

LASER COMMUNITY.

Über Menschen und Photonen



SPUTNIKS ERBEN

Die neuen LEO-Satelliten übernehmen. Und mit ihnen die Lasertechnologie. Revolution im Orbit.



LASER COMMUNITY. #33

AUSGABE November 2021 **HERAUSGEBER** TRUMPF GmbH + Co. KG, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen, Deutschland; www.trumpf.com

V.I.S.D.P. UND CHEFREDAKTION Athanassios Kaliudis, Telefon +49 7156 303 - 31559, athanassios.kaliudis@trumpf.com

VERTRIEB Telefon +49 7156 303 - 31559, athanassios.kaliudis@trumpf.com, www.trumpf.com/de_DE/unternehmen/presse/magazine

REDAKTION Die Magaziniker GmbH, Stuttgart, Florian Burkhardt, Martin Reinhardt

AUTOREN Florian Burkhardt, Boris Hänßler, Clemens Herkommer, Athanassios Kaliudis, Martin Reinhardt, Sebastian Stamm, Julia Stolte, Monika Unkelbach

FOTOGRAFIE UND ILLUSTRATION Stefan Hobmeier, Tobias Gerber, Miquel Gonzalez, Martin Stollberg, Gernot Walter

GESTALTUNG UND PRODUKTION Die Magaziniker GmbH, Stuttgart, Gernot Walter (AD), Martin Reinhardt **ÜBERSETZUNG** Wieners+Wieners GmbH,

Ahrensburg **REPRODUKTION** Reprotechnik Herzog, Stuttgart **HERSTELLUNG** W. Kohlhammer Druckerei GmbH + Co. KG, Stuttgart

Illustration Titelseite und Seite 2: Gernot Walter

EDITORIAL



Unvernünftig, aber reizvoll

An einem lauen Frühlingsabend vor zwei Jahren ließ ich den Tag mit meiner Frau und meiner Tochter bei einem Glas Wein auf unserer Terrasse ausklingen. Plötzlich sahen wir kleine Lichterscheinungen am Himmel und rätselten, was das sein könnte. Flugzeuge? Dafür waren die Bewegungen zu schnell. Sternschnuppen? Dafür waren es zu viele. Ich zückte also mein Smartphone und fand heraus, dass Elon Musk, Chef des US-Raumfahrtunternehmens SpaceX, gerade dabei war, seine Starlink-Satelliten in den Orbit zu schießen. Diese sollen in Zukunft die Internetzugänge weltweit sicherstellen. Es war ein spektakulärer Anblick.

Und da wir unsere Gedanken nun im Weltall und bei den Satelliten hatten, philosophierten wir zu dritt weiter. Wie sähe das Leben wohl ohne Satelliten aus? Es wäre kaum vorstellbar: keine GPS-Navigation, keine Liveübertragungen, keine Wettervorhersagen, kein Google Maps.

Modernste Lasertechnik hilft der Menschheit dabei, den Weltraum weiter zu erschließen. So sind beispielsweise für die Datenübertragung im Äther spezielle Antennen nötig, die – um effizient zu sein – nicht nur eine komplexe Geometrie mit verwobenen Strukturen und Innenräumen aufweisen, sondern zudem auch federleicht sein müssen. Mit konventionellen Verfahren kommen wir hier nicht weit, nur mit einem laserbasierten 3D-Druckverfahren lassen sich solche Antennen herstellen. Auch in der Satellitenkommunikation ist Lasertechnik en vogue. So können moderne Satelliten Informationen und Daten untereinander direkt per Licht austauschen und miteinander kommunizieren. Das geht deutlich effizienter als klassisch per Funkwellen, wie es lange Zeit Standard war.

Für TRUMPF ist die Satellitentechnik ein strategisch wichtiges Zukunftsfeld. Wie so oft, sind Laser auch hier „Enabler“. Wir können mit unserer Lasertechnik der Branche dabei helfen, modernste Satelliten herzustellen und deren Kommunikation untereinander mit robusten und zuverlässigen Komponenten sicherzustellen. Hierfür entwickeln wir unsere Technologien stetig weiter und passen sie den Anforderungen der Antennen- und Satellitenhersteller an.

Noch mal zurück zum lauen Frühlingsabend. Kurz bevor wir ins Haus gingen, fragte mich meine Frau, ob ich nicht auch mal Weltraumtourist sein möchte. Tja, gute Frage. Auf der einen Seite ist die Vernunft und die sagt: nein. Denn mal abgesehen davon, dass eine touristische Raumfahrt unglaublich teuer ist, bringt sie – außer mir – ja niemandem etwas. Auf der anderen Seite aber ist der Reiz, unseren blauen Planeten einmal vom Weltraum aus zu sehen, beinahe unwiderstehlich groß.

Also ja? Christian wird Weltraumtourist? Nein! Ich bleibe auf dem Boden und entwickle weiter mit meinem Team zusammen modernste Lasertechnik, damit in Zukunft noch mehr Sternschnuppen von Elon Musk am Himmelszelt zu sehen sind.

DR.-ING. CHRISTIAN SCHMITZ

Chief Executive Officer Laser Technology

Mitglied der Gruppengeschäftsführung der TRUMPF GmbH + Co. KG

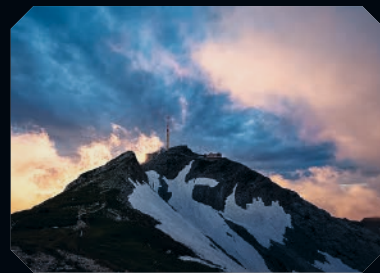
christian.schmitz@trumpf.com

Gernot Walter



Blut

Artdirector Gernots Herz pumpt für Photonen und so ist er auch bereit, sein Blut für die Laser Community hinzugeben. Für ein überzeugendes Foto piekste er sich in die Fingerkuppe, träufelte sein Blut auf Glas und drückte hurtig ab, bevor es trocknete. Das Ergebnis auf **Seite 31**.



Schweiß

Beim Interview auf dem Säntisgipfel verquatschen wir uns. Prof. Wolf schaut auf die Uhr: Gleich leuchtet sein Laser zum ersten Mal! Mit ausgestrecktem Arm fängt der Journalist die Schlussworte auf der Treppe auf: „... wir werden die Werkzeuge brauchen, wir sollten sie entwickeln.“ Zu lesen auf **Seite 24**.



Tränen

Ja, auch wir zeigen den Hai als Monster — der Aufmerksamkeit wegen. Dabei sind Haie prächtige Geschöpfe. Nur ihr Ruf ist ruiniert. So weint keiner eine Träne, wenn sie massenhaft für ihre Flossen sterben. Darum bitte nicht vor Schreck, sondern vor Mitgefühl erschauern beim Anblick der **Rückseite**.

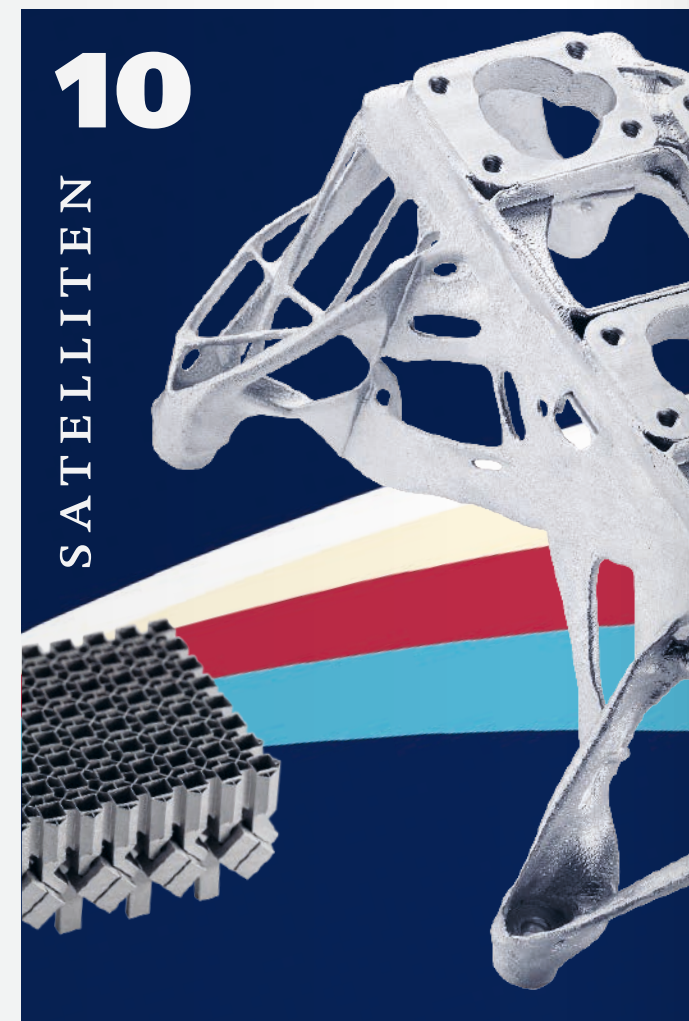
Lena Schindler, Martin Stollberg, Gernot Walter

LASER COMMUNITY.

THEMA

10 UNSER SCHWARM IM ALL

Zum ersten Mal werden Satelliten in industriellen Massen produziert und in den Orbit geschossen. Funktionieren tut das alles nur mit 3D-Druck und Lasertechnik.



8 PILLOW-PLATES



Miguel Gonzalez, TRUMPF

6 POWER

Was blitzt denn da fürs Handgelenk? Femtosekunden-Pulse schmücken Luxusuhren.

7 GLORY

Wie Sir David Payne Netflix ermöglichte und warum wir seine entscheidende Erfindung trotzdem vergraben.

8 AHEAD

Rodomach-Geschäftsführer Roel Doornebusch erklärt den Run auf Pillow-Plates und sagt, was er dafür hat.

16 Mit Strategie zur Batterie

„Aber wer baut die Batterien?“, fragte man sich bei Mercedes-Benz, als die Ära der E-Mobilität anbrach. Die einzig denkbare Antwort: „Wir selbst.“ Der Rest ist Erfolgsgeschichte.

19 So druckst du deinen eigenen Superman-Anzug

Drei einfache, photonolithografische Schritte zum Heldengewand.



19 NANOSTOFF

MIT/Caltech/ETHZ, Stefan Hübmeier, Florian Burkhardt

20 Sanfter Typ

Bei Karl Storz ist es zu finden: das in der Medizintechnik noch viel zu seltene Traumpaar Laser und Roboter. Der Beginn einer wunderbaren Beziehung.

24 „Die Leute denken, Geoengineering sei etwas Anrüchiges“

Die Idee, Blitze mit Lasern abzufangen, klingt fantastisch genug. Aber für ihren Vater Prof. Jean-Pierre Wolf ist sie nur Teil einer noch größeren Aufgabe.

28 Potzblitz!

Eine unglaubliche Idee braucht eine unglaubliche Strahlquelle. Hier ist ihre Geschichte.

30 POP

Ein Blitzableiter für Doc Brown

31 WO STECKT DER LASER?

Im medizinischen Massentest



20 MEDIZINTECHNIK



28 BLITZJÄGER

POWER

AM PULS DER ZEIT

Regelbare UKP-Laser designen die Luxusuhr von heute.

Hochwertige Uhren sind Sehnsuchtsobjekte, für die Liebhaber tief in die Tasche greifen. Kenner legen großen Wert auf jedes Detail. So zeigt sich der wahre Wert einer Uhr häufig auf ihrer Rückseite. Am Gehäuseboden ziehen hochwertig eingravierte Informationen oder detailreiche filigrane Logos die Blicke an. Nur: Deren Herstellung ist für die Uhrenmacher ein stetes Ärgernis, weil sie dafür die teure Hilfe externer Ätztechnikspezialisten brauchen. Viel lieber würden sie ihre Uhren selbst verzieren: sauber und chemiefrei, integriert in ihren Herstellungsprozess. Und genau das geht jetzt: Die neuen Laser der TruMicro Serie 2000 von TRUMPF läuten eine neue Zeit für die Uhrenmacher ein und lassen künftig den Puls von Design-Enthusiasten in die Höhe schnellen.

