

LASER COMMUNITY.

Über Menschen und Photonen

Wasserstoff kommt!

Wie Lasertechnik den neuen Boom treibt.





LASER COMMUNITY. #32

AUSGABE Mai 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, Wilrid Dubitzky, Sebastian Hecker, Athanassios Kaliudis, Paul Mehnert, Martin Reinhardt, Julia Stolte, Monika Unkelbach

FOTOGRAFIE UND ILLUSTRATION Tobias Gerber, Stefan Hobmaier, Timo Müller, Andreas Reeg, 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: Timo Müller; Titelgrafik: Adobe Stock / Konstantin Yuganov

EDITORIAL



Herausforderung angenommen!

Als ich Mitte der 1980er-Jahre als junger Laserforscher am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit einem quergeströmten CO₂-Laser experimentierte, sah ich auf dem Campus regelmäßig das erste Wasserstoffauto Europas seine Runden drehen. Es war ein roter BMW, den Prof. Dr. Carl-Jochen Winter gemeinsam mit seinem Team erfolgreich umgebaut hatte. Dass das Auto des Wasserstoffforschers der ersten Stunde noch ein paar Jahrzehnte brauchen würde, um sich durchzusetzen, war damals den allermeisten schon klar. Auch heute sind wir davon noch ein ganzes Stück entfernt, aber die Zeichen der Zeit sind eindeutig: Forschung, Industrie und Politik sehen Wasserstoff als tragende Säule der künftigen Energieversorgung.

Für TRUMPF und die Lasertechnik sind das sehr gute Nachrichten. Denn das Herzstück der Wasserstoffwirtschaft ist die Brennstoffzelle. Sie gewinnt Energie aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff. Die technischen Anforderungen an die Brennstoffzelle sind so hoch, dass der Laser alternativlos ist. Wir müssen Hunderte hauchdünner Edelstahlplatten so verschweißen, dass sie jeglichen Erschütterungen standhalten, den Strom zuverlässig leiten und absolut gasdicht sind. Diese Edelstahlplatten sind nur wenige Mikrometer stark, müssen aber einhundertprozentige Sicherheit garantieren. Schon die geringste Pore in der Zelle kann beispielsweise in einem Wasserstoffauto fatale Folgen haben. Scannergeführte Schweißlaser in Kombination mit sensibler Sensorik können diese Anforderungen an Präzision, Geschwindigkeit und Sicherheit für gasdichte Schweißungen wirtschaftlich realisieren.

Mit „meinem“ CO₂-Laser aus der DLR-Zeit hat das freilich nicht allzu viel zu tun. Aber Innovationen im Laserbereich bauen nicht selten auf bereits erfolgreich verprobtem Wissen auf. So auch beim gasdichten Schweißen: Das erste Mal bekamen wir es mit dieser Anforderung zu tun, als es ums Schweißen von Herzschrittmachern ging. Unsere Erfahrungen hierbei konnten wir nutzen, als die ersten Automobilkunden mit uns Komponenten für Lithium-Ionen-Batterien gasdicht schweißen wollten, um für die Elektromobilität schnell industrietaugliche Lösungen zu entwickeln. Und mit der Brennstoffzelle geht das Ganze noch einen Schritt weiter. Die Anforderungen, die Wasserstoffpioniere an die Lasertechnik stellen, fordern Entwickler und Ingenieure heraus. Und spornen sie so zu neuen Höchstleistungen an, um noch schneller und noch präziser zu schweißen.

Ob ich an Wasserstoff als Antriebstechnologie glaube? Na klar! Nicht gleich nächstes Jahr und auch nicht als Allheilmittel. Aber in einem gesunden Mix aus verschiedenen Technologien für unterschiedliche Fahrzeugtypen allemal.

DR. - ING. CHRISTIAN SCHMITZ

Chief Executive Officer Laser Technology

Mitglied der Gruppengeschäftsführung der TRUMPF GmbH + Co. KG

christian.schmitz@trumpf.com

Gernot Walter



Doppelte Freude

Für unsere Kinder das Klima retten mit energieeffizienten und smarten Spritzgusswerkzeugen: Was liegt da näher als spritzgegossene Spielzeugfiguren? Zwei Knirpse der Redakteure freuten sich nach dem Foto über den unerwarteten Zuwachs im Kinderzimmer. Wie der ausschaut, sehen Sie auf **Seite 6**.



Fünfmal Prof

Moment mal, ein Quant ist zeitgleich an verschiedenen Orten!? Dann sollte das ein Quantenforscher auch können! So der Gedanke, dessen Umsetzung wir flugs mit diesem Foto testeten. Tobias Gerber setzte die Vorlage später brillant um und Top-Physiker Jörg Wrachtrup machte den Spaß mit – ab **Seite 26**.



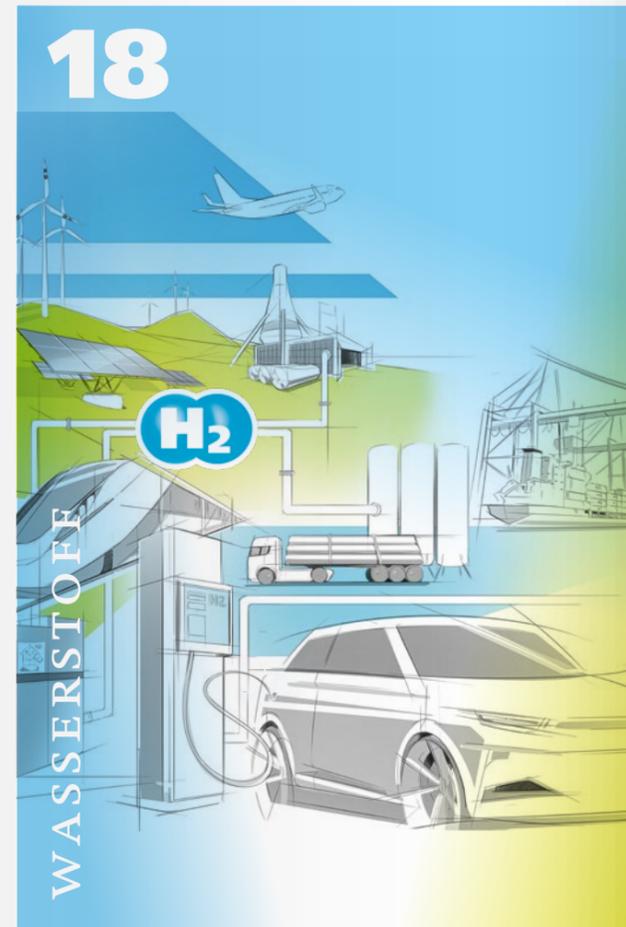
Einfach schön

Einmal betörend schön wie ein Supermodel aussehen! Für einen 6,99-Euro-Whisky aus dem Discounter geht der Traum in Erfüllung. Art Director Gernot Walter zauberte ein bisschen mit Licht, Linse und Maus. So wurde aus diesem hässlichen Entlein hier der Schwan auf **Seite 31**.

Martin Reinhardt, Gernot Walter

LASER COMMUNITY.

