenden Unterschied machen. Wenn wir es per Hoch-

leistungslaser von vorne treffen, bremsen wir es ab. Wenn wir es von hinten treffen, schieben wir es an. Das hat folgenden Sinn: Bremst es, sinkt es. Beschleunigt es, steigt es. Und so können wir es von der Erde aus einfach aus der Kollisionsbahn schubsen. (Funktionszeichnung rechte Seite)

Die Sache wird doch einen Haken haben!

Wir brauchen nicht eine Laserstation, sondern zehn. Über den Erdball verteilt.

Christoph Kalscheuer

Aber wir können es nicht schon anstrahlen, wenn es am Horizont auftaucht, denn dann ist der Winkel flach und der Strahl ginge durch sehr viel Luftraum. Wir dürfen aber nur Luftraum verwenden, der für zivilen Verkehr gesperrt ist, und das kann dann nur ein bestimmter

Radius um die Bodenstation herum sein. Also warten wir, bis es näher kommt. Dann müssen wir das Objekt entweder von vorne oder von hinten treffen, denn wir wollen es ja entweder bremsen oder anschubsen. Somit halbiert sich die Zeitspanne erneut und wir landen bei tatsäch-

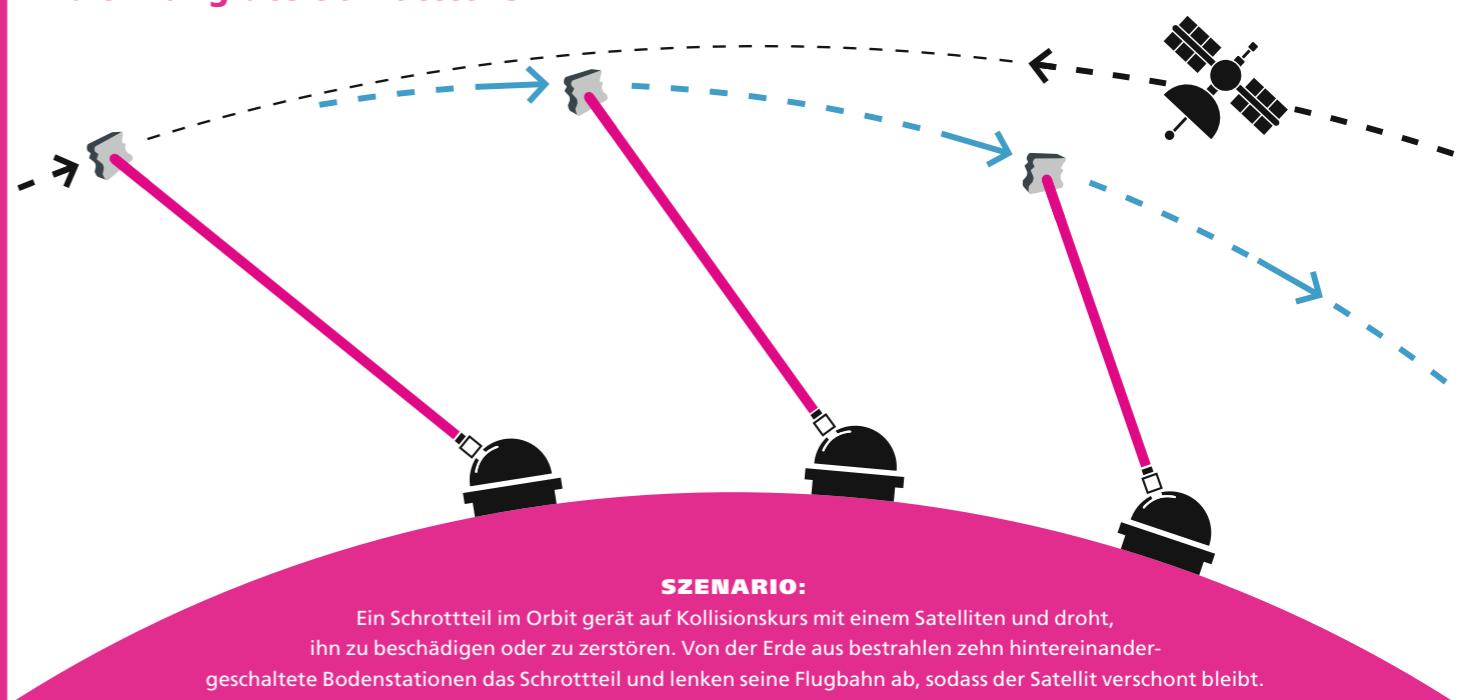
lich nur bei zwei bis drei Minuten Kontaktzeit. Das ist zu wenig für eine echte Ablenkung. Das Verfahren funktioniert nur, wenn sich zehn Bodenstationen hintereinanderschalten und zehn Überflüge lang das Objekt bestrahlen. Eine Laserstaffel sozusagen.