Diese Ultrakurzpulslaser haben mit extrem kurzen Pulsdauern von wenigen Hundert Femtosekunden pro Puls die Power, alle Metalle gratfrei zu bearbeiten. Dazu gehören auch die in der Uhrenindustrie gängigen Edelstahllegierungen 316L/1.4404, Titan und Kupfer. Bei typischen Gravurtiefen von bis zu 100 Mikrometern wird die Pulsenergie innerhalb einer so unvorstellbar kurzen Zeit auf das Metall übertragen, dass es gar keine Zeit hat, sich sonderlich zu erwärmen, aufzuschmelzen und somit Grate zu bilden. Die neuen Laser können auch edel: Während herkömmliche Lasergravuren tendenziell dunkel

wirken, schätzen Uhrenfans die weißlichen hellen Gravuren, die sich bisher nur durch das Ätzen realisieren ließen.

Dieser edle Farbton ergibt sich aber nur, wenn ein gewisses Maß an Wärme auf das Metall einwirkt und ein Schmelzbad entsteht. Dazu ist es notwendig, die Pulsdauer des Lasers zu verlängern. Die Laser der TruMicro Serie 2000 ermöglichen einen fliegenden Wechsel zwischen unterschiedlichen Pulsdauern. Innerhalb von weniger als 800 Millisekunden lässt sich die Pulsdauer von 400 Femtosekunden für das gratfreie, effiziente Gravieren auf 20 Pikosekunden für das Erzeugen eines dünnen Schmelzfilms regeln. Möglich wird dies durch eine neu entwickelte Komponente, die im Laser die Pulsdauer je nach Anforderung des Materials und der Anwendung maßschneidern kann.

Selbst komplizierte filigrane Logos zaubert der variable Ultrakurzpulslaser auf jeden Gehäuseboden. Ein schnell schaltbarer Burst-Mode – ein Multipulsbetrieb des Lasers – kann zudem die Bearbeitungszeit bei konstanter Bearbeitungsqualität auf ein Minimum optimieren. So und mit einer Vielzahl weiterer Parametereinstellungen lassen sich neben weißen je nach Material auch farbige Gravuren effizient und sanft auf das Uhrenteil aufbringen. Und das unschlagbar schnell und eingebettet in einen industriellen Fertigungsprozess. ■

Erster Einsatz für den neuen Gravurlaser: die Meister S Chronoscope Platin Edition 160 von Junghans.



Das per UKP-Laser gravierte Editionslogo im Gehäuseboden aus Platin PT950.

Junghans, Tobias Gerber

GLORY

Nix Netflix:
Erst David Paynes
Durchbruch in der
Glasfasertechnologie
machte das weltweite
Internet von heute
möglich.

NO PAYNE, NO GAIN

Prof. Sir David Payne erhält den Berthold Leibinger Zukunftspreis.

Hätte sich David Payne mehr für – sagen wir – Gartenbau interessiert statt für Physik, dann könnten wir heute wohl keinen Film streamen, morgen keine Videokonferenzen abhalten und niemals Bitcoins schürfen. (Okay, Letzteres wäre vielleicht ganz gut. Okay, Videokonferenzen machen auch nicht immer Spaß. Aber hey: Filme!) Seit den 1970er-Jahren forscht Payne auf den Feldern Photonik, Telekommunikation und optische Sensoren. Seinen Teams gelingen immer wieder wichtige Verbesserungen bei der optischen Fasertechnologie.

Paynes Durchbruch kommt 1985. Sein Geschenk an die Menschheit: der EDFA. Das steht für Erbium-dotierter Faserverstärker. Der Clou dabei: Payne schafft es, Silizium-Glasfasern gezielt mit seltenen Erden zu verunreinigen, sprich, er dotiert sie. Diese „Verunreinigung“ verstärkt das Licht in einer Glasfaser. Zum ersten Mal kann man Lichtsignale über weite Strecken hinweg ohne Verlust durch ein Glaskabel schicken. Vorher war spätestens nach einhundert Kilometern Schluss oder ein teurer Elektroverstärker musste her. Auf einmal werden Glasfaserkabel hochattraktiv – der Startschuss für die Revolution der weltweiten Tele-

kommunikation! Es dauert nicht einmal zehn Jahre, da liegt das erste Seekabel mit Paynes EDFAs zwischen Amerika und Europa. Damals geht es noch hauptsächlich ums Telefonieren, daher misst man die Kabelleistung über die Anzahl der Telefongespräche, die gleichzeitig durch die Leitung laufen können. In den alten Kupferkabeln sind es Hunderte oder wenige Tausend. Paynes dotierte Glasfaser allein schafft Hunderttausende. Heute geht es um globale Datenübertragung im Internet und man misst die Kabelleistung in Gigabit pro Sekunde. In den 1990er-Jahren startete man mit einstelligen Werten, inzwischen sind wir, dank Techniken wie dem Wellenlängen-Multiplexing, bei 100 Terabit pro Sekunde. Das Internet – eine gigantische, unsichtbare Autobahn. Und David Payne hat die alten Straßenpflaster durch Hochleistungsasphalt ersetzt.

Im September 2021 erhielt Sir David Payne für seine wegweisenden Forschungen auf dem Gebiet der Faseroptik den Berthold Leibinger Zukunftspreis. Der Professor an der Universität Southampton ist damit der achte Preisträger in dieser prestigeträchtigen Reihe. ■



University of Southampton

ENTSPANNT IM PILLOW-BOOM

Roel Doornebosch
weiß, wie man die
besten Pillow-Plates
günstig baut.

Die echten Pillow-
Plates sind natürlich
nicht so bequem.



Herr Doornebosch, Sie fertigen Laserschweißanlagen, die zwei flache Bleche aufeinanderschweißen. Was soll daran so schwer sein?

Nun, es geht darum, die Bleche in sehr kurzer Zeit mit einer umlaufenden Naht und oft Tausenden kreisrunden Schweißnähten zu verbinden. Und zwar so, dass die absolut dichthalten.

Warum?

Weil die Bleche danach mit bis zu 500 bar Wasserdruck aufgepumpt werden.

Wie eine Luftmatratze?

Ja, wie eine Luftmatratze. Oder ein Kissen. Darum heißt der Fachbegriff auch Pillow-Plates. Sie sind eine spezielle Form von Wärmetauschern.

Und wer braucht so was?

Aus den Kissen werden Wände für Behälter, Kessel oder Tanks. Durch diese Wände zirkuliert später eine warme oder kalte Flüssigkeit, die den Inhalt erhitzt respektive kühlt. Die Pharmaindustrie, die Petrochemie, aber auch die Lebensmittel- und Getränkehersteller nutzen sie. Sogar als Kühlelement für Autobatterien sind Pillow-Plates geeignet. Die Technologie ist eigentlich simpel und nichts Neues, aber immer mehr Anwender entdecken sie für sich, weil diese Form von Wärmetauscher wenig Material benötigt und effizienter ihre Aufgabe erfüllt als zum Beispiel Rohrwärmetauscher. Wir erleben gerade den Boom der Luftmatratze aus Stahl.

Was macht den Prozess so schwierig?

Die schiere Anzahl der Schweißungen und der Qualitätsanspruch. Und dann sind die Pillow-Plates oft deutlich größer als eine Luftmatratze: zum Teil 2,2 Meter breit und 20 Meter lang. Da kommen wir schnell auf 10.000 kreisförmige Schweißnähte pro Bauteil. Die Nähte dürfen auf keinen Fall reißen, keine einzige, sonst muss der Hersteller – unser Kunde – manuell ran und das ist aufwendig. Vor allem in Fällen, wo die Platten erst nach der Montage aufgepumpt werden. Es geht also um enorme Prozesssicherheit.

DAS UNTERNEHMEN

Rodomach Specialmachines B.V. (Geurtsen Group) im niederländischen Deventer baut Laserschweißanlagen und Roboterzellen für unterschiedliche Industriezweige.

DIE ANLAGE

Die Maschine schweißt mit zwei Laseroptiken Pillow-Plates von bis zu 20 Meter Länge und 2,2 Meter Breite. Sie bearbeitet hochfeste und beschichtete Stähle, Edelstähle, Aluminium und Titan.

DIE TECHNOLOGIE

Die BrightLine-Weld-Technologie von TRUMPF erhöht die Schweißgeschwindigkeit. Ein spezielles Laserlichtkabel verteilt die Leistung optimal, so dass die Temperatur des Werkstücks niedrig bleibt.

AHEAD



Die Ära der erdnahen Satelliten hat begonnen. Die massenhafte Erschließung des Weltraums gelingt nur mit modernster Lasertechnik – beim Bau, in der Kommunikation und als orbitaler Verkehrspolizist.



Vom Mond aus sieht unser Heimatplanet aus wie eine blaue Kugel mit farbigen Klecksen und weißen Streifen. In absehbarer Zeit wird er eher einem Bienennest ähneln – statt von Insekten allerdings umschwirrt von waschmaschinengroßen Satelliten. Milliardäre wie Elon Musk und Jeff Bezos wollen mit ihren Firmen SpaceX und Amazon jede Menge Satelliten in die erdnahe Umlaufbahn (Low Earth Orbit, LEO) bringen. Die Satelliten sollen zur Lösung drängender Fragen der Zukunft beitragen: Wie gesund sind die Ackerböden? Wo brennen Wälder? Wie kann man den Verkehr besser planen? Wie lassen sich Schiffsrouten optimieren? Wie bewältigen wir die immense künftige Datenflut?

Das Aussichten sind gut, auch für Geschäftsleute: Die LEO-Technologie wird sich nach Ansicht von Experten zum Multimilliarden-Markt entwickeln. Regierungen, Bergbau-, Landwirtschafts- oder Schifffahrtsunternehmen tauschen immer mehr Daten aus, ebenso sind Smart Citys, das Internet of Things und autonomes Fahren auf eine globale, zuverlässige Netzabdeckung angewiesen. Nicht zuletzt sollen abgelegene und ärmere Regionen endlich ihren Zugang zum Internet erhalten. Dann können auch die Leute dort endlich ihren Lieblings-Instagram-Influencern folgen – und am globalen Internethandel teilhaben. Praktisch ein Konjunkturprogramm für die ganze Welt.

Allein ein Blick auf die beeindruckenden Zahlen reicht, um zu sehen, wie selbstbewusst die Satellitenbauer den Markt einschätzen. Bezos' Amazon hat die

Genehmigung zum Start von 3.236 Satelliten unter dem Namen Project Kuiper beantragt. Die staats-eigene China Aerospace Science & Industry Corporation plant ein Netz von 156 Satelliten bis 2022. Das kalifornische Unternehmen ViaSat möchte 288 Satelliten bis 2026 in die erdnahe Umlaufbahn bringen. Das ehrgeizigste Ziel verfolgt SpaceX: Musks Unternehmen hat die Vision, unglaubliche 42.000 Satelliten für ein weltumspannendes Kommunikationsnetz hochzuschießen – jedenfalls wenn es gelingt, die Kosten für die Massenproduktion und den Betrieb deutlich zu senken.

DIE RASENDEN REPORTER IM ALL Das ist kein leichtes Unterfangen, denn je näher die Umlaufbahn an der Erde ist, desto höher muss auch ihre Geschwindigkeit sein, um der irdischen Schwerkraft entgegenzuwirken. Herkömmliche Kommunikationssatelliten bewegen sich in einer Höhe von etwa 36.000 Kilometern synchron mit der Erdumdrehung mit ungefähr 11.000 Kilometern pro Stunde. Von der Erde aus gesehen sind sie daher immer am selben Fleck über uns. LEO-Satelliten befinden sich hingegen in einer Höhe von nur 500 bis 2.000 Kilometern und fliegen mit einer Geschwindigkeit von etwa 27.000 Stundenkilometern, also schneller als die Erdumdrehung. Sie umrunden daher alle 90 bis 120 Minuten die Erde, weshalb jeder Satellit nur für einen Zeitraum von wenigen Minuten mit einem Bodensender kommunizieren kann. Das ist der Grund, warum SpaceX so viele Satelliten braucht: Sobald einer die

*Jedes Kilo, das man ins All schießt,
kostet 15.000 Euro.*

Reichweite des Empfängers wieder verlässt, kommt auch schon der nächste – wie bei einem Staffellauf. Nur so ist eine kontinuierliche Verbindung gewährleistet. Das ist nicht nur für den Netflix-Zuschauer auf der Erde wichtig, sondern auch für SpaceX: Sollte ein Satellit mal mit einem Stück Weltraumschrott kollidieren und zerschellen, gefährden seine Trümmer als neuer Weltraumschrott sofort alle anderen LEOs auf derselben Umlaufbahn. Darum ist es wichtig, stets in Echtzeit zu wissen, was die Satellitenschar macht.