18



10 MIKROBEARBEITUNG

Stefan Hobmaier, Timo Müller

THEMA

18 VOLL AUF WASSERSTOFF!

Wasserstoff wird der neue Energieträger des 21. Jahrhunderts. Warum das eine gute Nachricht für die Lasertechnik ist.

6 POWER

Additive Kupferkanäle für Presshärte- und Spritzgusswerkzeuge retten das Klima.

7 GLORY

LED-Revolutionär Nakamura erhält den Queen Elizabeth Prize für seine Beharrlichkeit.

8 AHEAD

Heraeus Amloy druckt Knochen aus amorphem Metall.

10 Alles fein

GFH erfindet das Laserdrehen – und baut dann gleich eine Vierfach-Kombimaschine zur Mikrobearbeitung.

15 Heile, heile, Segen

Vor 60 Jahren heilte erstmals ein Laser ein Auge. Seither ist viel passiert.

16 Glas, Glas, Glas

Laser-Glasschweißen ist jetzt reif für die Massenproduktion.

23 i 4.0

Ein guter Sensor schaut zweimal.

24 Tornado, hurra!

Bergmann & Steffen beschleunigt das Remote-Schweißen mit einem Wirbel.

26 „Ich habe mich an das Unmögliche gewöhnt“

Prof. Jörg Wrachtrup fordert mehr Quantentechnologie im Anlagenbau und will Gehirne mit Maschinen verbinden.

30 POP

Hindenburg'sche Dissonanz

31 WO STECKT DER LASER?

Im Edelwhisky.



8 3D-DRUCK



24 REMOTE-SCHWEISSEN



26 QUANTENSENSORIK



Massenwaren wie spritzgegossene Spielzeugfiguren lassen sich dank neuem Werkzeugdesign viel energieeffizienter herstellen.

DER TRAUM VOM GRÜNEN WERKZEUG

Der Laser stattet Werkzeuge aus Kupfer und Stahl mit Kühlkanälen aus und verbessert so ihre Klimabilanz.

Presshärten und Spritzgießen sind heiß geliebte Fertigungsverfahren, etwa im Karosserie- oder Maschinenbau – allerdings mit mieser Umweltbilanz. Denn sie erzeugen enorm viel Wärme und verbrauchen somit Massen an Energie und Kühlmittel. Abhilfe schaffen Kühlkanäle, die sich im Inneren der Presshärt- und Spritzgusswerkzeuge befinden, die die Hitze ins Metall ableiten und sie so abführen. Je effizienter sie das tun, desto mehr Energie sparen sie. Bei Millionen von Teilen, die Zulieferer jedes Jahr weltweit fertigen, rechnen sich selbst kleinste Einsparungen. Das sieht auch die deutsche Bundesregierung so und fördert in ihrem Klimaschutzplan ressourcenschonende Ideen. Daran arbeitet TRUMPF mit Partnern im Rahmen des Projekts „Identifizierung energie- und ressourceneffizienter Prozessketten für die Herstellung thermomechanisch beanspruchter Werkzeuge durch eine gesamtheitliche Bewertungsmethode“ (reProTools), welches das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) fördert. Ihr Ansatz: Statt Kühlkanäle wie bisher zu bohren, baut der Laser sie individuell auf.

Das additive Verfahren Laserauftragschweißen (auch Laser Metal Deposition, LMD, genannt) macht es möglich, denn es verschafft Gestaltungsfreiheit. Im Gegensatz zum Bohren ist die Länge der Kanäle nicht

limitiert, Biegungen und Radien sind teilweise möglich. Beim LMD trägt der Laser den Werkstoff Schicht für Schicht auf das Stahlgrundwerkzeug auf und formt so das Werkzeug mit ideal verteilten Kühlkanälen. Er erzeugt ein Schmelzbad an der Oberfläche des Werkstücks. Eine Düse führt Pulverwerkstoff zu und der Laser schmilzt ihn auf. Beim Abkühlen verbinden sich Zusatzwerkstoff und Werkstück metallurgisch miteinander. Die Grundidee ist nicht neu. Schon in den frühen 2000er-Jahren gab es ein Konzept, fertige Kühlkanäle per LMD in Presshärtwerkzeuge einzubetten. reProTool geht da noch weiter.

Denn: Wenn man schon additiv arbeitet, warum die Kanäle nicht aus einem zweiten Werkstoff aufbauen, der die Wärme besonders gut leitet? Kupfer ist der ideale Kandidat. Bis vor Kurzem war diese Kombination nicht möglich. Infrarote Laser tun sich mit Kupfer schwer, denn es weist bei der Wellenlänge von 1030 Nanometern hoch reflektierende Eigenschaften auf. Spritzer und eine schlechte Reproduzierbarkeit sind die Folgen. Heute gibt es industrielle Strahlquellen mit grüner Wellenlänge von 515 Nanometern. Damit koppeln sie in Kupfer hervorragend ein. Im reProTools-Projekt fertigt ein grüner Scheibenlaser Werkzeuge mit optimierter Kühlung.

Die Werkzeuge lassen sich so schneller temperieren, die Kühlung arbeitet weniger und die Fertigung ist effizienter. Das spart Ressourcen, macht produktiv – und freut das Klima und den Geldbeutel. ■



Per Laserauftragschweißen erzeugte, innen liegende Kanäle kühlen das Werkzeug genau dort, wo es sinnvoll ist.

HERR DES LICHTS

Der LED-Pionier Shuji Nakamura erhält den Queen Elizabeth Prize 2021.

2015 ist ein großes Jahr für die Laser Community: Der frisch gekürte Physik-Nobelpreisträger Shuji Nakamura schreibt den Essay „Mehr Licht!“ für dieses Magazin, in dem er seine Liebe zum Licht erklärt, dessen Bedeutung für die menschliche Zivilisation rühmt und sich eine erleuchtete Welt ausmalt. Niemand anderes hätte mehr Recht dazu gehabt.

Die späten 1980er-Jahre verbringt der japanische Ingenieur mit einer schier endlosen Folge von Versuch und Irrtum in seinem Firmenlabor. Sein Ziel ist es, hochwertige Galliumnitridkristalle (GaN) zu züchten, mit denen er endlich blaues Licht aus Leuchtdioden (LED) würde erzeugen können. Rotes, gelbes und grünes LED-Licht existiert bereits, aber das Spektrum des blauen Lichts weigert sich stur, zu leuchten. Doch erst mit der Beimischung von Blau wäre strahlend helles und dabei überaus energieeffizientes weißes LED-Licht möglich. Die Welt würde heller. „Eineinhalb Jahre lang modifizierte ich jeden Morgen und jeden Nachmittag ununterbrochen Reaktoren“, sagt Nakamura, inzwischen Professor für Materialien und für Elektro- und Computertechnik an der kalifornischen Universität Santa Barbara. Nakamuras Beharrlichkeit zahlt sich aus: Er entwickelt die erste blaue GaN-LED, später auch die grüne Indium-Galliumnitrid-Leuchtdiode, eine weiße LED und schließlich einen blauen Laser. Seine Erfindungen

treten die anhaltende Erfolgswelle energiesparender LED-Beleuchtung und neuer Displaytechnologien los. Jetzt erhielt Shuji Nakamura den renommierten Queen Elizabeth Prize for Engineering, zusammen mit Isamu Akasaki, Nick Holonyak, M. George Craford und Russel D. Dupuis, vier weiteren Pionieren der LED-Forschung. Laut der Jury werden die diesjährigen Preisträger „nicht nur für den globalen Einfluss von LED- und Festkörperbeleuchtung gewürdigt, sondern auch für den enormen Beitrag, den die Technologie zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur Bekämpfung des Klimawandels geleistet hat und weiterhin leisten wird“.