Verstehe. Aber wie wollen Sie dieses kleine Ding im Orbit überhaupt treffen?

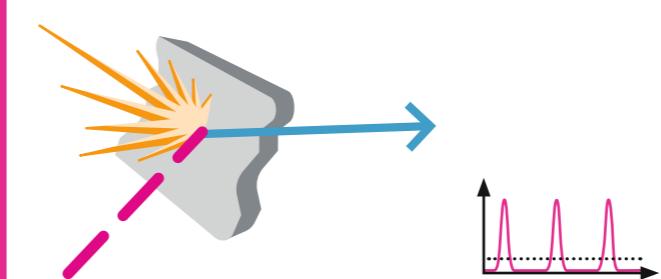
Das ist kein Problem. Wir arbeiten in der Raumfahrt schon sehr lange mit extrem genauen Laserverfahren über solche Distanzen. Zum Beispiel, um solche Schrottteile überhaupt erst zu

So funktioniert die Unfallvermeidung per Laser:

Ablenkung des Schrottteils

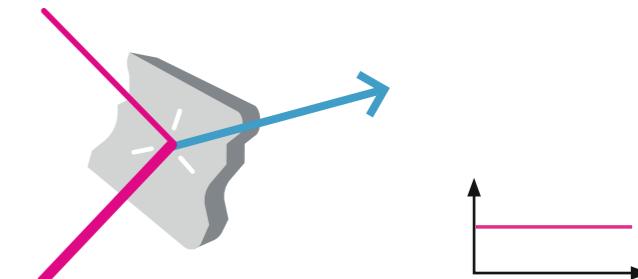


Das Verfahren per Ablation



Vorteil: Es reicht ein Objektüberflug, die Vorlaufzeit ist also kürzer.
Nachteil: Die Gefahr besteht, dass das Objekt zerbricht und aus einem gefährlichen Schrottteil mehrere werden.

Das Verfahren per Photonendruck



Vorteil: Es besteht kein Risiko, dass das Objekt zerbricht.
Nachteil: Es braucht bis zu zehn Objektüberflüge, damit der Effekt ausreicht. Die Vorlaufzeit ist also länger.



Wolfgang Riede ist Laserphysiker und leitet die Abteilung für Aktive Optische Systeme am Institut für Technische Physik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart.

„WENN ALLES OPTIMAL LÄUFT, BRINGEN WIR IN FÜNF JAHREN DEN FUNKTIONSNACHWEIS.“

detektieren. Es ist etwas anders, das noch knifflig wird.

Woran hakt's denn noch?

Wie weit im Voraus man eine Kollision präzise prognostizieren kann. Das ist nämlich nicht leicht. Wie beim Wetter wird es schwieriger, je weiter man in die Zukunft blicken will. Unsere Stationen bräuchten aber ein paar Tage Vorlauf. An diesem Problem sind wir dran.

Hat das Laserschubsen denn schon einmal geklappt?

Wir haben es noch nie in echt versucht; das ist aber normal für ein Raumfahrtprojekt. Sehen Sie, zusätzlich zu den Bodenstationen braucht es zwei Satelliten in Konstellation – das heißt, sie arbeiten

zusammen –, um während der Bestrahlung den Effekt zu messen und uns zu melden. Diese Satelliten gibt es noch nicht.

Dann ist das ja alles nur theoretisch...

Überhaupt nicht! Ehrlich gesagt bin ich selbst überrascht, wie unser DLR-Projekt gerade an Fahrt aufnimmt. Die ESA hat sich dem angenommen und uns mit dem Design einer Bodenstation beauftragt. TRUMPF Scientific Lasers haben wir als Partner für die Strahlquelle gewonnen. Wenn alles optimal läuft – Finanzierung, Bau, Auswahl der Bodenstationen –, bringen wir in fünf Jahren den prinzipiellen Funktionsnachweis. Gut, wahrscheinlich wird nicht alles

optimal laufen. Aber wir reden hier trotzdem über einen überschaubaren Zeitraum bis zur Realisierung.

Wie erklären Sie sich denn das plötzlich so heftige Interesse an Ihrem Projekt?

Wie gesagt: Die Menschheit wird die Infrastruktur im Orbit massiv ausbauen, zum Beispiel als Quelle für mobiles Internet, siehe das Starlink-Satellennetzwerk. Das Schrottproblem steht dem im Wege und wird tendenziell um Größenordnungen schlimmer – eben wegen des Ausbaus, bei dem wiederum neuer Müll anfällt. Also braucht es bald eine Lösung. ■