Aber warum nehmen die Unternehmen überhaupt diesen Aufwand in Kauf? Warum gehen sie nicht wie bisher in die höheren Regionen? Weil die Nähe zur Erde einen immensen Vorteil bringt: flinken Datenfluss. Die Zeit, die für das Senden und Zurücksenden der Daten benötigt wird – die so genannte Latenzzeit – ist bei LEO-Satelliten weitaus geringer als bei den weiter entfernten. In den klassischen Umlaufbahnen beträgt eine mittlere Latenzzeit fast 600 Millisekunden. SpaceX strebt 20 Millisekunden an und später sogar die Hälfte

davon. Da sich Signale im Orbit schneller ausbreiten als über Glasfaserkabel, haben LEO-Satelliten das Potenzial, mit den bodengestützten Netzen zu konkurrieren und sie womöglich sogar zu übertreffen.

NEUE INFRASTRUKTUR PER LASER Fest steht jedenfalls schon jetzt: Die LEO-Satelliten werden ein wesentlicher Bestandteil der künftigen Breitbandkommunikation, schaffen eine neue Infrastruktur im All – und die Lasertechnik spielt im Bau und Betrieb eine Hauptrolle. Das ist nicht überraschend, denn im Satellitenbau kommen ohnehin Hightech-Werkstoffe zum Einsatz, die Ingenieure am liebsten per Laser bearbeiten. Zudem gibt es Kontrolleure, die mit Laserlicht Schweißungen überprüfen, und es gibt Techniker, die Bauteile mit Laserlicht markieren – für eine lückenlose Nachvollziehbarkeit in der Qualitätskontrolle. Und nun kommt noch eine weitere Laser-Innovation hinzu: der Metall-3D-Druck von Bauteilen wie zum Beispiel Antennen.

[BEEP]: 3D-DRUCK

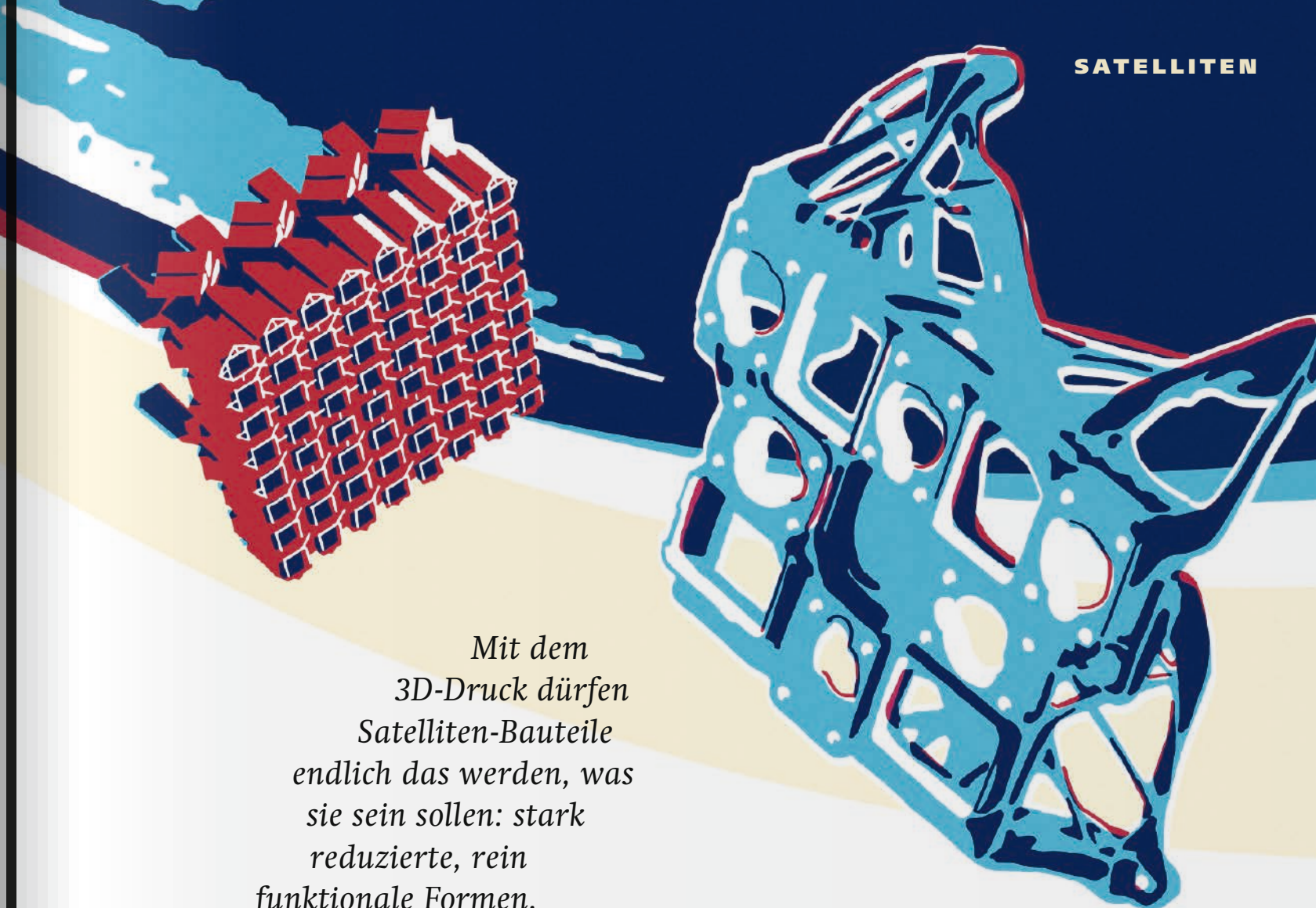
Für die Datenübertragung im Äther werden spezielle Antennen benötigt, die äußerlich nichts mehr mit traditionellen Antennen zu tun haben. Eines der verfügbaren Antennensysteme sieht zum Beispiel aus wie aneinandergeschlossene, aufrecht stehende Minitaschenlampen. Im unteren Bereich befindet sich ein Hohlleiter mit speziellen Geometrien als Filter. Diese Strukturen sind so gebaut, dass sie die elektromagnetischen Wellen verstärken oder in bestimmten Frequenzbereichen dämpfen. Der obere, breitere Teil ist der Ausgang, an dem die Daten übertragen werden. Durch Phasenversetzung kann die Antenne ihre Daten in eine bestimmte Richtung lenken, ohne dass sie sich dafür drehen muss.

Die Herstellung der Antennen ist eine filigrane Meistertat. Sie weisen Strukturen auf, die sich mit konventionellen Verfahren wie Drehen, Fräsen, Gießen oder Biegen nicht herstellen lassen. Da schlägt die Stunde des 3D-Druckers: Er kann jede noch so verdrehte, komplexe Form aufbauen – und deshalb eben auch die kurvigen Hohlräume mit ihren extrem dünnen Wänden und stabilisierenden

Rippen. Diese Geometrien haben großen Einfluss auf die Frequenz, die an den Antennen anliegt. Je höher die Frequenz, umso höher ist der Datendurchsatz und umso kleiner müssen die Bauteile letztendlich werden.

Die winzigen Laser-Spotgrößen moderner additiver Fertigungssysteme erlauben feinste Wandstärken von bis zu 100 Mikrometern, abhängig von der Geometrie. Der Drucker kann Material haargenau so verteilen, dass die Geometrie dem Kraftfluss folgt. Der 3D-Druck kann auf diese Weise jede Idee eines Ingenieurs eins zu eins in Metall materialisieren – und das mit höchster Präzision in Serie.

Das zweite Hoheitsgebiet des 3D-Druckers sind Halterungen im Satelliten, die die Antennen oder andere Bauteile tragen, sogenannte Brackets. Sie sind zahlreich und unentbehrlich. Aber sie brauchen Platz und tragen zum Gesamtgewicht bei. Lange hat man die Brackets im Satellitenbau grummelnd als notwendiges Übel akzeptiert. Aber bei Zehntausenden von Satelliten lohnt es sich, noch einmal frisch über sie nachzudenken. Auch hier kann der



*Mit dem
3D-Druck dürfen
Satelliten-Bauteile
endlich das werden, was
sie sein sollen: stark
reduzierte, rein
funktionale Formen,
die fast nichts
wiegen.*

3D-Druck Abhilfe schaffen. Jetzt endlich können Ingenieure die Brackets auf das Minimum an Material reduzieren, indem sie sie – wie die Antennen – in den exakt berechneten Kraftflüssen folgenden Formen drucken. 55 Prozent Gewichtsersparnis pro Bracket sind möglich. Für einen Satelliten mit unzähligen Brackets kommt da einiges an neuer Leichtigkeit zusammen.

NIMM PLATZ IM ALL TRUMPF, die Europäische Weltraumorganisation (ESA) und weitere Projektpartner erforschen zudem den Laser-Druck von Spulen, die sich am Erdmagnetfeld orientieren und helfen, den Satelliten zu positionieren; sie sind kaum größer als eine Zweieuro-Münze. Bereits im Einsatz hingegen sind gedruckte Schubdüsen, die die Satelliten ausrichten. Sie haben innere Kanäle zur Kühlung und zur Führung von Treibstoff. Vor der Erfindung des 3D-Drucks war das fast nicht möglich und unendlich umständlich. Der Drucker jedoch formt die Kühlkanäle jetzt einfach mit, schlängelt sie durch die Wände, um eine ideale Brennstoff-

verteilung zu erreichen. Zudem spart der 3D-Druck erneut Gewicht.

Wie überhaupt das Leitmotiv Gewicht bei jeder neuen Laserapplikation immer ein Hauptargument ist. LEO-Satelliten-Bauer sind besessen davon, jedes Gramm zu sparen. Die wirtschaftliche Rechnung ist einfach: Jedes einzelne Kilo, das man ins All schießt, kostet. Die Bandbreite ist je nach Rakete und Anbieter groß, aber über den Daumen kann man 15.000 Euro pro Kilo rechnen. Mithilfe von Lasertechnik sind pro Satelliten Einsparungen von 10.000 bis 20.000 Euro denkbar. Bei der hohen Anzahl der Satelliten addiert sich das für die Unternehmen auf immense Millionenbeträge, die sie nun für etwas anderes ausgeben können.

Hochwillkommener Nebeneffekt: Da alle Lasersysteme digital eingestellten Parametern folgen und mit Sensoren eine Vielzahl an Daten speichern, entsteht wie nebenbei eine lückenlose Dokumentation des gesamten Prozesses. Fertigungsmängel – und damit Irrflieger – gelangen so gar nicht erst in den Orbit.

[BEEP-BEEP]: WELTRAUMSCHROTT

Dort gibt es ohnehin schon genug Schrott. Eine Schattenseite der LEO-Satelliten ist ihre relativ geringe Betriebsdauer von fünf bis sieben Jahren. Weil sie so nahe an der Erde entlangfliegen, sind sie großer atmosphärischer Reibung ausgesetzt und altern rasch. Danach werden sie per Fernsteuerung kontrolliert zum Absturz gebracht und verglühen in der Atmosphäre. Manchmal jedoch kollidieren Satelliten oder fallen komplett aus – dann werden sie zu Weltraummüll.

Die erdnahe Umlaufbahn gleicht bereits einem gigantischen Schrottplatz: 3.000 funktionsunfähige Satelliten schweben um die Erde, 34.000 Einzelteile ab zehn Zentimeter und 128 Millionen Teile unter einem Millimeter. Und wo viel Zeug schwirrt, kann es krachen. Die Internationale Raumstation ISS musste solchem Schrott seit Betriebsstart schon 25-mal in aufwendigen Manövern ausweichen. Der NASA-Wissenschaftler Donald Kessler fürchtet sogar eine Kettenreaktion, den nach ihm benannten Kessler-Effekt: Bei einer Überfüllung des Weltraums könnte es zu Kollisionen kommen, die Trümmer auslösen, was wiederum weitere Kollisionen verursacht – eine Art Massenkarambolage.