2015 schrieb Nakamura in diesem Heft: „Ich freue mich, dass Glühbirnen und Leuchtstoffröhren nun langsam, aber sicher in die Technikmuseen wandern und die Festkörperleuchten die Erhellung der Welt übernehmen. Denn preiswertes Licht ist für mich ein Treiber, ja sogar ein Maßstab für Zivilisation. Können Sie sich die menschliche Zivilisation ohne Licht vorstellen?“ Nein, können wir nicht. ■

Shuji Nakamuras Beharrlichkeit zahlte sich aus: Heute erhellen seine energieeffizienten LEDs unsere Räume und Displays.



„Wir drucken deinen Knochen“

Der Traum: Implantate, die sich exakt zwischen oder in die gewachsenen Knochen einfügen und sich haargenau so belasten lassen wie echte Knochen, die sie ersetzen. Heraeus Amloy will diesen Traum verwirklichen.

Frau Melde, was hindert uns im Moment eigentlich daran, passgenaue Implantate mithilfe des 3D-Druck-Verfahrens herzustellen?

Unter anderem die erforderlichen mechanischen Eigenschaften. Knochen sind zugleich sehr leicht, sehr hart und sehr flexibel. Die heutigen Materialien bieten nur einen Kompromiss aus diesen Eigenschaften. So sind metallische Werkstoffe zu steif und Polymere zu weich. Mithilfe des 3D-Drucks könnten jedoch individuelle Implantate hergestellt werden.

Und das wäre wünschenswert?

Ja. Im Moment ist es so, dass die Chirurgen oder der Chirurg oft improvisieren, um Serienimplantate an die Patienten anzupassen. Sie biegen sie von Hand in die endgültige Form und fixieren sie mit Schrauben. Deswegen wollen wir Abhilfe schaffen!

Wie das?

Indem wir passgenaue Implantate aus einem besonderen Werkstoff drucken: amorphem Metall.

Klingt ziemlich fancy!

Was ist amorphes Metall?

In einer gewöhnlichen Metallschmelze schwirren die Atome wild durcheinander. Wenn die Temperatur sinkt, werden sie langsamer und ordnen sich zu einer energetisch günstigen Form, den Kristallgittern, an. Kühlt die Schmelze jedoch mit 200 Kelvin pro Sekunde ab, können sich die Atome nicht umlagern und frieren im schmelzflüssigen Zustand ein. Das formlose Atom-Durcheinander der Schmelze bleibt im erstarrten Metall erhalten. Bei Amloy entwickeln wir Legierungen, die diesen Prozess ermöglichen. Das Gleiche passiert übrigens in Glas. Deshalb sprechen wir bei amorphen Metallen auch von metallischen Gläsern.

Was bringt das jetzt für die Implantate?

Weil amorphe Metalle keine Kristallgitter haben, verhalten sie sich ganz anders als „normale“ Metalle. Sie sind zum Beispiel gleichzeitig extrem fest, hochelastisch und sehr verschleißfest. Wie Knochen halten die Implantate dadurch enorme Strapazen aus. Nicht nur bei Schlägen und Stößen. Denken

Sie nur an Kieferknochen beim Beißen und Kauen oder an einen Rippenbogen, der pro Jahr rund acht Millionen Atembewegungen mitmacht.

Und der 3D-Druck kann amorph?

Und wie! Wir haben gemeinsam mit TRUMPF das Verfahren dahin gehend weiterentwickelt, dass wir mit sehr feinem Fokus und extrem kleinem Schmelzvolumen arbeiten können. Die Wärme wird also schnell abgeführt.

So schaffen wir die kritische Abkühlzeit von 200 Kelvin pro Sekunde: Aus dem Pulverbett wächst ein individuell angepasstes und amorph erstarrtes Implantat.

Also zwei in eins.

Sogar mehr! Der 3D-Druck von amorphem Metall hat noch einen entscheidenden Vorteil: Wir sind viel flexibler bei den Legierungen. Aktuell haben wir bereits zirkoniumbasierte Legierungen. Parallel arbeiten wir an einer amorphen titanbasierten Legierung. Wir optimieren diese, wie unsere anderen Legierungen, für den

AHEAD

Radiusplatten aus amorphem Metall druckt Heraeus Amloy auf der TRUMPF TruPrint 2000. Individuelle Implantate aus dem 3D-Drucker werden die Medizintechnik revolutionieren. Da ist sich **Valeska Melde**, Head of Marketing and Sales bei Heraeus Amloy, sicher.



3D-Druck. In der Medizintechnik sind sie ganz besonders gefragt. Denn amorphe Legierungen von Amloy haben ein Elastizitätsmodul nahe dem menschlichen Knochen, was für den Heilungsprozess und die Belastbarkeit der vormals geschwächten Stelle von enormem Vorteil ist. Unsere Legierungen sind korrosionsbeständig und biokompatibel.

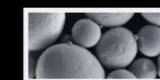
Wann kann ich mir denn die ersten gedruckten Implantate einsetzen lassen?

Wir testen das momentan gemeinsam mit Partnern wie TRUMPF im Rahmen des Projekts „Clinical Additive Manufacturing for Medical Applications“ der Medizinischen Universität Graz. Die Ergebnisse sind vielversprechend und wir sind schon heute in der Lage, Implantate zu fertigen, die unsere Kunden dann testen und qualifizieren. Dass wir Ihre Knochen drucken, ist also bereits Realität. ■

Das Unternehmen: Heraeus Amloy entwickelt und vertreibt amorphe Legierungen und stellt im Auftrag Komponenten daraus her. Zirkoniumbasierte Varianten sind bereits verfügbar, weitere auf der Basis von Titan sollen folgen.

Die Produkte: Amorphe Bauteile sind auch jenseits von Maschinenbau und Medizintechnik auf dem Vormarsch: Erstmals wurden Brücke und Regler

einer E-Gitarre in amorphem, 3D-gedrucktem Metall ausgeführt und die NASA will ihre Weltraumroboter mit Bohrköpfen aus den Spezialmetallen ausstatten.



Das Material: Amorphe Metalle entstehen durch Schockfrosten von Schmelze. Die Atome erstarren ungeordnet und bilden kein kristallines Gitter.



ALLES

Links gewaltig
vergrößert auf
dem Schirm,



hier in der
Maschine. Bei
solch winzigen
Präzisionsteilen
kommt man mit
mechanischem
Drehen nicht
weit.

F E I N

GFH erfindet das Laserdrehen.