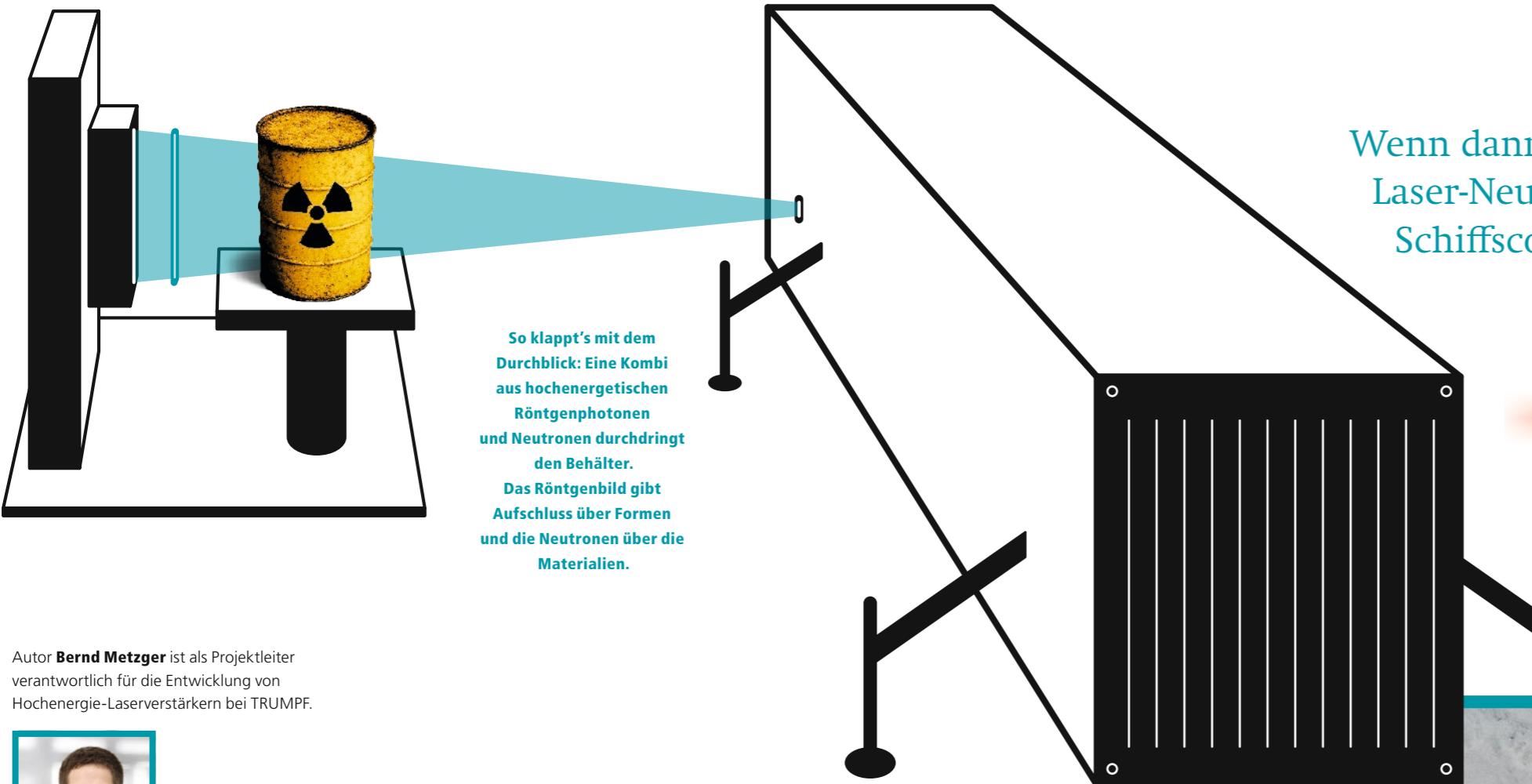
Jeannette Petri

DURCHBLICK BEIM ATOMMÜLL

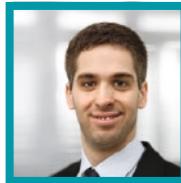


Nuklearer Abfall bleibt ein Problem für die nächsten eine Millionen Jahre.

Doch bei vielen älteren Abfallbehältern weiß niemand mehr, was eigentlich genau drinsteckt. Jetzt kann man gefahrlos nachschauen – mit einem lasergetriebenen Neutronenstrahl.



Autor **Bernd Metzger** ist als Projektleiter verantwortlich für die Entwicklung von Hochenergie-Laserverstärkern bei TRUMPF.



Asse: In der berühmten niedersächsischen Schachtanlage warten fast 126.000 nukleare Abfallbehälter darauf, dass etwas passiert. Ab 1967 wurden sie in das frühere Bergwerk gekippt, seit Jahrzehnten sickert Wasser in die instabile Schachtanlage. Eine Kontamination des Umfelds ist nicht auszuschließen.