Das Institut für Technische Physik in Stuttgart, Teil des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, rückt mit Lasern direkt gegen den Weltraumschrott vor. Der Plan: Laser Nudging. Sie wollen Weltraumschrott von der Erde aus durch Photonen-Lichtdruck anstupfen. Dabei geht es gar nicht darum, die Teile

mit Wucht aus dem Weg zu schucken. Es geht auch sanfter, denn das Nudging nutzt den Umstand, dass bei den hohen Geschwindigkeiten und den riesigen Strecken in der Umlaufbahn selbst minimale Abweichungen zu großen Bahnveränderungen führen. Und dafür reicht schon ein kleiner Schubser mit einer sehr geringen Menge an Energie. Der Schrott lässt sich somit mit wenig Aufwand zum Verglühen in die Atmosphäre lenken.

TAG-AUGE FÜR TRÜMMERJÄGER Aber dafür muss man die Schrottteile erst einmal aufspüren und verfolgen. Zum Glück gibt es auch hierfür eine laserbasierte Anwendung. Durch eine spezielle Kombination von Teleskopen, Detektoren, Lasern und Lichtfiltern bei bestimmten Wellenlängen gelang es zum Beispiel ESA-Forschern, den Kontrast von Himmelsobjekten zum Tageshimmel zu erhöhen und sie somit besser zu erkennen. „Wir haben uns an die Vorstellung gewöhnt, dass man Sterne nur nachts sehen kann, und das gilt auch für die Beobachtung von Trümmern mit Teleskopen, nur dass das Zeitfenster für die Beobachtung von Objekten in niedrigen Umlaufbahnen viel kleiner ist“, erklärt Tim Flohrer, Leiter des ESA-Büros für Weltraummüll. „Mit der neuen Technik wird es möglich sein, bisher unsichtbare Objekte zu verfolgen, die am blauen Himmel lauerten, was bedeutet, dass wir den ganzen Tag mit Laserentfernungsmessungen arbeiten können, um die Kollisionsvermeidung zu unterstützen.“

Das DLR will
Weltraumschrott
per Laser zum
Abstürzen
und Verglühen
bringen.

[BEEP-BEEP-BEEP]: KOMMUNIKATION

Auch in einem ganz anderen Feld werden Laserstrahlen das entscheidende Werkzeug für die neuen LEO-Satelliten: beim Austausch von Daten. Traditionelle Satelliten „stehen“ quasi über der Erde und kommunizieren mit der Bodenstation per Funkwellen.

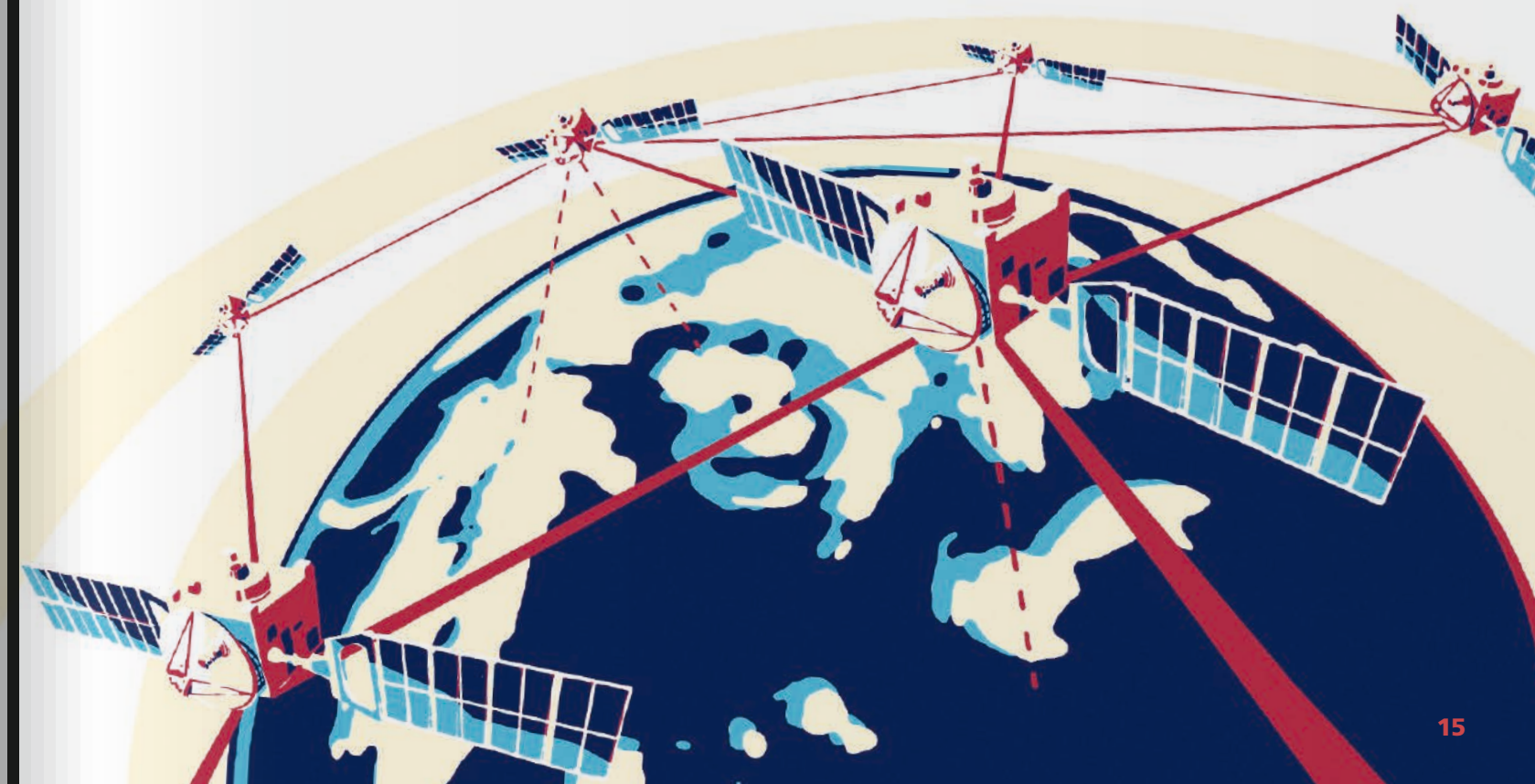
Die LEOs hingegen rasen ja mit einem Irrsinnstempo um die Erde und müssen sich daher nicht nur per Funk mit der Erde austauschen, sondern auch untereinander im All. Nur so können die Unternehmen eine permanente Netzabdeckung gewährleisten. Und auch da setzt man künftig auf Laser, denn zusätzliche Funkübertragungen zwischen den Satelliten würde noch mehr große Antennen und energiehungrige Verstärker erfordern. Dann doch lieber optisch. Erscheint der rasende Satellitenkollege im Blickfeld des Suchalgorithmus, feuert der LEO einen Laserstrahl auf ihn, dicht gepackt mit Informationen. Ein fantastisches Präzisionsschießen im Weltraum – über 5.000 Kilometer hinweg!

Forschern des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums bei München gelang es, per Laserstrahl 1,7 Terabit pro Sekunde zu übertragen und somit fast das fünfzigfache Volumen der Funkwellen.

Ein weiterer Vorteil von Laserstrahlen besteht in der Lichtbündelung. Die ausgestrahlten Informationen kommen gezielt beim Empfänger an – das erschwert es, diesen Datenverkehr illegalerweise abzufangen. Darüber hinaus ist die optische Kommunikation effizient und stellt nur geringe Anforderungen an Größe, Gewicht und Energie. Und: Licht ist lizenzfrei. Die Nutzung von Funkfrequenzen durch Satelliten verlangt eine Genehmigung der Internationalen Fernmeldeunion ITU. Bekommt man eine Frequenz zugewiesen, muss man eine regelmäßige Gebühr zahlen. Licht kostet nix.

NEUE LASER-ÄRA Heute sind schon 1.500 SpaceX-Satelliten im Weltraum. Mit Apps wie „Star Walk 2“ kann man sich den Spaß machen, sie am Himmel zu suchen und von Woche zu Woche dem Schwarm beim Anschwellen zuzuschauen. Mit dem Smartphone in der Hand und der LEO-Schar über dem Kopf wird klar, dass wir in eine neue Ära eingetreten sind: das Zeitalter der massenhaften Satellitenkommunikation. Sie ist auch eine Ära der Lasertechnologie. ■

Laserkommunikation der Satelliten untereinander —
ein fantastisches Präzisionsschießen im Weltall.





Von Anfang an klar:
Mercedes-Benz
Elektrofahrzeuge wird
es nur mit eigener
Batterietechnologie
geben.*

MIT STRATEGIE ZUR BATTERIE

Mercedes-Benz investiert seit 2020 Milliarden in einen internationalen Fertigungsverbund aus neun Fabriken zur Batterienherstellung. Warum das jetzt so rasch funktioniert, versteht nur, wer zehn Jahre zurückschaut. Es ist 2010: Mercedes-Benz beschließt, Batteriemodule künftig selbst zu bauen. Dazu müssen die einzelnen Batteriezellen, hier sogenannte Pouch-Zellen, elektrisch leitend miteinander verbunden werden. Klingt einfach, ist es aber nicht. Denn wie verbindet man zwei sehr dünne Metallstreifen aus Aluminium und Kupfer, sogenannte Ableiter, mit möglichst geringem elektrischen Widerstand und hoher mechanischer Festigkeit ohne sie dabei

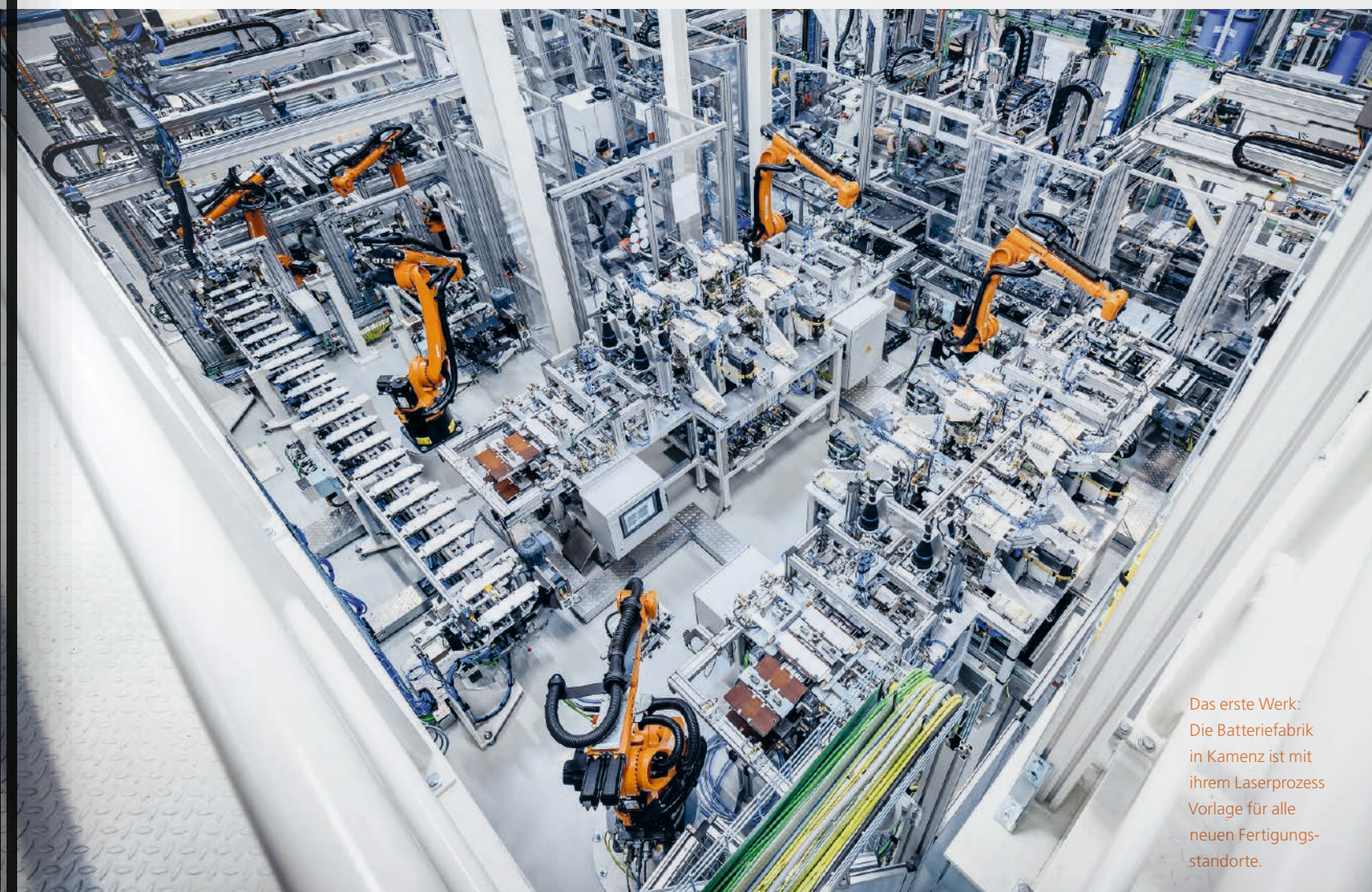
zu verbiegen oder beschädigen? Und das noch dazu sehr nahe an einem hitzeempfindlichem Bauteil und mit sehr beengten Platzverhältnissen? Später sollen in der Gesamtbatterie dann Spannungen von 400 Volt mit einigen hundert Ampere fließen. Das macht die Sache in wahrsten Sinne des Wortes spannend.