V

„Verdammt, der Mann hat recht“, denkt sich GFH-Geschäftsführer Florian Lendner. Einer seiner Kunden aus der Medizintechnik hat ihm eben gesagt, dass der Laser für ihn erst dann das perfekte Werkzeug wäre, wenn er damit auch drehen könnte. Lendner fängt sofort an, darüber nachzudenken: Drehen ist bisher das einzige spanabhebende Verfahren, für das es noch keine praktische Laser-Alternative gibt. Und das will Lendner jetzt ändern.

Beim Drehen rotiert das Werkstück, ein Meißel fährt an seiner Kontur entlang und trägt Material ab. Die Kraft, die auf das Bauteil wirkt, ist die sogenannte Zerspankraft. Und genau darum geht es Lendner. Die GFH-Maschinen machen keine fingergroßen Ventile oder dicke Kolben. GFH baut Maschinen zur Mikrobearbeitung und zerspanende Kräfte kann man in der Mikrobearbeitung nicht leiden. Seine Kunden wollen mikrometerdünne, winzige medizinische Pinzetten produzieren, kunstvolle Mini-Armbanduhnzeiger oder feinste Elektronikmodule. Kommt da die etwas grobe Zerspankraft daher, droht ständig Ausschuss durch Verformung. Deshalb ersetzt in den GFH-Maschinen der Laser die mechanischen Zerspanungswerkzeuge für Bohren, Fräsen und Oberflächenbearbeitung. Nur Drehen geht eben noch nicht per Laser. Dabei gibt es auch hier das altbekannte Problem mit mechanischen Werkzeugen in der Mikrobearbeitung. „Wenn die Drehmeißel immer feiner werden, verschleifen sie sehr schnell. So werden viele Werkzeugwechsel nötig“, sagt Lendner. „Und zum anderen erreichen auch die winzigsten Drehmeißel irgendwann schlicht eine physikalische Grenze.“

Lendner und sein Team tun also, was sie die letzten 20 Jahre taten: Sie überlegen sich, wie sie ein mechanisches Werkzeug durch ultrakurz gepulste Laser (UKP) ersetzen. Beim Strukturieren, Schneiden und Bohren auf Mikroebene ist ihnen das schon gelungen. Mehr als das: GFH packt alle drei UKP-Laser-Bearbeitungsverfahren in Kombimaschinen. Das Werkstück braucht man so nicht einmal umzuspannen. Lendner ist stolz. Und genau jetzt kommt ein Kunde aus der Medizintechnik und will auch noch Laserdrehen obendrauf.

DIE ZWEITE LUFT „Der UKP-Laser ist ein universelles Werkzeug. Sein Licht berührt nicht, erwärmt nicht. Er nimmt mikrometergenau genau das Material weg, das wir weghaben wollen. Also gibt es eigentlich keinen Grund, warum man mit Laserpulsen nicht auch drehen können sollte“, sagt Lendner.

Doch die Realität ist härter als gedacht. Schon die ersten Versuche an Musterteilen fordern das gesamte Know-how und die geballte Frustrationstoleranz seines Teams. Lendner erzählt: „Ich kam an den Punkt, wo ich mir überlegte, ob das der Mühe überhaupt wert ist. Darum haben wir die ersten Ergebnisse veröffentlicht, um mal zu schauen, wer überhaupt Interesse am Laserdrehen hat.“ Die Resonanz ist riesig und geht weit über die Medizintechnik hinaus. „Wir sahen, der Bedarf ist da, mit dem Laserdrehen könnten wir echt was reißen!“ Ein Energieschub für das GFH-Team – es kriegt die zweite Luft.

Die GL.smart kombiniert vier UKP-Laser-Bearbeitungsschritte im Mikrobereich: Schneiden, Bohren, Strukturieren und Drehen. Das Werkstück kann die Anlage durchlaufen, ohne auch nur einmal umgespannt zu werden. Die patentierte Trepanieroptik arbeitet flüssig jeden Bearbeitungsschritt hintereinander ab bis zum Finish.

DIE ENTSCHEIDENDE IDEE FÜR DIE MASCHINE: DER LASERSTRAHL ROTIERT AUCH!

DREHT EUCH BEIDE! Die brauchen sie auch, denn es liegen immer noch Jahre der Entwicklung vor ihnen. Das Hauptproblem ist die Bearbeitungsgeschwindigkeit. „Bei einem rotierenden Teil bearbeitet der Laser immer nur einen schmalen Streifen Oberfläche, nämlich den, der der Optik gerade zugewandt ist. Es kommt also darauf an, wie schnell die Maschine eine neue, unbearbeitete Oberfläche ins Licht drehen kann.“ Mit einer luftgelagerten, hochgenauen Drehachse erreicht das Werkstück 3.500 Umdrehungen pro Minute. Für das menschliche Auge ist das zwar irrsinnig schnell, aber aus Sicht eines in Pikosekunden gepulsten Lasers dreht sich das Teil in quälender Zeitlupe. Der Laser kann nur eine Linie bearbeiten. Also ein, zwei Kaffee trinken, ein Buch lesen, Mittagspause machen, die Star-Wars-Trilogie im Director’s Cut schauen und dann mal nachsehen gehen, ob es wieder was zu tun gibt. „Auf diese Weise ist der Materialabtrag einfach zu langsam, um wirtschaftlich zu sein.“

Doch dann kommt dem Team der entscheidende Gedanke: Für ein rotierendes Stück Metall gibt es zwar allerlei physikalische Grenzen. Für körperloses Licht gibt es die jedoch nicht. Also sagten sich die Entwickler: Lassen wir doch auch den Laserstrahl rotieren, und zwar rasend schnell! Wird der Strahl auf das sich drehende Werkstück gesetzt, erhöht sich die Bearbeitungsgeschwindigkeit durch die gegenläufigen



Stefan Höbmaier / Fotograflora

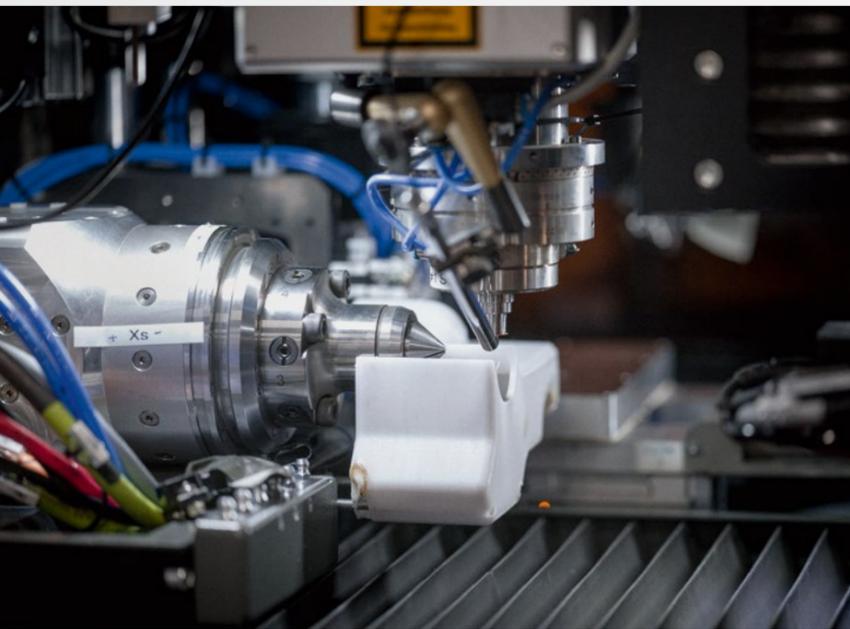
Drehungen signifikant. Mit der frischen Idee kommt die dritte Luft. Die GFH-Ingenieure greifen jetzt zu einer sogenannten Trepanieroptik, die sie eigentlich für ein anderes Projekt entwickelt haben. Kernstück der Trepanieroptik sind rotierende Zylinderlinsen, gefasst in einer extrem fein ausgewuchteten Präzisionsspindel. Sie lässt den Fokus bis zu 30.000-mal pro Minute um das Werkstück kreisen und feuert dabei blitzschnelle Salven ultrakurzer Pulse ab. Im ersten, gröberen Schritt, dem Schruppen, dampft das Licht mit hohem Energieeintrag möglichst viel Material weg. In der anschließenden Feinbearbeitung, dem Schlichtprozess, sorgt es dann mit weniger Energie für die finale Oberflächenqualität. Das Projekt „Laserdrehen“ ist geschafft!