Der ganze Abfall soll nun wieder raus. Doch bei vielen Fässern und Containern weiß kein Mensch mehr, was drin ist, wie es verpackt ist und wie stark und wie lange der Inhalt noch strahlt. Ohne das zu wissen, kann niemand mit ruhigem Gewissen entscheiden, wie und wo die Container und Fässer in Zukunft gelagert werden können. Manchmal bringt Durchleuchten die Antwort, sehr oft aber nur die Säge. Das gilt besonders für stärker abgeschirmte Container. Bei ihnen gibt es für handelsübliche Röntgenstrahlung kein Durchkommen mehr. Das nächste Problem folgt auf dem Fuß: Wer nuklearen Abfall auspackt, muss ihn auch wieder einpacken – alles immer unter strahlungssicheren Bedingungen. Das kostet. Aktuelle Schätzungen – bis zum Beginn der Rückholung, nur für die Asse und noch ohne tatsächliche Inspektion – belaufen sich auf 4,7 Milliarden Euro.

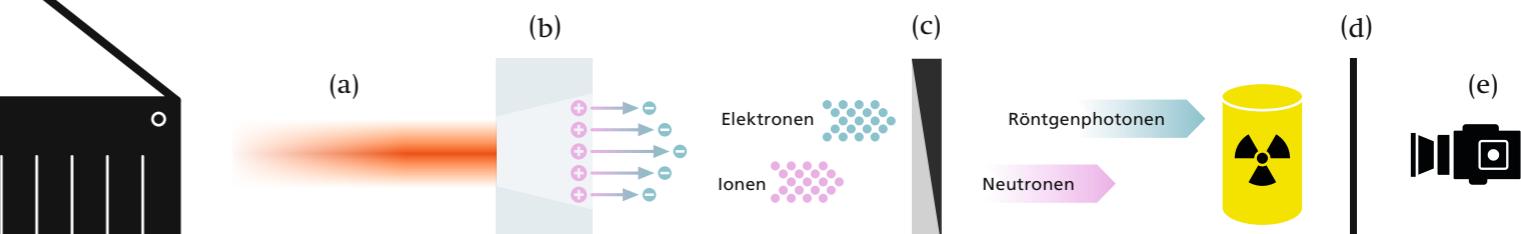
LASER STATT GROSSFORSCHUNGSANLAGE Der Traum wäre, eine Art Super-Röntgenblick zu haben, der solche beton-, eisen- und bleummantelte Behälter samt Inhalt durchleuchten könnte – zerstörungsfrei, praktikabel, schnell und (vergleichsweise) günstig. Dieser Traum vom Superauge ist auf dem Weg, wahr zu werden: Das entsprechende Verfahren heißt Laser-Driven Radiation Sources (LDRS) und stammt von den Laserfusionsspezialisten Focused Energy aus Darmstadt. Es kombiniert hochenergetische Neutronen- und Röntgenstrahlen. Diese durchdringen Materie auf verschiedene Art und liefern zusammen ein klares Gesamtbild.

Um Neutronenstrahlen und extrem hartes Röntgenlicht zu gewinnen, braucht man etwas, das kleinste Teilchen auf dieselbe Flugbahn zwingt und beschleunigt. Ein klassischer Teilchenbeschleuniger mit Elektromagneten an ewig langen Rohren ist aber riesig, immobil und kostet Hunderte Millionen, wenn nicht gar Milliarden. Also genau das, was man hier nicht haben will. Zum Glück gibt es eine noch junge alternative Technik, Teilchen zu beschleunigen: Auf einer Strecke von wenigen Millimetern setzen ultrakurze und hochintensive Laserpulse eine Teilchenkaskade in Gang. An deren Ende entsteht dann sowohl extrem hartes Röntgenlicht als auch ein Neutronenstrahl.

Im Labor arbeiten diese neuen Beschleuniger schon länger. Sie erzielen auch mehr als den benötigten Röntgen- und Neutronenfluss pro Impuls – allerdings bisher nur mit Pausen von mehreren Minuten bis Stunden zwischen zwei Pulsen. Das mobile LDRS-Gerät auf der Atomabfalldeponie soll bis zu hundert Pulse pro Sekunde erreichen: mit einer neuen Generation von Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern als Quelle und einem von TRUMPF speziell entwickelten Laserverstärker.