DER GROSSE PLAN Mechanische Lösungen sind daher schnell aus dem Rennen und der Laser als Präzisionswerkzeug kommt ins Spiel. Christian Elsner ist damals Leiter der Lasermaterialbearbeitung in der Technologiefabrik in Stuttgart-Untertürkheim und sein Job ist es, mit seinem Team einen Weg zu finden, bis zu 350 Pouch-Zellen in eng gestapelten Bat-

terie-Modulen an diesen Ableitern miteinander zu verschweißen – und zwar im Minutentakt. Jeder Fehler, der hier passiert, könnte die Ladegeschwindigkeit, Kapazität und Lebensdauer der Batterie beeinträchtigen. Vor allem eine Gefahr droht, wie Elsner erzählt: „Die Ableiterfolien dürfen sich keinesfalls unzulässig erwärmen. Denn ihr anderes Ende badet ja in hitzeempfindlichen Elektrolyten und Temperaturen über 70 Grad könnten die Zelle zerstören.“ Sehr genaue Schweißungen an sehr dünnem Metall also – und erhitzen darf sich nichts. Ein klassisches Dilemma.

Die Aufgabe ist Teil des großen Plans des Unternehmens, einen eigenen Herstellungsprozess für Batterien zu entwickeln. Dieser

*EQ4 250, Stromverbrauch kombiniert: 15,7 kWh/100 km; CO₂-Emissionen kombiniert: 0 g/km. Foto: Mercedes-Benz AG



Das erste Werk:
Die Batteriefabrik
in Kamenz ist mit
ihrem Laserprozess
Vorlage für alle
neuen Fertigungs-
standorte.

Der Markt für Elektrofahrzeuge zieht rasant an und leistungsfähige Antriebsbatterien sind gefragt wie nie. Im Produktionswerk der Mercedes-Benz Tochter Accumotive laufen sie schon seit 2012 vom Band. Von Anfang an ein unverzichtbares Werkzeug: der Laser.

soll zunächst 2012 im sächsischen Städtchen Kamenz eingeführt werden und dann zur Vorlage für die kommenden Fabriken eines weltweiten Fertigungsverbunds reifen.

DER WEG NACH KAMENZ Doch zuerst muss Elsner das Hitzeproblem in den Griff kriegen. Er und sein Team setzen auf Laser-Remoteschweißen. Hierbei bewegen Spiegel den Laserstrahl und ermöglichen so sehr große Schweißgeschwindigkeiten in hoher Präzision. Zudem lässt die Optik den Laserstrahl aus etwa 30 bis 40 Zentimetern Entfernung fast ohne Zeitverlust von Naht zu Naht springen. So braucht der Laser nur Millisekunden für eine Schweißung, bringt deshalb kaum Wärme

ein und schafft hunderte von Schweißungen in wenigen Minuten. Damit die Schweißungen den Strom einwandfrei leiten, darf der Strahl jedoch nie durch die dünnen Ableiterfolien durchschweißen oder Spritzer um die Schweißung verteilen. Dazu muss das Team Prozessparameter wie die Fokusslage und Leistungsdichte trotz Entfernung und hoher Prozessgeschwindigkeit extrem genau steuern. Die richtige Strahlquelle findet sich schnell: der TruDisk 5001 von TRUMPF. Er bietet nicht nur die erforderliche Strahlqualität, um den Strahl auch beim Remoteschweißen sehr fein zu fokussieren, sondern auch eine stark reduzierte Spritzerbildung – selbst im schwer zu schweißenden Kupfer.

So entsteht der Schweißprozess für die erste Batteriefabrik in Kamenz. Mercedes-Benz gründet die Tochter Accumotive, die das Werk führt, und 2012 nimmt es die Arbeit auf. Heute montieren in der „Ur-Fabrik“ drei 170 Meter lange voll automatisierte Fertigungsstraßen die Batterien. Jede Straße hat 30 Fertigungsstationen, von denen an mehreren Stationen geschweißt wird. Insgesamt 35 Strahlquellen, mehrheitlich vom Typ TruDisk 5001 versorgen die PFO-Schweißoptiken über ein Lasernetzwerk. Die Fokussierung auf einen Typ Strahlquelle und einen Typ Schweißoptik für alle Aufgaben ist Teil des Konzepts. Das reduziert Komplexität, Ersatzteilhaltung und Schulungsbedarf.

In den Linien kleben zunächst Roboter vollautomatisiert zwei Zellen in einen Rahmen ein, die dann später zu Modulen aneinandergereiht werden. Vorher werden noch die Ableiter auf Maß zurechtgeschnitten und übereinander gebogen. Zum Schweißen drücken dann spezielle Spannvorrichtungen die Metallfolien flach aufeinander, die Optik geht in Position und das Laserlicht huscht über das Metall. Die Spannvorrichtung öffnet, die Rahmen wandern weiter und vereinigen sich zu Modulen. Auch hier kontaktiert der Laser wieder. Anschließend setzt ein Greifer ein Sensormodul mit noch dünneren Kontakten auf, die mit der gleichen Technik aber weniger Leistung verschweißt werden. Ist ein

Modul fertiggestellt und geprüft, werden mehrere Module in eine Batteriewanne montiert und elektrisch miteinander verschaltet. Wo immer der Laser dabei elektrische Kontakte verschweißt, sind TruDisk 5001 und PFO-Optiken wieder dran.

Diese gesamte Batterie-Baugruppe, bei voll elektrischen Fahrzeugen wie dem Mercedes EQC fast so groß wie das Auto und etwa 750 Kilogramm schwer, wird dann in der Fahrzeugmontage mit dem Chassis und dem elektrischen Antriebsstrang verbunden.

Dass der Strahl dabei die richtige Stelle trifft, dafür sorgt die Anlagensteuerung mit der Bildverarbeitung VisionLine. Die Software erkennt durch einen optischen Sensor die

Kanten der Spannvorrichtung und schweißt die Naht in genau definiertem Abstand dazu. Elsner erklärt: „Die Maschine sieht buchstäblich, was sie tut – und kann es dokumentieren.“

GOLD AUS DATEN Tatsächlich sind die Daten aus der Fertigung für Mercedes-Benz dreifach Gold wert. Im Fertigungsfluss dienen sie dazu, die Prozesse zu steuern und zu überwachen. Per Sensoren am Schweißkopf aufgenommen, ausgewertet und definiert abgelegt, dokumentieren sie die Qualität jedes Prozessschrittes. „Wir können damit die Schweißung online, quasi in Echtzeit, überwachen“, erklärt Elsner.

Richtig ausgewertet, liefern die Daten außerdem wertvolle Aufschlüsse für die weitere Entwicklung von Prozess und Anlagen. Für Elsner eine Seite des Lasers, die noch immer oft übersehen wird: „Kaum ein Fertigungsprozess liefert mit denselben Parametern so zuverlässig dieselben Ergebnisse und gibt so viel Information über den Prozess zurück.“

JETZT WIRD'S GROSS Für die Zukunft von Kamenz, Accumotive und Mercedes-Benz ist beides sehr wichtig. Denn inzwischen passiert, worauf Elsner wie viele andere seit dem Sommer 2010 hingearbeitet haben: Mit den vollelektrischen EQ-Modellen und auch den Plugin-Hybridfahrzeugen wächst der Batteriebedarf im Konzern. Mercedes-Benz investierte Milliarden in einen internationalen Fertigungsverbund mit aktuell neun Fabriken in Europa, Asien und Amerika. Kamenz dient dabei als Vorbild und Kompetenzzentrum für alle neuen Werke.

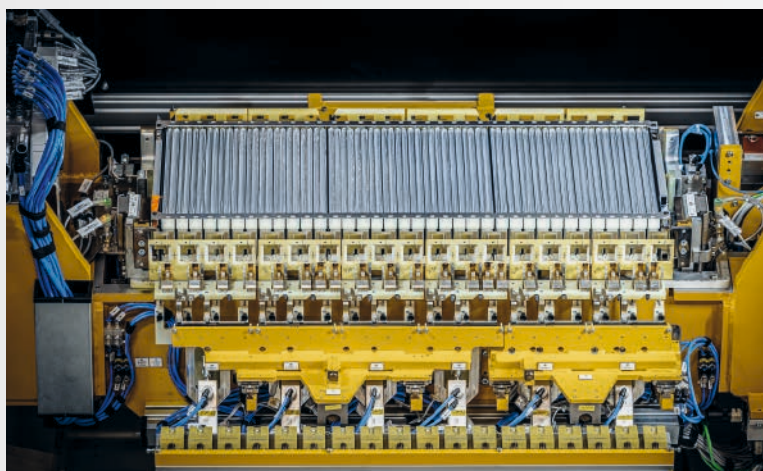
Und der Laserprozess selbst? Elsner: „Die Strahlquellen, Laseroptiken und Sensoren entwickeln sich stetig weiter und machen Prozesse noch robuster, schneller oder kostengünstiger. Manchmal erschließen sich dadurch auch völlig neue Anwendungsfelder, in denen der Laser seine Vorzüge ausspielen kann. Natürlich steht hinter jeder erfolgreichen Umsetzung in der Großserie auch immer viel Fleiß und Herzblut in der Entwicklung im Labor.“ Gerade die Elektromobilität biete hier eine Fülle an neuen Aufgaben. „Über Langeweile oder einen Mangel an spannenden und herausfordernden Themen haben wir in der Lasertechnik nicht zu klagen.“ ■

Kontakt:

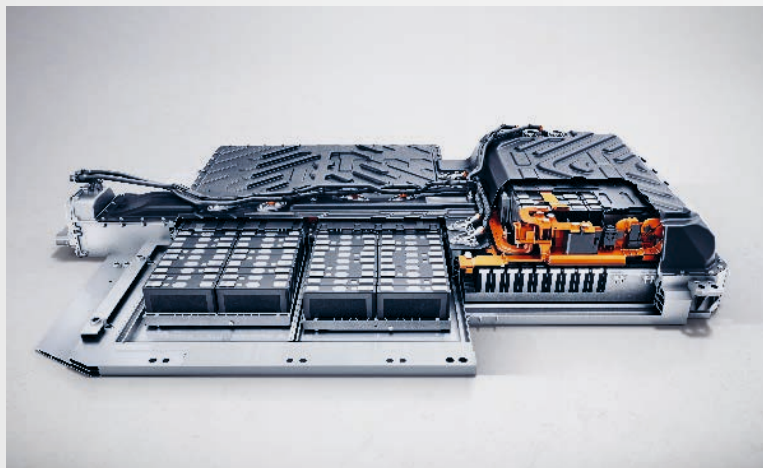
Mercedes-Benz AG, Christian Elsner,
Leiter Laser-Materialbearbeitung Prozessentwicklung,
christian.elsner@daimler.com

„DIE MASCHINE SIEHT, WAS SIE TUT – UND KANN ES AUCH DOKUMENTIEREN.“

Christian Elsner, Leiter Laser-Materialbearbeitung Prozessentwicklung bei Mercedes-Benz