UND NOCH EIN TRIUMPH Die Trepanieroptik hat aber noch mehr drauf. Denn mit einem Strahl, der in vielen Winkeln auf die Oberfläche trifft und kreisen kann, schneidet und bohrt es sich auch besser im Mikrobereich. „Wir können nun die Wandschrägen von Ausschnitten und Bohrungen exakt bestimmen und sogar Löcher erzeugen, die sich nach unten weiten“, sagt Lendner. „Machen Sie das mal mit einem mechanischen Bohrer!“

Und die Euphoriekurve des Teams geht steil, als sich – wie insgeheim erhofft – zeigt, dass sich jetzt auch Saphirglas, Keramik und Diamant ruck, zuck bearbeiten lassen. Das sind Werkstoffe, die sich sonst jedem mechanischen Zerspanen hartnäckig widersetzen und ein Werkzeug nach dem anderen killen. Lendner kommentiert etwas nüchterner: „Hier zeigt sich ein ganz entscheidender Vorteil der Lasertechnologie gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren: keine Last auf dem Teil, kein Verschleiß am Werkzeug. Das macht die Technologie so wirtschaftlich.“

Seit 2020 steht die Mikrobearbeitungsmaschine GL.smart bei mehreren Kunden – auch aus der Medizintechnik, woher die Initialidee kam. Sie ist die erste Anlage, die alle vier spannenden Verfahren im Mikrobereich per Laser kombiniert: Bohren, Strukturieren, Schneiden – und Drehen. „Naja, von ‚Spanen‘ kann man beim Ultrakurz-puls laser ja eigentlich nicht wirklich sprechen, eher von ‚Verdampfen‘, aber so versteht halt jeder sofort, was gemeint ist“, sagt Lendner und strahlt. ■

Kontakt: Florian Lendner, Geschäftsführer, Telefon: +49 991 29092-113, florian.lendner@gfh-gmbh.de



AUCH DIE WINZIGSTEN DREHMEISSEL ERREICHEN IRGENDWANN EINE PHYSIKALISCHE GRENZE. DA KOMMT MAN NUR MIT LASERLICHT DRÜBER.“

Florian Lendner, GFH-Geschäftsführer

Prinzip des Laserdrehens: Links die luftgelagerte Drehachse, die das Werkstück hält; von oben arbeitet die Trepanieroptik. Das Werkstück rotiert mit 3.500 Umdrehungen pro Minute, der Fokus kreist 30.000-mal pro Minute.

Stefan Hobmaier / Fotogloria

WICHTIGE WIRKMECHANISMEN



Erwärmung: Der Laser regt die Molekülschwingung an. Das Gewebe erhitzt sich kontrolliert.



Abtrag: Der Laser bringt so viel Energie ein, dass er Gewebezellen direkt zerstört und verdampft.



Ablation: Laserpulse erzeugen mikroskopische Plasmaexplosionen. Die Schockwellen lösen Gewebe ab.



Fotodynamische Therapie: Ein zunächst harmloser Stoff wird in den Körper gebracht. Dort wo er wirken soll, zerbricht Laserlicht dessen Moleküle zu aggressiven Wirkstoffen.

[AUGE]

Bei einer **Netzhautablösung** erhitzt Laserlicht die Netzhaut punktuell und vernarbt sie. So schließt es Löcher und festigt die Verbindung zur Auginnenwand.

In der refraktiven Chirurgie trägt der Laser feine Schichten Hornhaut ab, um **Fehlsichtigkeit** zu korrigieren.

[KNOCHEN]

Laser schneiden bei **chirurgischen Eingriffen** Knochengewebe präzise und in freien Konturen.

[GANZER KÖRPER]

Laserinduzierte Thermotherapie überhitzt gezielt **Tumore oder krankhafte Verwachsungen** und tötet sie ab.

[BLUTGEFÄSSE]

Nach Verletzungen vernarbt Laserlicht Gewebe, um **Risse und Löcher** zu schließen.

Hochenergetische Laserpulse erzeugen Mikroschockwellen in **Thrombosen und Ablagerungen** und lösen diese so von Gefäßwänden.

[AUGE]

Drei Lasertherapien für **grünen Star** senken überhöhten Augenwasserdruck. Der Laser tötet bestimmte, Augenwasser produzierende Zellen ab, weitet den natürlichen Augenwasser-Abfluss oder bohrt einen neuen Abfluss durch die Iris.

[HERZ]

Bei bestimmten **Durchblutungsstörungen** bohrt der Laser in die linke Herzkammer feine Löcher. So fließt Blut direkt aus der Kammer in die Äderchen des Herzmuskels.

[BLASE UND HARNLEITER]

Laserpulse lösen Mikroplasmaexplosionen in **Harn- und Blasensteinen** aus. Die Schockwellen und thermischen Spannungen zertrümmern die Steine.

Heile, heile Segen

Ein Segen, dass es den Laser gibt, sagt auch die Medizinerin. Vor genau 60 Jahren zerstörte ein Laser einen Augentumor und heilte zum ersten Mal einen Menschen. Seither ist viel passiert.

Bei Smartphonekameras und -displays kommt es darauf an, Gläser schnell und sicher zu verbinden. Das ist nur eine von vielen möglichen Anwendungen für das massenhafte Laser-Glasschweißen.

VON SEBASTIAN HECKER

GLAS GLAS GLAS

Laser-Glasschweißen für die industrielle Massenfertigung: Eine vollautomatische Qualitätskontrolle macht's möglich.

Massenhaftes Fügen transparenter und semitransparenter Materialien wie Glas oder Saphir ist in vielen Branchen an der Tagesordnung: Consumer Electronics, Automotive-Industrie, Architektur, Fotovoltaik, technische Optik oder Medizintechnik setzen es ein. Seit einigen Jahren steht mit dem Glasschweißen per Ultrakurzpuls-Laser ein Verfahren in den Startlöchern, das hochqualitative Ergebnisse erreicht, aber bisher bloß in Kleinserien zum Einsatz kommt. Es hat jedoch das Potenzial, schnell und immens produktiv zu arbeiten.