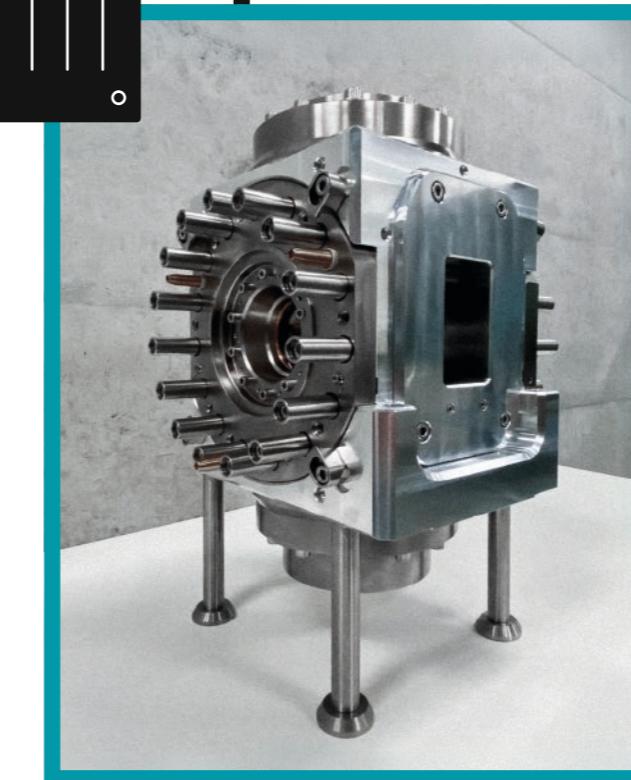
KLARHEIT MIT NEUTRONENBILDERN Im LDRS-Gerät treffen die Laserpulse auf einen hauchdünnen, ständig nachfließenden Wasserfilm. In den Wassermolekülen schlucken Elektronen die Energie der Laserphotonen und jagen fast lichtschnell davon. Dabei reißen sie Protonen oder – wenn es schweres Wasser ist – Deuteronen mit, Kernteilchen aus einem Proton und einem Neutron. Die Teilchen prasseln auf einen Konverter, zum Beispiel aus Beryllium. Dort setzen sie zum einen hochenergetische Röntgenphotonen frei und boxen zum anderen Neutronen aus den Atomkernen. So entstehen die Neutronen- und Röntgenstrahlen, die sich auf ein Prüfobjekt wie etwa einen Behälter mit radioaktivem Abfall richten lassen. Dahinter steht ein Detektorschirm,

Wenn dann die Industrialisierung glattgeht, wird eine komplette Laser-Neutronenquelle in einen rund zwölf Meter langen, mobilen Schiffscontainer passen.



Jeder Laserpuls (a) reißt Elektronen und Ionen aus einem Wasserfilm (b). Die rasend schnellen Teilchen erzeugen im Konverter (c) Röntgenphotonen und schlagen Neutronen los. Ein Detektor (d) fängt die Partikel auf und eine Hochgeschwindigkeitskamera (e) filmt die Bilder ab.

Der eigens entwickelte sogenannte Plattenverstärkerkopf steigert die Pulspower.



ein sogenannter Szintillator. Die auftreffenden Strahlen regen dessen Leuchtstoff an und erzeugen Graustufenbilder.

Die Röntgenbilder entstehen dabei einen winzigen Tick vor den Neutronenschattenwürfen, weil die Neutronen etwas langsamer fliegen als die lichtschnellen Röntgenphotonen. Eine Kamera, die das Ganze mit sehr hoher Zeitauflösung abfilmt, ermöglicht es, die zwei Bilder getrennt zu verarbeiten. Die Neutronen durchdringen selbst Blei und Eisen und geben Aufschluss über die Materialien dahinter. Die Röntgenaufnahmen erlauben dagegen Rückschlüsse auf deren Dichtevektor. Beide Informationen lassen sich zu einem Gesamtbild kombinieren.

PILOTANLAGE IN DEUTSCHLAND Forschungen und Tests für das 2024 gestartete Projekt (siehe Infokasten) laufen im früheren Kernkraftwerk Biblis. Dort hat der Energiekonzern RWE Räumlichkeiten bereitgestellt. 2028 oder 2029 will das staatlich geförderte Projekt demonstrieren, dass Technologie und Anwendung funktionieren – mit einem relativ moderaten Investitionsvolumen von 27 Millionen Euro. Geht die Industrialisierung glatt, wird später eine komplette Laser-Neutronenquelle in einen rund zwölf Meter langen, mobilen Schiffscontainer passen. Und dann nichts wie ab in die Asse zum Einsatz! ■

DAS SIND DIE FORSCHUNGSPARTNER

Folgende Partner konzipieren die Einzelkomponenten für das Projekt zur Entwicklung einer laserbasierten Neutronenquelle für die zerstörungsfreie Prüfung von industriell relevanten Objekten (PLANET): Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V. (Institut für Strahlenphysik), Focused Energy GmbH, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Photonis Germany GmbH, Technische Universität Darmstadt (Institut für Kernphysik) und TRUMPF Laser SE.
www.photonikforschung.de/projekte/lasertechnik/projekt/planet.html Offizielle Förderkennzeichen lauten: 13N16946 bis 13N16951

ALS ICH VON LIDAR ERFUHR, WUSSTE ICH: DAS ÄNDERT ALLES!

99

Die LIDAR-Technologie revolutioniert die Archäologie und lässt Forscher wie Marcello A. Canuto ganz anders auf die Maya-Zivilisation blicken.

Herr Canuto, letztes Jahr ging die Nachricht um die Welt, dass einer Ihrer Studenten eine bislang unbekannte Maya-Stadt in Mexiko entdeckt hat. Wie kam es dazu?