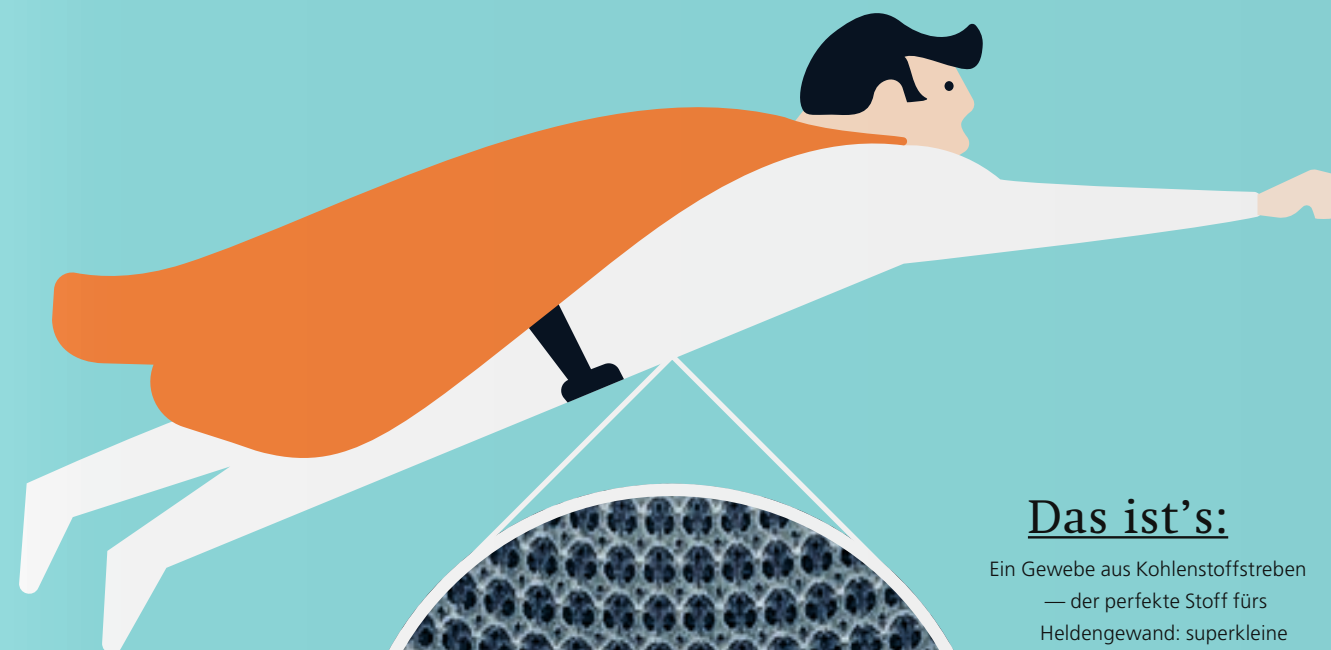


Oben:
Ein Stack Batteriezellen, eingespannt und klar zum Schweißen



Unten:
Eine fertige Batterie des EQA

So druckst du deinen eigenen Supermann-Anzug*

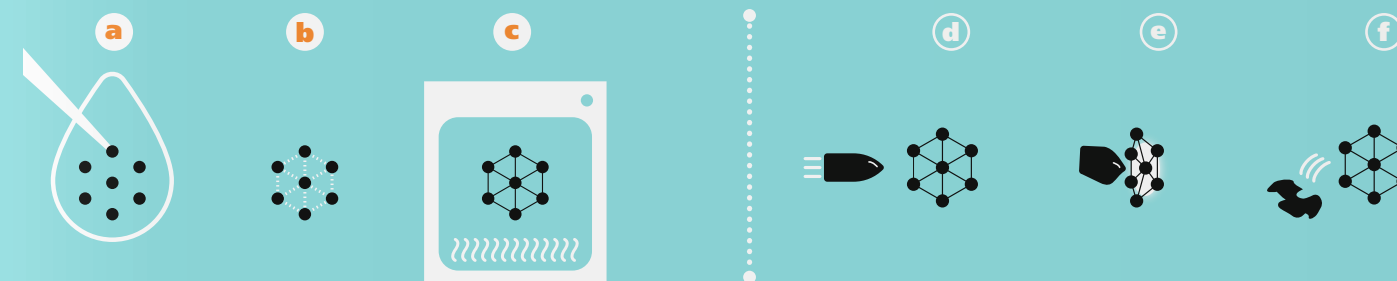


Das ist's:

Ein Gewebe aus Kohlenstoffstreben — der perfekte Stoff fürs Heldengewand: superkleine Strukturen, superleicht, superstabil!

So geht's:

Einfach flüssiges Harz per Zwei-Photonen-Lithografie nanogenau aushärten (a), den Rest abwaschen (b) und dann festbacken (c).
Fertig!



So wirkt's:

Kommt ein Geschoss mit einer Wucht von bis zu 1.100 Metern pro Sekunde (d) — das ist fast dreifache Schallgeschwindigkeit! —, dann absorbiert das Textil den Stoß (e). Das Geschoss prallt ab und zerbirst (f).**

* Das Gewebe kannst du auch für schussichere Westen benutzen oder als Schutzhaut, zum Beispiel für Satelliten.

** Forscher an ETH Zürich, MIT und Caltech haben das neue Textil entwickelt. Bisher können sie nur mikrometergroße Tücher weben, aber sie arbeiten daran, größere herzustellen.

Eine mobile Roboterzelle automatisiert das Schweißen von Okularen. Für die Medizintechnik ist das ein Novum, für Karl Storz der Weg in die Zukunft.

Zielstrebig greift sich der Roboter zwei Edelstahlzylinder, auf denen jeweils eine edelstahlgefasste Linse liegt, und platziert die künftigen Endoskop-Okulare exakt auf einer Schweißvorrichtung. Ein kleiner Bügel klappt um und fixiert die Bauteile dort. Die Maschinentür schließt sich und der Laser beginnt zu schweißen. Blitzschnell heftet er den Edelstahlring der Linse mit drei Schweißpunkten auf den Zylinder. Dann schweißt er den Ring rundum fest. Zack. Schon ist das nächste Okular dran.

„Beeindruckend?“, fragt Sarah Mühleck. Sie leitet in Widnau den Schweizer Standort des Tuttlinger Medizintechnikherstellers Karl Storz und antwortet gleich selbst: „Ja.“ Ihr Blick gilt dabei allerdings nicht dem Laser. Der tut genau das, wofür die Branche ihn seit Jahren liebt: präzise, schnell und sicher schweißen. Aber in dieser Geschichte ist der eigentliche Held der Roboter. Denn er hilft Mühleck, noch sehr viel mehr aus ihrem Laser herauszuholen.

DER MENSCH KANN'S BESSER Roboter begegnen einem in der Fertigung von Medizintechnikherstellern selten und das aus gutem Grund, wie Mühleck erklärt: „In Branchen, wie der Automobilindustrie, wo es viele gleiche Teile und große Serien gibt, ist der Roboter überall. Doch wir haben hier eine enorme Produktvarianz bei gleichzeitig überschaubaren Stückzahlen. Das sorgt für eine hohe Komplexität, da ist eine Automatisierung schwerer umsetzbar. Und der Mensch ist viel feinfühlicher, arbeitet darum oftmals schlicht schneller und geschickter als die Maschine.“

Außerdem können die qualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter anspruchsvolle Aufgaben lösen. Und genau dafür möchte Mühleck sie verstärkt einsetzen: „Wir nutzen das Wissen unserer Fachkräfte lieber für knifflige Aufgaben und nicht für das simple Bestücken einer Anlage. Außerdem ist das Be- und Entladen eine sich wiederholende Tätigkeit und gleiche Bewegungen sind für die Mitarbeitenden sehr belastend“, sagt sie. Gemeinsam mit ihrem Team prüfte sie, ob sich das Schweißen der Okulare nicht doch automatisieren lässt, und stellte schnell fest: Das geht!

Und so zog der Roboter-Held in Widnau ein. Dort ist er Teil der Automatisierungszelle Flextray von wbt automation. Die wiederum steht vor einer TruLaser Station 7000 von TRUMPF. Job des Roboters ist es, die Laserschweißanlage mit Rohteilen und fertigen Okularen zu beladen und und sie wieder zu entladen. Die nimmt er aus den Schubladen oder „Trays“, die der Zelle ihren Namen geben. Sarah Mühleck erklärt: „Die Zelle hat vier dieser Schubladen. Darin haben 960 Bauteile Platz. Während drinnen Roboter und Laser den Inhalt der ersten Schublade abarbeiten und in der zweiten ablegen, entlädt der Bediener draußen die dritte und bestückt die vierte mit Rohteilen. Dann widmet er sich anderen Dingen, bis die Fertigungszelle mit ihrem Teil der Arbeit

durch ist und er wieder entladen kann.“ So bindet dieselbe Menge an Okularen weit weniger menschliche Arbeit. Das Besondere an der Automatisierungszelle: Das System ist mobil. Sollen kleinere Stückzahlen ohne Automatisierung gefertigt werden, lässt sich die Roboterzelle einfach abdocken und zur Seite schieben. Variantenvielfalt: Check!

AUTOMATISIERTE ZUKUNFT

Und wie war das jetzt mit der Feinfühligkeit? Technische Präzision und ein spezielles Greifsystem für die Okulare sind die Antwort. Das Robotersystem von Kuka ist exakt vermessen. Dadurch kann der Roboter bestimmte Punkte viel präziser ansteuern als ein Standard-Industrieroboter. „Für uns ist das extrem wichtig, denn bei den Okularen liegen die Unterschiede teilweise im Zehntelbereich“, sagt Mühleck. Das endgültige Fingerspitzengefühl beim Einlegen in die Schweißvorrichtung bringt der spezielle Doppelgreifer mit. Wenn er das Zylinderlinsen-Paket aus der Schublade aufnimmt, legt sich ein kleiner Vakuumbalg auf die Linsen und drückt sie auf dem Weg zur Schweißvorrichtung sanft an, sodass unterwegs nichts verrutscht. Anschließend bestätigt ein Laserscanner: sitzt nach wie vor, wie es soll. Erst dann folgen Bügel, Heftpunkte und Schweißnaht.

Automatisierung in der Medizintechnik geht also doch? „Absolut!“, sagt Mühleck und fügt lachend hinzu: „Bisher habe ich von der Anlage eigentlich sehr wenig mitbekommen – und das ist doch ein ziemlich gutes Zeichen.“ Den Weg Richtung Automatisierung will sie bei Karl Storz auch künftig weitergehen. „Wir werden zwar weiterhin noch viel händisch machen, wir wollen aber die Arbeitsgänge automatisieren, die sich sinnvoll automatisieren lassen. Mit einer flexiblen Roboterzelle können wir beides.“ ■

Kontakt: Storz Endoskop Produktions GmbH, Sarah Mühleck, Produktionsleitung KSO Widnau, Telefon: +41 71 726-1272, sarah.muehleck@karlstorz.com



Sarah Mühleck leitet den Schweizer Standort von Karl Storz.



Der Doppelgreifer verfügt über das nötige Fingerspitzengefühl.

Während der Roboter die Okulare abarbeitet, kann die Mitarbeiterin etwas Besseres tun. Nur das Beladen zwischendurch geschieht noch von Hand.

BLITZJÄGER

- 01 — PROF. JEAN-PIERRE WOLF HAT EINE IDEE
- 02 — CLEMENS HERKOMMER BAUT EINEN LASER



„Die Leute denken,
Geoengineering
sei etwas Anrüchiges.“



Prof. Wolf auf dem Gipfel des Säntis in der Schweiz.
Hier oben testet er seinen Laser-Blitzableiter.

Prof. Wolf, Ihr erstes Feldexperiment mit dem Laser-Blitzableiter ist vorüber. Wie lief's?

Der Sommer war eigentlich sehr gut für uns: viele Gewitter, viele Stürme, viele Blitze. Wir haben zahlreiche Daten aufgenommen, die wir jetzt auswerten müssen. Oft haben die Blitze den Turm erreicht, wenn es gleichzeitig viel Nebel gab. Die Auswertung ist deswegen noch aufwendiger, da wir nur wenige Bilder haben. Aber das erste Feldexperiment war es ohnehin nicht.

Was war das erste?

Vor 16 Jahren saßen wir drei Monate auf dem South Baldy Peak in über 3.000 Meter Höhe in New Mexico und versuchten vergeblich, Blitze per Laser aus den Wolken zu triggern. Doch nie in der aufgezeichneten Wettergeschichte dieser Gegend gab es so wenige Gewitter wie in jenem Sommer: nur drei Stück in 90 Tagen, sonst gewittert es statistisch einmal pro Tag. Wir hatten schreckliches Pech. Der Laser versagte, er kitzelte die Wolken bloß. Auch sonst war bald klar, dass es so nicht weitergeht. Darum haben wir uns nun für einen neuen Ansatz entschieden.