Bislang war die Industrie oftmals auf ein Fügeverfahren angewiesen, das sich zur Massenproduktion eignet: das Kleben. Den Herstellern gelang es zwar, ihre Klebprozesse nach und nach zu optimieren, dennoch blieben prozessbedingte Nachteile und qualitative Probleme.

Eines der Grundprobleme beim Kleben ist schlicht, dass man Klebstoff braucht, also einen zusätzlichen Stoff im Prozess. Und den muss man in der Fertigung handhaben. Maschinen oder Arbeiter tragen den Klebstoff auf und pressen die Fügepartner aneinander. Der Klebstoff braucht eine gewisse Zeit, um auszuhärten, erst dann hält die Verbindung. Beim Laserschweißen spart man sich dieses Handling und die Schweißnähte halten sofort mit voller Festigkeit. Ein weiterer Nachteil des Klebstoffs: Er besitzt andere chemische und mechanische Eigenschaften als die Fügepartner. Das hat Folgen. Klebstoffe gasen aus und können die Baugruppe dadurch verunreinigen. Außerdem altern und verspröden sie, was wiederum die Lebensdauer des Produkts beeinträchtigt. Gas- und flüssigkeitsdichte Verbindungen lassen sich per Kleber zudem nur bedingt herstel-



SEBASTIAN HECKER war

Industriedoktorand bei TRUMPF Laser in Schramberg.

In seiner Dissertation für die Universität Stuttgart erarbeitete er 2020 ein Verfahren, mit dem Glasschweißen automatisch überwacht werden kann, und entwickelte gleichzeitig ein praxistaugliches System.

len und wenn, dann nur für eine relativ kurze Zeit. Ultrakurzpuls-Laser hingegen erschaffen eine stoffschlüssige Verbindung der Fügepartner, die alle zuvor genannten Probleme beseitigt. Und sie haben einen weiteren Vorteil. Es ist möglich, Bauraum zu sparen. Laserschweißen kann aufgrund der höheren Nahtfestigkeit mit einer geringeren Anbindungsfläche als Klebstoffe auskommen. Außerdem ist es in der Fügeflächengeometrie flexibler, was die Designfreiheit für die Bauteile erhöht.

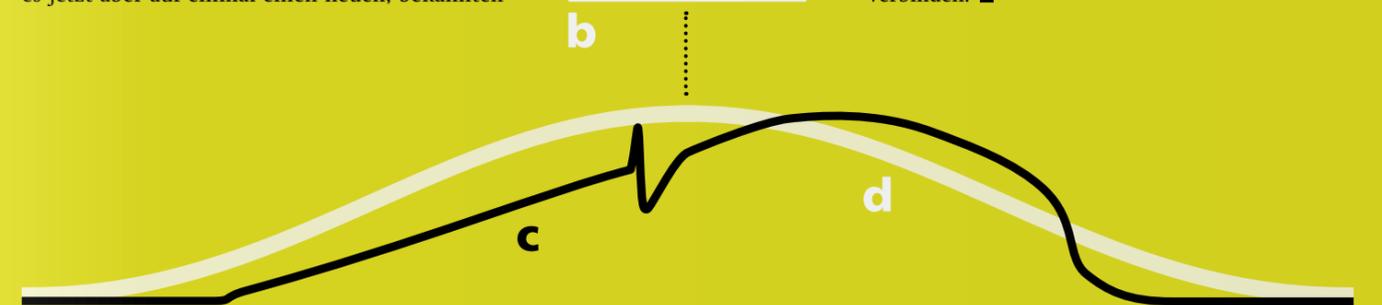
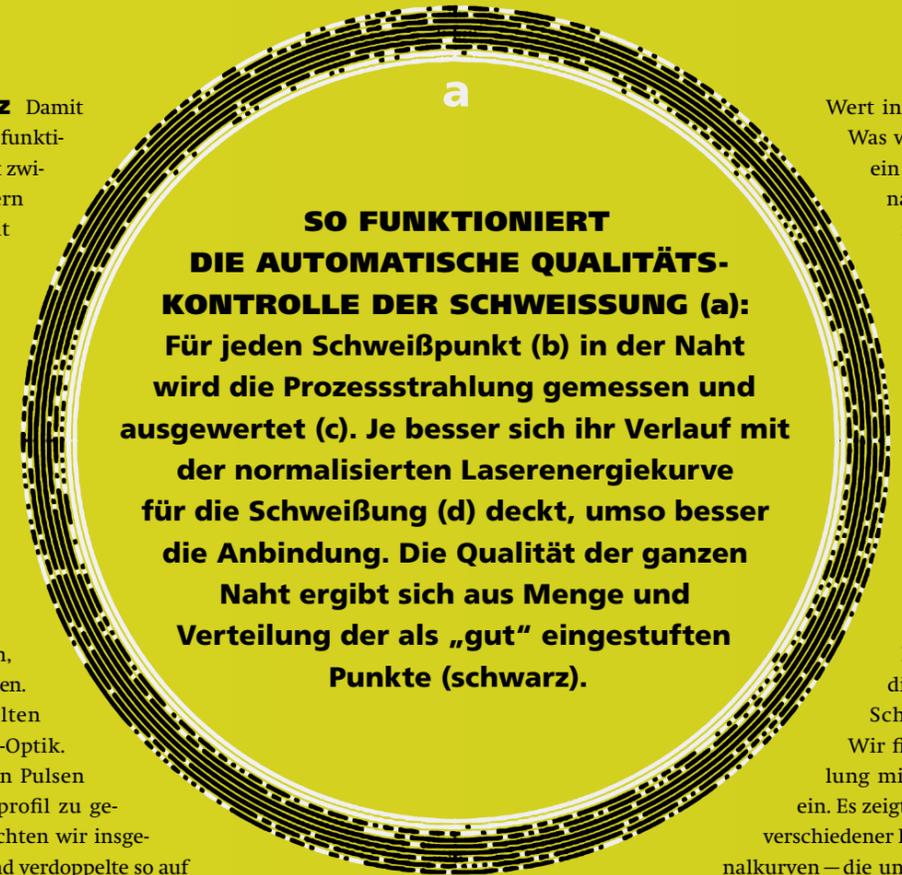
Das sind überwältigende Vorteile – doch das Laser-Glasschweißen hatte zwei entscheidende Nachteile, die dem Einsatz in der Massenproduktion im Weg standen: einen hohen Anspruch an die Oberflächenqualität der zu fügenden Teile und keine Möglichkeit, die Nahqualität automatisch zu kontrollieren. Hatte! Denn jetzt haben wir eine Lösung entwickelt.