Mein Student Luke Auld-Thomas ist über eine einfache Google-Suche auf LIDAR-Daten gestoßen, die eine mexikanische Umweltorganisation ins Netz gestellt hat. Aus archäologischer Sicht waren die Daten eigentlich nicht optimal, weil sie aufgenommen wurden, um die Vegetation zu erfassen und nicht die Bodenstruktur. Zudem handelte es sich um ein Gebiet, das wir so nicht ausgewählt hätten. Aber wir scrollten etwa eine Stunde durch die Bilder und plötzlich dachten wir: Was ist das denn?



PROF. MARCELLO A. CANUTO Schon als Kind begeisterte sich der Archäologe Marcello A. Canuto für die Maya-Kultur. Derzeit ist er Direktor des Middle American Research Institute und Professor für Anthropologie an der Tulane University in New Orleans, USA. LIDAR, so sagt er, habe seine Arbeit reicher und spannender gemacht.

DSCHUNGEL SCANNEN Um ein Bodenprofil mit LIDAR (Light Detection and Ranging) zu erstellen, fliegt ein Flugzeug über den Dschungel und sendet millionenfach Laserimpulse aus. Zwar treffen aufgrund des Blätterdachs nur etwa fünf Prozent den Boden, doch die Reflexionen reichen, um mit speziellen Programmen menschengemachte Strukturen sichtbar zu machen.

Bryan Tarnowski

150

Was haben Sie gesehen?

Die Aufnahmen waren wie gesagt nicht so gut, aber wir haben Strukturen gesehen, die nicht natürlichen Ursprungs waren. Was wir sehen konnten, war, dass die sogenannte Siedlungsdichte – also die Anzahl der Gebäude pro Quadratkilometer – auch im Maya-Tiefland sehr hoch war. Deutlich höher sogar noch als in den Regionen weiter südlich, die wir schon etwas früher untersucht haben. Und schon da waren wir überrascht, wie hoch die Bevölkerungsdichte dort gewesen sein muss. Wir dachten: Wow, das ist wirklich interessant.

Muss die Geschichte der Maya jetzt neu geschrieben werden?

In Teilen ja. Die Entdeckung von Valeriana – so haben wir den Fundort im Bundesstaat Campeche in Mexiko genannt – ist auf den ersten Blick vielleicht nicht so spektakulär. Es handelt sich nicht um eine riesige Stadt wie etwa der Touristenmagnet Tikal in Guatemala, sondern eher um einen mittelgroßen Fundort. Aber das Spannende ist: Wir haben nicht gezielt gesucht, sondern zufällig auf einen kleinen Bereich geschaut und sofort etwas Großes gefunden. Das heißt: Es gibt wahrscheinlich noch viele weitere solcher mittelgroßen Fundorte. Die Entdeckung bestätigt damit ein Bild, das wir dank der LIDAR-Technologie in den letzten zehn Jahren gewonnen haben. Wo immer wir die Messmethode einsetzen – wir finden Hinweise auf Maya-Siedlungen.

Wie hat sich also durch die LIDAR-Technologie der Blick auf die Maya-Kultur verändert?

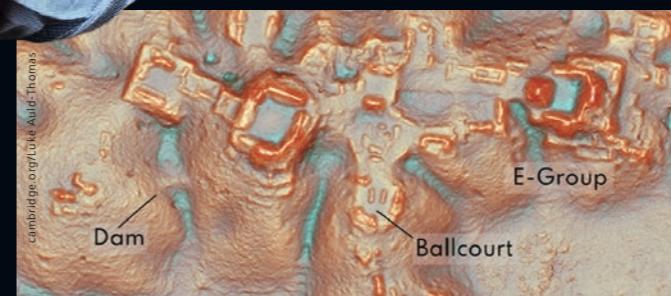
In den letzten 150 Jahren herrschte in der Forschung die Vorstellung, dass komplexe Gesellschaften nur in trockenen Gebieten mit Flüssen wie Ägypten, Mesopotamien oder dem Industal entstehen konnten. Die Tropen galten als ungeeignet für Hochkulturen. Aber LIDAR beweist, dass das völlig falsch ist. Nicht nur wegen der hohen Bevölkerungsdichte. Auch die Infrastruktur ist auf einem Niveau, das wir vorher nicht vermutet haben. Die Anzahl der Verteidigungsanlagen, Straßen, Kanäle oder Reservoirs, das alles zeigt: Die Maya haben ihre Umwelt massiv verändert. Dafür braucht es einen hohen Organisationsgrad und eine funktionierende Verwaltung. Die Maya waren also viel komplexer, als wir es ihnen bislang zugestanden haben. In den 1980er Jahren hat die Entzifferung der Maya-Schrift einen gewaltigen Schub bedeutet. Jetzt haben wir dank LIDAR einen ähnlichen Schub.

Gehören Ausgrabungen damit der Vergangenheit an?