Was machen Sie jetzt anders?

Der Aufbau des Experiments ist neu: Statt die Blitze per Laser zu triggern, warten wir einfach auf das Gewitter und leiten den Blitz mit dem Laser auf einen klassischen Blitzableiter. Das scheint uns der praktischere Ansatz zu sein. Die ionisierte Luft sticht wie eine hundert Meter lange Lanze in den Himmel und schützt einen Umkreis von ebenfalls hundert Metern vor Blitzeinschlag. Wir gehen davon aus, dass wir die Lanze und damit den Umkreis später einmal auf eintausend

Martin Stollberg

01

—
PROF. JEAN-PIERRE
WOLF KAM AUF
DIE IDEE, PER
LASER BLITZE
ABZUWEHREN.
HIER SPRICHT ER
ÜBER DIE CHANCEN
SEINER ERFINDUNG
UND WIE UNS
DAS GEGEN DIE
KLIMAERHITZUNG
HELFFEN KÖNNTE.

Meter verzehnfachen können. So, und jetzt stellen Sie mir bitte die gleiche Frage, die mir jeder sofort stellt.

Öhm, welche Frage denn?

Nach den Vögeln (grinst).

Was passiert, wenn der Laserstrahl einen Vogel trifft?

Wir wissen es nicht. Es ist noch nie passiert, obwohl wir diese Experimente seit Jahren durchführen. Aber es ist plausibel, anzunehmen, dass es schlecht wäre für den Vogel. Unser Laser ist nicht augensicher. Wenn der Laser angeschaltet wird, könnte es tatsächlich passieren, dass es einen Unglücksraben trifft. Aber da der Strahl während des Betriebs ja starr und meistens sichtbar ist, sind wir uns ziemlich sicher, dass alle Vögel – sie sehen Grün von Natur aus hervorragend – klug genug sind, ihn zu meiden. Bei Gewitter fliegen ohnehin kaum Vögel, sie verkriechen sich.

Also: Niemand muss Angst um die Vögel haben. Flugzeuge übrigens haben wir im Blick. Das Schweizer Bundesamt für Zivilluftfahrt definierte eine Sperrzone von fünf Kilometern um den Laser. Zusätzlich ist das System mit der Luftüberwachung verbunden und schaltet sich automatisch ab, falls doch mal ein Flugzeug in die Sperrzone gerät. Wissen Sie, die ionisierte Lanze ist zwar bloß einhundert Meter lang, der Laserstrahl selbst zwar divergent, aber theoretisch unendlich. Es ist aber ausgeschlossen, dass wir mit dem Strahl ein Flugzeug streifen. Für die Flugzeugstruktur wäre dies zwar nicht gefährlich, aber sehr wohl für die Augen der Piloten und Passagiere.

Wie kamen Sie auf die Idee, Blitze per Laser abzuwehren?

Es ist eine typische Wissenschaftsgeschichte. Eines Tages Mitte der 1990er-Jahre ging im Labor des französischen Laserforschers Gérard Mourou ein optischer Spiegel kaputt. Das hätte eigentlich nicht passieren dürfen und er untersuchte das Phänomen. Dabei entdeckte er die Selbstfokussierung des Lasers in gewöhnlicher Luft und die Bildung sogenannter Filamente. In einem geeigneten Medium, zum Beispiel eben Luft, kann es unter Umständen passieren, dass sich der Laserstrahl ständig selbst fokussiert, wieder zusammenbricht, dann wieder selbst fokussiert und so fort. Jeder, der mit Lasern arbeitet, kennt das Phänomen. Es ist eine der Haupttodesursachen für Laserstäbe. Neu waren die Filamente, denn sie ionisieren die Luft, machen sie also leitfähig. Mourou bekam dann 2018 den Nobelpreis. Allerdings für etwas anderes: die Erzeugung hochintensiver Laserpulse.

Okay, und wo kommen Sie ins Spiel?

Mit Mourous Entdeckung der Filamente in der Luft war klar: Man kann per Laserstrahl gezielt Hochspannung durch die Luft leiten. Wir dachten, damit werde man doch wohl was anfangen können. Und so überlegten wir und kamen auf mehrere Ideen. Mein Kollege aus Paris André Mysyrowicz probiert jetzt kleine Laser an den Dächern von TGV-Hochgeschwindigkeitszügen aus. Sie stellen den Kontakt her zwischen Elektrode und Draht, seither klappt die Hochspannungsübertragung während schneller Fahrten besser und sicherer. Ich hingegen benutze Filamente für die Atmosphärenforschung. Hochspannung in der Luft – ich meine, da lagen die Blitze doch nahe, finden Sie nicht?

Schon. Aber woher wussten Sie, dass das ein Erfolg werden kann?

Natürlich gar nicht. Jedoch gleich nach der ersten Veröffentlichung dieser Blitz-Idee meldeten sich bei mir mehrere Wissenschaftler in Diensten großer Firmen, die sagten: „Das wäre was, um unsere Flughäfen oder unsere Raketenrampen zu schützen! Bitte machen Sie weiter!“ Und so wurde ich aufgeklärt, dass Verzögerungen durch Blitzgefahr im Flugbetrieb oder bei Raketenstarts sehr teuer sind. Entsprechend groß ist die Bereitschaft, in neuartige, bessere Blitzschutz-Methoden zu investieren. Also machte ich weiter.

Blitze haben ja etwas Mythisches ...

Ach, das finde ich eigentlich nicht. Es gab schon mal eine Schlagzeile über mich, die lautete: „Der Zeus aus Genf“, aber das Bild stimmt ja nun wirklich nicht. Blitze sind ein Naturphänomen. Und es gibt im Übrigen noch einiges, was wir wissenschaftlich nicht erklären können. Aber mythisch? Nein. Schön sind sie. Das schon.

Was haben Sie noch für Ideen mit Ihrer Blitzkanone?

Flughäfen und Windparks wären sicherlich die ersten Anwender. Ich könnte mir auch vorstellen, Großveranstaltungen wie etwa Olympische Spiele vor Blitzschlag zu schützen. Und, nun ja, mit diesem mächtigen Ultrakurzpulslaser, den wir da jetzt haben, könnte man auch andere Dinge ausprobieren. Die Filamente, die wir in die Luft bringen, konzentrieren auch den Wasserdampf. Sprich, wir könnten Wolken erzeugen und

vielleicht zum Abregnen bringen.

Wäre das dann Geoengineering?

Regen auslösen ist doch eine alte Sache: Seit den 1950ern sprühen Flugzeuge Chemikalien in die Atmosphäre, um gezielt Regen oder Schnee auszulösen. Ski-Resorts bezahlen dafür, die Chinesen machen es praktisch jeden Tag und in den USA können Sie sich als Farmer bei Privatfirmen Regen auf ihre Felder bestellen, bezahlt wird nach Litern pro Quadratmeter. Dabei ist diese alte Technik eine ziemliche Sauerei: Unmengen von Schwermetallen und Kohlenwasserstoffen rieseln auf die Erde hinab. Das wäre mit dem Laser nicht so. Es wäre ein Segen.

Aber noch mal: Geoengineering?

Natürlich. Die meisten Leute denken, Geoengineering sei etwas Anrüchiges, irgendwie eine Sünde wider die Natur. Aber so einfach ist es nicht. Nehmen wir ein Beispiel: Sie haben eine neue Methode erfunden, um Regen zu erzeugen, der Waldbrände schnell und effizient löschen kann. Was ist dann besser für den Planeten? Die Geoengineering-Methode anzuwenden oder die Feuer die Wälder vernichten zu lassen? An der Uni Genf haben wir jetzt ein neues Projekt auf die Beine gestellt, um diese Fragen beantworten zu können, zusammen mit Ethikern, Juristen für internationales Recht, Organisationen wie dem Weltklimarat IPCC, Geowissenschaftlern und anderen. Es gab aber ohnehin bereits ein riesiges

„Es war dann klar: Man kann per Laserstrahlen Hochspannung leiten. Wir dachten, damit werde man doch wohl was anfangen können.“

Geoengineering-Experiment. Kennen Sie es schon?

Verraten Sie es uns!

Es läuft seit ungefähr 1850 und beeinflusst die Atmosphäre, das Wetter und noch viel mehr auf der ganzen Welt: das Verbrennen fossiler Stoffe und damit das massenhafte Freisetzen von Kohlendioxid. Okay, zugegeben, dies war kein Engineering. Es war einfach nur die Suche nach mehr Profit und Komfort ohne Rücksicht auf die Natur. Wir haben die Natur völlig durcheinandergebracht und heute sehen wir die Konsequenzen. Seit 20 Jahren sagen die Wissenschaftler, dass die ersten Effekte der Klimaänderungen extreme Wetterepisoden sein werden, wie etwa häufigere und stärkere Überschwemmungen, Dürre und Waldbrände. Alle, die Ahnung davon haben, sagen, dass wir in Kürze Kipppunkte erreichen werden, wo es einfach immer weitergehen wird, völlig egal, was die Menschen unternehmen. Ozeane, Eis, Wetter, Temperaturen, Wind – alles wird sich anders verhalten, als wir es gewohnt sind. Ich fände es fahrlässig, in dieser Situation Geoengineering-Technologien nicht zu erforschen. Wir werden diese Werkzeuge leider mit Sicherheit brauchen, also sollten wir sie auch entwickeln. ■

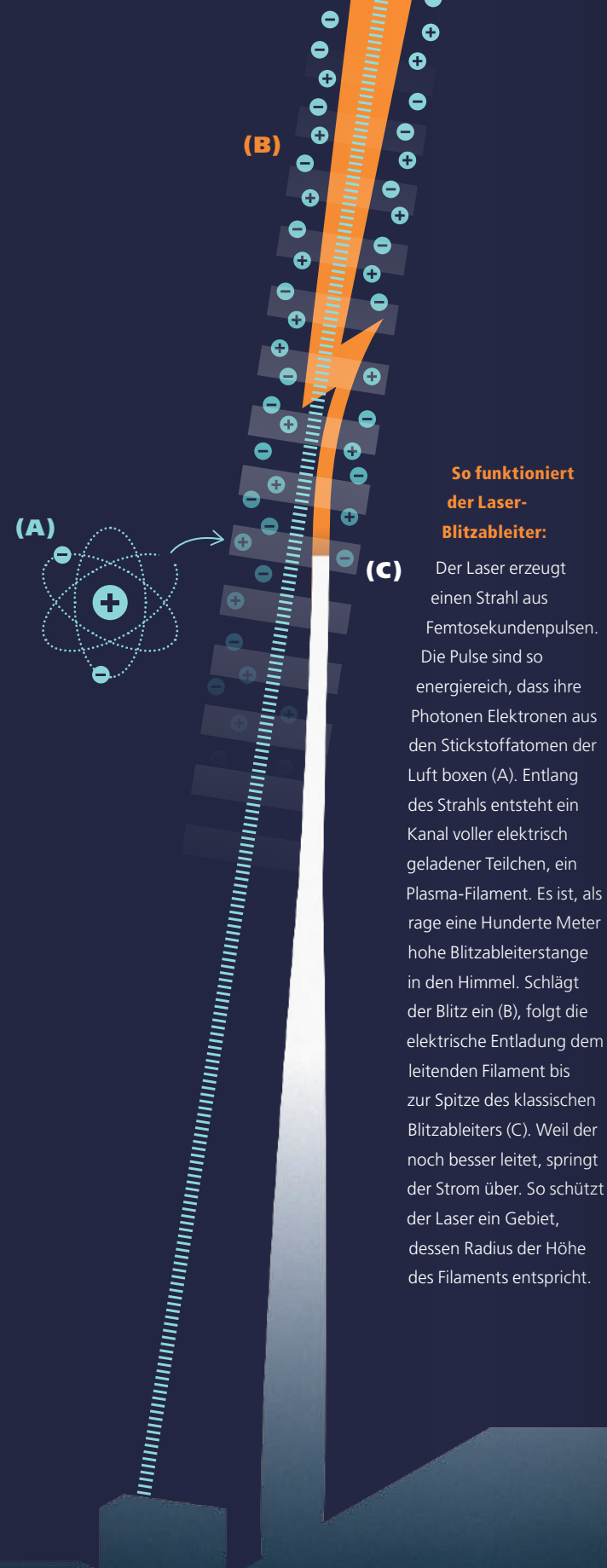
Jean-Pierre Wolf ist Professor für Physik und Biophotonics an der Universität Genf. Seit vielen Jahren beschäftigt er sich damit, per Lasertechnik Wetterphänomene zu erforschen und zu beeinflussen. Hier steht er vor der Forschungsstation auf dem Säntisgipfel, in der die Strahlquelle für den Laser-Blitzableiter steht. In den Containern hinter ihm wird der Strahl geweitet und durch die geöffnete Dachklappe gen Himmel entlassen.