SO FUNKTIONIERT'S Bevor wir zu unserer Lösung kommen, möchte ich kurz das Prinzip des Verfahrens beschreiben. Zum Einsatz kommt dabei gepulste, infrarote Laserstrahlung mit hoher Wiederholungsrate und einer Pulsdauer von Pikosekunden oder weniger. Wir legen zwei Glasbauteile aufeinander. Dann fokussieren wir die Laserstrahlung durch das obere Glasbauteil hindurch in das Innere des unteren Bauteils. Die Pulse erzeugen dort eine Schmelze, die sich tropfenförmig nach oben ausbreitet, in das oben liegende Bauteil hinein. Die Schmelze erstarrt und es entsteht eine form-schlüssige Verbindung. Pro Schweißbahn wiederholen wir das mehrere Tausend Mal. So entstehen in wenigen Sekunden Tausende solcher kleinen Schweißpunkte, die die Bauteile verbinden.

MEHR TOLERANZ Damit das Verfahren optimal funktioniert, durfte der Spalt zwischen den Fügepartnern in der Vergangenheit nicht größer sein als ein bis vier Mikrometer. Ansonsten brach die Schmelze im Spalt zur Seite aus und es kam zu keiner Verbindung. Für eine Massenfertigung waren die qualitativen Ansprüche an Oberflächen-glattheit und -reinheit zu hoch. Also suchten wir nach Möglichkeiten, die Toleranzen zu erhöhen.

Zunächst wechselten wir auf die TOP-Weld-Optik. Sie ermöglicht es, den Pulsen ein längliches Strahlprofil zu geben. Mit diesem erreichten wir insgesamt größere Nähte und verdoppelte so auf einen Schlag die Spaltüberbrückungstoleranz. Der nächste Schritt war in zweifacher Hinsicht der Durchbruch: Wir modulierten jetzt bei jedem einzelnen Schweißpunkt die Laserenergie. Das heißt, wir lassen die Energie der Laserpulse pro Schweißpunkt zunächst anschwellen und dann gleich wieder abfallen. Dadurch erhöhen wir die Spaltüberbrückungstoleranz um weitere 30 Prozent und steigern sogar die maximal überbrückbare Spaltgröße um 50 Prozent. Das Ergebnis sind Toleranzwerte, mit denen die Massenfertigung realistisch arbeiten kann.

AUTOMATISCHE ÜBERWACHUNG Zugleich öffnete die Energiemodulation endlich den Weg in eine automatisierte Qualitätskontrolle. Bisher war es nur möglich, die Naht nachträglich optisch oder in Stichproben mit Querschliffen am Mikroskop zu prüfen. Das war aufwendig und unbefriedigend. Mit der Energiemodulation gibt es jetzt aber auf einmal einen neuen, bekannten

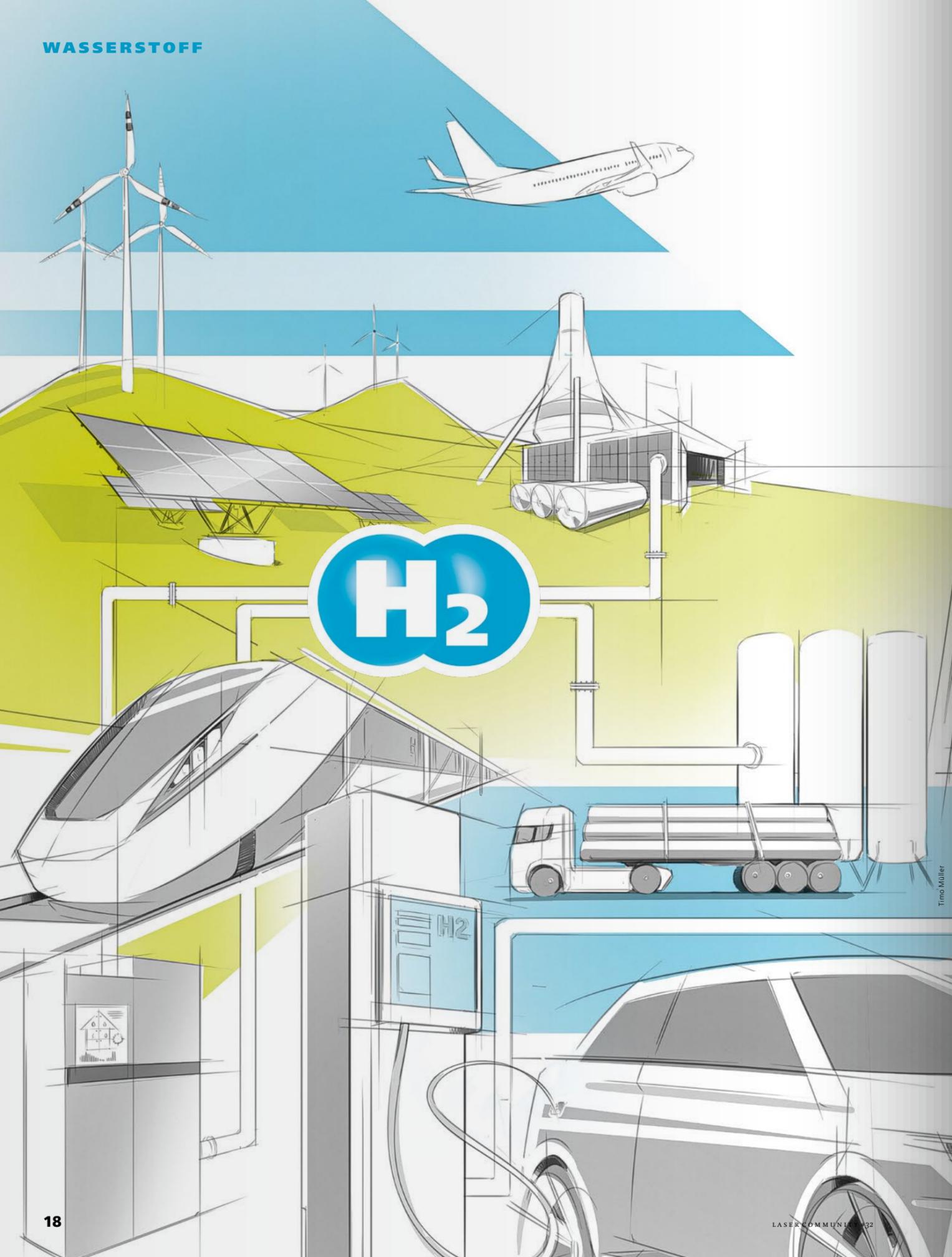


Wert innerhalb des Prozesses. Was wir nun brauchten, war ein zweites, messbares Signal aus dem Prozess, und zwar eines, dessen Verlauf direkt mit dem Prozess zusammenhängt. Diese Messwerte – so der Gedanke – ließen sich dann mit der Energiemodulation in Verbindung setzen, um bei jedem einzelnen Schweißpunkt beurteilen zu können, ob er gelungen ist. Wir fanden ein solches Signal in der Prozessstrahlung, die die Schmelze bei jedem Schweißpunkt emittiert.

Wir fingen die Prozessstrahlung mithilfe einer Fotodiode ein. Es zeigte sich, dass wir anhand verschiedener Berechnungen beide Signalkurven – die uns bekannte modulierte Energie und die gemessene Intensität der Prozessstrahlung – zueinander in Verbindung setzen können. Das Ergebnis sagt uns zuverlässig, wie gut die Verbindung im Schweißpunkt gelungen ist. Die Genauigkeit der Qualitätsvorhersage beträgt für jeden einzelnen Schweißpunkt 98,6 Prozent!