Keineswegs. Wir müssen immer noch vor Ort überprüfen, ob das, was wir durch LIDAR sehen, auch am Boden existiert. Das nennen wir „Ground Truthing“. Grabungen sind zudem unerlässlich, um etwa mehr über Lebensgewohnheiten zu erfahren. Die Archäologie wird durch LIDAR aber viel effizienter, wir wissen jetzt viel schneller, wo wir graben müssen. Früher mussten wir uns für die Kartierung mühsam durch den Dschungel kämpfen, oft sieht man dabei gar nicht, was neben einem liegt. Als ich las, das muss so 2012 gewesen sein, dass das Forscherhepaar Arlen und Diane Chase zum ersten Mal LIDAR bei der Ausgrabungsstätte Caracol in Belize einsetzte, da war für mich klar: Das verändert alles! Und so beschloss ich, dass ich keine Kartierung mehr machen werde. Das ist reine Zeitverschwendug! Früher hat man vielleicht 1.000 Quadratkilometer in hundert Jahren kartiert – zu Fuß! Mit LIDAR haben wir 10.000 Quadratkilometer in nur zehn Jahren abgedeckt.

Welche Geheimnisse wird LIDAR noch lüften?

Immer mehr Forscherteams auf der Welt erfassen neue LIDAR-Daten. Nicht nur in Mittelamerika, sondern auch in Südamerika und Südostasien. Es wird in den nächsten zehn Jahren ohne Zweifel weitere Entdeckungen geben. Ich sage voraus, dass LIDAR auch im Amazonas noch viel aufdecken wird. Ich kann nicht vorhersagen, was genau, aber es wird uns überraschen! ■



SENSATIONSFUND Mithilfe der LIDAR-Technologie haben Archäologen schon etliche neue Maya-Siedlungen ausfindig gemacht. Spektakulär war im letzten Jahr die Nachricht über die Entdeckung der Stadt Valeriana im mexikanischen Bundesstaat Campeche. Mit mehr finanziellen Mitteln für die Datenerfassung per Flugzeug könnten noch weitere Sensationsfunde folgen.



EKPO liefert Brennstoffzellen in alle Welt. Um mit der Nachfrage Schritt zu halten, rüstet das Unternehmen eine Produktionsstraße mit Faserlasern aus.

Die Mobilitätswende hängt am ultrafeinen Faserlaser. Denn die Welt braucht emissionsfreie Antriebe für Fahrzeuge aller Art: Baumaschinen, Lkw, Pkw, Züge, Schiffe und in Zukunft sogar Flugzeuge. EKPO Fuel Cell Technologies im süddeutschen Dettingen an der Erms will die Brennstoffzellen für die Mobilitätswende und nachhaltige Stromversorgung liefern. Mehr noch: Das Joint Venture der beiden Automobilzulieferer ElringKlinger und OPmobility tritt an, weltweit der Maßstab der gesamten Brennstoffzellen-Branche zu werden. Eine Voraussetzung dafür ist, meterweise ultrafeine sowie gasdichte Schweißnähte zu ziehen. Deswegen der Faserlaser.

EIN EINZIGER FEHLER BEDEUTET DAS AUS Arno Bayer ist Leiter des Fügetechnik-Bereichs des Industrial Engineering bei EKPO und hält eine Bipolarplatte in der Hand. Er erklärt, dass Bipolarplatten eine entscheidende Rolle in jeder Brennstoffzelle einnehmen: Sie verbinden, verteilen, leiten und kühlen. Bipolarplatten bestehen aus zwei sehr dünnen Metalllagen, typischerweise 75 bis 100 Mikrometer schlank, die miteinander verschweißt sind. Dazwischen fließt Kühlmittel. Bayer zeigt auf eine Vielzahl eingravierter Kanalstrukturen auf beiden Seiten. Auf der einen Seite strömt später Wasserstoff entlang, auf der anderen Seite Luft, also der Sauerstoff, den es für die Reaktion braucht. Er sagt: „In Bipolarplatten steckt viel Know-how. Gleichzeitig sind sie auch

reine Massenprodukte, denn wir brauchen pro Brennstoffzelle bis zu 400 Stück davon. Die stapeln wir dann zu sogenannten Stacks.“ Er deutet auf die fertigen Brennstoffzellen weiter hinten im EKPO-Werk, die so groß sind wie eine Getränkekiste. „Genau das ist die Herausforderung: Wir müssen es schaffen, jede einzelne Schweißnaht an den Bipolarplatten absolut gasdicht und gleichzeitig mit hoher Präzision zu schweißen. Wenn auch nur eine Platte undicht ist, ist der ganze Stack, die komplette Brennstoffzelle nicht funktionsfähig.“