Martin Stollberg

„Wir werden Geoengineering-Technologien brauchen, also sollten wir sie auch entwickeln.“

02

EIN LASER, WIE
IHN DIE WELT
NOCH NICHT
GESEHEN HAT: DAS
GEHEIMNIS DER
STRAHLQUELLE
FÜR DEN LASER-
BLITZABLEITER
LIEGT IN IHREM
VERSTÄRKER.
CLEMENS
HERKOMMER HAT
IHN GEBAUT.



Gernot Wälter

POTZBLITZ! AUTOR: CLEMENS HERKOMMER

Plasma ist eine besondere Suppe. Es entsteht, wenn etwas mit viel Energie Elektronen aus Atomen herausreißt und zeitweilig verhindert, dass sie wieder zurückschnappen. Weil die Ladungen im Plasma getrennt sind, leitet es elektrischen Strom. Zum Beispiel einen Blitz durch die Luft zu einem Blitzableiter.

Plasma in gewöhnlicher Luft zu erzeugen, ist leicht. Man nehme einen Laserstrahl, stelle eine Fokussierlinse in den Strahl und warte. Ist die Intensität hoch genug, gibt es im Fokus einen kleinen Plasmaball. Ende. Für den Plan mit den Blitzen ist es aber nötig, diesen Plasmaball auf einhundert und irgendwann tausend Meter zu strecken. Dazu braucht es einen ganz besonderen Laser.

GEWOLLTE KATASTROPHE Wenn sich hochintensive Laserstrahlen in der Luft ausbreiten, beginnt die Luft selbst, wie eine Linse zu wirken. Sie fokussiert den ohnehin schon intensiven Laserstrahl und schnürt ihn enger zusammen. Dadurch nimmt die Intensität des Strahls zu. Die Luft reagiert und bündelt den Strahl umso strammer. Das ist der nach seinem Entdecker benannte Kerr-Effekt. Wie alle sich selbst verstärkenden Effekte schaukelt auch dieser sich auf bis zum Kollaps, der sogenannten Katastrophe: Die Photonen des Laserlichts beginnen vor lauter Energie Elektronen aus den Stickstoffatomen in der Luft zu boxen. Die Luft ionisiert und es bildet sich leitfähiges Plasma.

Für den Laserstrahl ist das der Befreiungsschlag. Im Plasma defokussiert er, wird wieder aufgeweitet, läuft wieder durch neutralere Luft und alles fängt von vorne an. Wenn wir dieses Gleichgewicht zwischen Kerr-Effekt und Kollaps lange aufrechterhalten, bekommen wir ein sogenanntes Filament: einen lang gezogenen Pfad aus leitfähigem Plasma statt einer Kugel.

LANG UND DICHT Nun kann man an vielen „Schrauben“ drehen, um das Filament zu formen. Für das Projekt Blitzableiter zum Beispiel sollte das Filament erst weit über dem Boden beginnen. Also bauten die Projektkollegen der Universität Genf ein spezielles Teleskop. Es weitete den Strahl ganz zum

P

Schluss von 30 Millimeter auf 30 Zentimeter auf. Damit setzt das Filament erst in 120 Meter Höhe ein und erreicht so um die 200 Meter Höhe.

Und damit sind wir wieder beim Laser. Unsere Aufgabe ist es, einen Strahl zu liefern, der ein etwa 100 Meter langes Filament erzeugt, um den leitfähigen Kanal permanent aufrechtzuerhalten. Dafür brauchen wir zum einen eine Pulsrate von etwa tausend Laserblitzen pro Sekunde. Mit dieser Wiederholrate boxen wir immer genug neue Elektronen frei, um die zurückfallenden zu ersetzen. So bleibt das Filament stabil. Gleichzeitig wollen wir sehr viele Elektronen gleichzeitig freiboxen, um ein sehr dichtes Filament zu haben. Und dafür brauchen wir eine sehr hohe Laserleistung und sehr hohe Pulsenergie.

STAUCHEN UND PUMPEN Die zeitlich gestreckten Pulse laufen zuerst durch einen regenerativen Verstärker. Er verstärkt die Pulse um etwa den Faktor 1.000. Dieses System setzen wir auch in anderen Speziallasern ein. Doch für die benötigten Pulsenergien beim Blitzableiter sind die Öffnungen einiger Spezialoptiken zu klein. Deshalb schicken wir die Pulse durch eine zweite Stufe, einen besonderen Scheibenlaser-Multipass-Verstärker.

Multipass-Verstärker heißen so, weil der gestreckte Puls ihn mehrfach durchläuft. Bei jedem Durchlauf geben ihm leistungsfähige Pumplaser zusätzliche Energie mit. Der Multipass, der eine Repetitionsrate von 1.000 Schuss pro Sekunde in unserem Energiebereich übersteht, musste allerdings noch erfunden werden. Also übernahmen wir das. Raffinierte Kühlung war ein Teil der Lösung. Der andere war eine neue Strahlführung, die verhindert, dass die hohe Pulsenergie die strahlführenden Optiken einfach durchschießt.

Im fertigen Scheibenlaser-Multipass geben nun vier diodengepumpte Laserscheiben ihre Energie in zwei Stufen an den durchlaufenden Puls weiter. Zum Schluss durchlaufen die hochenergetischen Laserpulse einen Gitterkompressor, der die zeitlich noch gestreckten Pulse wieder verkürzt.

So bekommen wir, was wir brauchen: Pikosekunden-Laserpulse mit einer Energie von 720 Millijoule und einer Pulsspitzenleistung von knapp 700 Gigawatt. Das ist so viel, als würde man eine Pikosekunde lang die Leistung von rund 500 Atomkraftwerken zusammenschalten.

Im Sommer stand unser Laser auf dem Gipfel des Säntis in der Ostschweiz. Wenn wir ihn infrarot laufen ließen, glomm der Stickstoff der Luft bläulich. Das waren die freigeboxten Elektronen, die in die Stickstoffatome zurückfielen und vor Freude ein Photon emittierten. Wenn wir ihn grün laufen ließen, strahlten Laser und Filament hell in den Nachthimmel. Man konnte sie vom Tal aus sehen. ■



Clemens Herkommer promovierte als Industriedoktorand bei TRUMPF. In seiner Dissertation für die Technische Universität München entwickelte er den Scheibenlaser-Multipass-Verstärker für das EU-Projekt Laser Lightning Rod.

Laser Lightning Rod ist ein internationales Projekt zur Entwicklung eines Laser-Blitzableiters mit Beteiligung von Forschungsinstituten und Unternehmen aus Frankreich, Deutschland und der Schweiz. Die Europäische Union fördert das LLR.

privat

EIN BLITZABLEITER FÜR DOC BROWN

WIE LASERTECHNIK IM ORBIT UND AUF ERDEN DIE WELT SICHERER MACHT. UND: WARUM DIE SCIENCE-FICTION BALD UM EINEN AUTOR REICHER SEIN WIRD.

Laser im Weltall – das ist der Stoff, aus dem Science-Fiction entsteht! Nur leider hat die Science-Fiction nie verstanden, dass der Laser zu den Guten gehört. Denn an was denken Sie, wenn Sie „Laser im Weltall“ lesen? Superwaffen, Vernichtung, Krieg. Berühmtestes Beispiel: das Laserschwert aus *Star Wars*. Bitter, denn Lasertechnik ist gerade dabei, den Orbit zu revolutionieren, und zwar – davon hat mich dieses Heft einmal mehr überzeugt – durch und durch positiv!

Ähnlich wie „Laser im Weltall“ ist auch „Geoengineering“ bei vielen negativ konnotiert. Das Eingreifen in den geochemischen Kreislauf der Erde gilt als gefährlich. Dabei ist es laut Prof. Jean-Pierre Wolf, Wetterforschungskoryphäe an der Uni Genf, sogar zwingend geboten, sich intensiv mit Geoengineering zu beschäftigen, um mit Erkenntnissen daraus etwa den Klimawandel zu bekämpfen. Die entsprechende Waffe (sorry, jetzt brauche ich selbst Kriegsmetaphern) hat er schon parat: die Blitzkanone, einen einmaligen Superlaser. Ihr Ziel ist ein durch und durch friedliches: die Welt ein Stück sicherer machen, indem sie Blitze kontrolliert!

Hätte das mal einer Doc Brown erzählt! In der Science-Fiction-Trilogie „Zurück in die Zukunft“, die Ende der 1980er-Jahre Kultstatus erlangte, hat der geniale

Wissenschaftler einen DeLorean DMC zu einer Zeitmaschine umgebaut. Die notwendigen 1,21 Gigawatt Leistung, um durch die Zeit zu reisen, zieht sich das Auto aus Plutonium. Allerdings kann auch ein Blitzeinschlag in den DeLorean diese Leistung erzeugen und zu einer Zeitverschiebung führen. Im ersten Teil der Trilogie ist das sogar gewollt: Doc Browns Freund Marty McFly strandet versehentlich in der Vergangenheit, wo er für seine Reise zurück in die Zukunft kein Plutonium auftreiben kann. Ein Glück, dass er mit seinem Wissen aus der Zukunft genau weiß, wann und wo der nächste Blitz einschlagen wird: in die ikonische Rathausuhr, die seitdem stillsteht. Im zweiten Teil der Trilogie jedoch trifft ein Blitz versehentlich die durch ein Gewitter fliegende – ja, fliegende – Zeitmaschine und versetzt sie ungewollt in den Wilden Westen! Einige Strapazen wären Doc Brown und Marty McFly erspart geblieben, hätten sie von der Blitzkanone gewusst.

Ein Laser, mit dem man Blitze kontrollieren kann: Ist es nicht erstaunlich, was Lasertechnik alles möglich macht? Einmal mehr bin ich überwältigt und überlege ernsthaft, Science-Fiction-Autor zu werden. Irgendjemand muss diesem Genre doch endlich mal klar machen, dass Laser auf der hellen Seite der Macht stehen. ■



An dieser Stelle schreibt Athanassios Kaliudis, Chefredakteur der Laser Community, regelmäßig über den Laser als Gegenstand der Popkultur.

WO STECKT DER LASER?



Im medizinischen

Massentest: Um Pandemien

verhindern oder sie wenigstens beherrschen zu

können, braucht die Menschheit Tests mit folgenden

Eigenschaften: schnell, präzise, einfach und billig. Prof. Bahram

Javidi von der Universität Connecticut denkt bei dieser Kombi an

Lasertechnologie. Seine Diagnosesysteme bestehen aus einer simplen

Laserdiode, einer Mikroskop-Kamera, einem Stück Glas und

einer selbstlernenden Software, die auch auf einem alten Laptop

oder Smartphone läuft. Alles Technologien, die auch in

Entwicklungsländern leicht eingesetzt werden können.

Das Gerät erstellt aus winzigen Blutproben

dreidimensionale Hologramme der roten

Blutkörperchen und weiß binnen Sekunden:

gesund oder krank. Für Malaria, die Sichel-

zellenkrankheit und Brustkrebs ist

die Billo-Hightech bereits im Einsatz.


2021 hat Javidi das System weiter-

entwickelt, um auch eine

SARS-CoV-2-Infektion

nachweisen zu

können. ■



Der Segen der
Automatisierung erreicht
die Dentalindustrie: Bei
Zahnersatz aus dem
3D-Drucker wechselt
eine Vorrichtung die
Substratplatten im
Pulverbehälter automatisch.
Nie mehr Nachtschicht,
einfach Knöpfchen drücken
und schlafen gehen.
Am nächsten Morgen
ist ein ganzes
Haigebiss fertig.

400

ZÄHNE PRO SCHICHT

TRUMPF



LASERCOMMUNITY.34 erscheint im Frühjahr 2022.

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