12.000 KILOMETER PRO JAHR EKPO braucht also einen Laser, der ultrafein, zuverlässig gasdicht und gleichzeitig superflink schweißen kann. Superflink heißt in diesem Fall nahe der sogenannten Humping-Geschwindigkeitsgrenze, bei der aus physikalischen Gründen unerwünschte, perlenschnurartige Erhebungen in die Naht gelangen. Die Verbindungsnaht ist 0,1 Millimeter breit und etwa 0,15 Millimeter tief; pro Bipolarplatte ist die Naht ungefähr drei Meter lang. Im Jahr

muss der Laser am Standort Dettingen etwa 12.000 Kilometer Schweißnähte ziehen – eine Schiffsfahrt von Hamburg nach New York und wieder zurück. Bayer sagt: „Es gibt nur einen Laser auf der Welt, dem wir das zutrauen: ein Single-Mode-Faserlaser. Darum haben wir uns für den TruFiber entschieden. Wir schätzen die Kombi aus hervorragender Strahlqualität und Prozesssicherheit.“ Nach erfolgreichen Versuchsreihen für das Laserschweißen und der Entwicklung eines innovativen Spann- und Handlingsystems für die Bipolarplatten entschließt sich EKPO, eine hochproduktive Produktionsstraße zu bauen: Der Laserstrahl verbindet die zwei Seiten der Bipolarplatte zu einer gasdichten Einheit. Dann folgt eine anspruchsvolle Leitfähigkeits- und Dichtheitsprüfung – und die Bipolarplatte ist fertig für den Stack und bereit für die Mobilitätswende. ■

Kontakt: Arno Bayer, Head of Industrial Engineering Joining bei EKPO Fuel Cell Technologies GmbH, Tel. +49 07123 724 9189, arno.bayer@ekpo-fuelcell.com



Südkorea

BLICK AUF DIE WIRTSCHAFT

Die Industrieunternehmen Südkoreas investieren konsequent in zukunftsweisende Technologien wie

Digitalisierung und Automatisierung.

Besonders wettbewerbsfähig und innovationsfreudig zeigt sich die südkoreanische Wirtschaft in Bereichen wie **Halbleiter, Elektronik und Batterietechnologie.**

Südkorea setzt voll auf **hochautomatisierte Landwirtschaft**. Die Branche ist hochproduktiv und Treiber des wirtschaftlichen Wachstums.



WILLKOMMEN IM LASERLAND SÜDKOREA!



Industrianteil
an der
Wirtschaftsleistung

36.024
US-Dollar

nominales
Bruttoinlandsprodukt
pro Kopf

LAND UND LASER

Die gewaltige **Batterieindustrie** des Landes fußt auf präzisem Laserschweißen und -schneiden.

In der **Displayproduktion** steigern Laser die Auflösung und Leistungsfähigkeit der Bildschirme jeder Größe und sorgen für hohen Output.

Südkorea ist konstant militärisch bedroht und erforscht deshalb den Einsatz von Lasertechnologie zur **Raketenabwehr**.



Samsung/squad42, Shutterstock



WO STECKT DER LASER

Um Real Madrid herum: „Bernabéu“ hat einen Ruf wie Donnerhall in der Fußballwelt: das Stadion des erfolgreichsten Klubs Spaniens und Europas. Auch das Äußere soll den königlichen Glanz des Vereins ausstrahlen. Darum beschloss der Verein, die Fassade komplett neu zu gestalten. Der Architekt ersann eine teilweise lichtdurchlässige Hülle aus leicht geschwungenen Metalllamellen. Für den Hersteller der Bauteile bedeutet die Architektenlyrik: Jede Lamelle ist ein wenig anders als die vorherige. Der Madrider Metallspezialist Lasercor bewältigte den riesigen Losgröße-eins-Auftrag mit seiner zwölf Kilowatt starken TruLaser 5030 fiber. Seit 2024 glänzen die Lamellen mit sechs verschiedenen reflektierenden Oberflächen in der Sonne und rufen die Fans herbei. ■



1 Nanometer

Wissenschaftler der Universität Stanford filmten das engste Tänzchen, das die Welt je zu sehen bekam: Tanzpartner sind Elektronen, die um ein Partikelchen tanzen. Bislang galt es als praktisch unmöglich, Bewegungen zu beobachten, die kleiner sind als zehn Nanometer. Das unterbot das Experiment in Stanford deutlich: Die Blitze eines Attosekundenlasers mit Pulsdauern von 10^{-18} Sekunden machten den subatomaren Kreistanz mit einem Durchmesser von circa einem Nanometer sichtbar.

TRUMPF

LASERCOMMUNITY.41 erscheint im Winter 2025.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen: trumpf.com/s/lc-abo

LASER COMMUNITY.

Über Menschen und Photonen

**DER CHIP-
INDUSTRIE
GEHT
EIN LICHT
AUF**

Mikrochip-Fertigung
bis Quantenprozessor:
Die Zukunft des Computings
steckt im Photon.



TRUMPF.COM

#40