Eine Naht besteht üblicherweise aus Tausenden Schweißpunkten. Aus der Summe aller gelungenen Schweißpunkte und ihrer Verteilung über die Gesamtnaht hinweg können wir also den Verbindungserfolg des Schweißprozesses automatisch errechnen. Die automatische Qualitätskontrolle ist eine immense Verbesserung für eine massenhafte Produktion. Sie erlaubt es sogar, Werkstücke zu retten, weil sich mangelhafte Schweißungen korrigieren lassen.

Mit dem automatisch überwachten Laserschweißen steht der Industrie nun also ein ausgereiftes, produktives und sicheres Verfahren zur Verfügung, um Glas und andere transparente Materialien zu verbinden. ■



VOLL AUF WASSER STOFF

!

*Jetzt wird's ernst:
Wasserstoff wird der neue
Energieträger des 21. Jahrhunderts.
Brennstoffzellen, Rohre und Tanks
entstehen mithilfe von Lasertechnik.*

D

Die Zeichen werden deutlich, es ist soweit: Wasserstoff kommt als neue tragende Säule der Energieversorgung. Eine ganze Reihe von Industrienationen stellte in den vergangenen Jahren ambitionierte, verbindliche Wasserstoffstrategien vor, darunter Japan, Deutschland, Australien, Südkorea, die Niederlande, Italien und die Europäische Union als Ganze. Die Idee von Wasserstoff als wichtigem Energieträger für Elektrizität, Wärme, Industrieprozesse und Mobilität ist schon seit Jahrzehnten in den Köpfen weitblickender Wissenschaftlerinnen und Ingenieuren. Und wer will, kann sogar – wie so oft – auf den Schriftsteller und Berufsvisionär Jules Verne verweisen: In seinem Roman „Die geheimnisvolle Insel“ von 1874 bezeichnet er Wasserstoff als „die Kohle der Zukunft“.

Er schreibt: „Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist“, und weiter: „Die so zerlegten Elemente

des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf absehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“ Okay, das ist jetzt fast 150 Jahre her. Warum also sollte es ausgerechnet heute so weit sein, diesen Gedanken in die Wirklichkeit umzusetzen?

WER KRIEGT DAS GELD? In der Vergangenheit stand dem Wasserstoffraum im Grunde vor allem ein hartes Faktum entgegen: Die Nutzung anderer Energieträger wie Kohle, Öl oder Erdgas war schlicht billiger und profitabler. Doch die Auswirkungen der Klimakrise führen heute auch dem Letzten deutlich vor Augen, dass „billig“ relativ sein kann. Die Kosten und Anstrengungen, um mit der beginnenden Erdüberhitzung fertigzuwerden, entziehen sich genauen Prognosen. Dass sie aber gigantisch würden, ist heute breiter Konsens. Die neue Ernsthaftigkeit ist jedoch mehr als nur klimapolitische Not. Es gibt überaus plausible Gründe, die Wasserstoffwirtschaft zu pushen. Die Vorteile dieses simplen Gases als Energieträger sind unübersehbar:

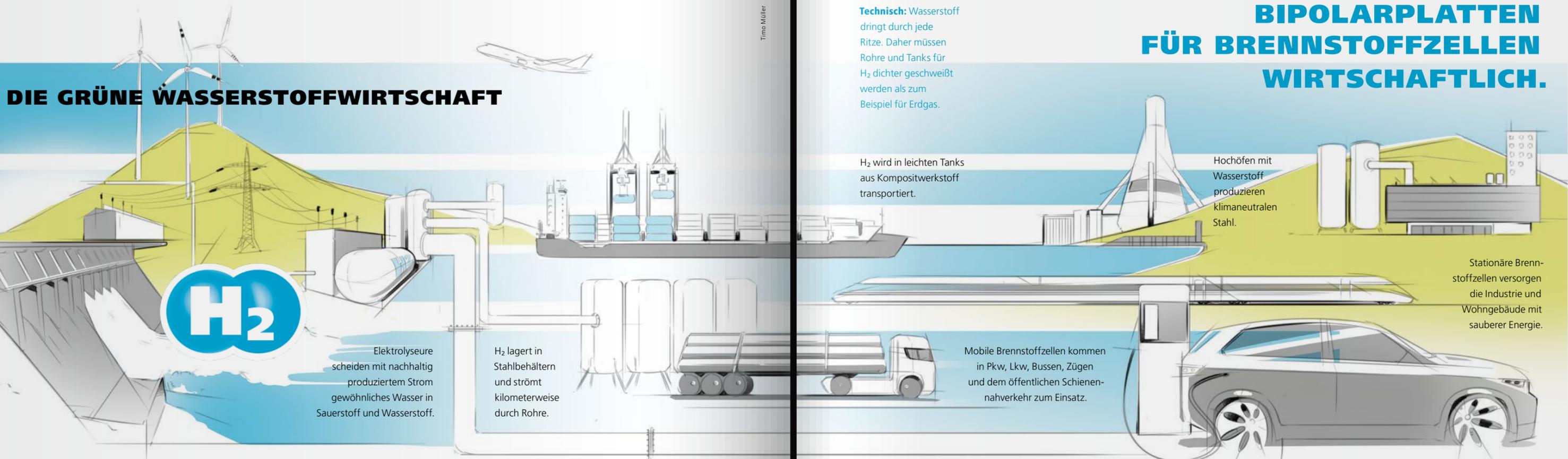
Wasser als wichtiger Ausgangsstoff zur Wasserstoffgewinnung ist reichlich vorhanden. Auch altbekannte Player wie etwa Erdgas eignen sich unter Umständen zur sauberen Herstellung von Wasserstoff (siehe Kasten zur Farbenlehre des Wasserstoffs). H₂, also Wasserstoff, verbrennt sauber – neben der nutzbaren Energie entsteht als „Abfallprodukt“ lediglich neues Wasser. Wasserstoff eignet sich auch hervorragend dafür, elektrische Energie zu speichern und zu transportieren (Stichwort: „Power to Gas“). Das wird der umweltfreundlichen, aber unregelmäßigen Stromgewinnung per Wind- und Sonnenkraft zum wirklichen Durchbruch verhelfen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Verwendung von Wasserstoff schon seit vielen Jahren erfolgreich erprobt ist, etwa in Raketenantrieben oder der Brennstoffzelle in Pkw, Bus und Zug. Ingenieure der chemischen Industrie haben langjährige, praktische Erfahrungen mit H₂: Sie verwenden ihn schon lange als Grundstoff für zahlreiche Prozesse, zum Beispiel zur Gewinnung von Ammoniak für Düngemittel, von Methanol für diverse Säuren oder von Ethylen und Propylen für Kunststoffe. Auch die Leitung von Wasserstoff in Pipelines über mehrere Hundert Kilometer hinweg ist längst Usus. Altbekanntes Neuland, sozusagen.

Kein Wunder also, dass immer mehr Industrieländer bereit sind, zig Milliarden Euro in Entwicklung und Bau einer zukunftsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur zu investieren.

WER AUF LASERTECHNIK SETZT, KANN DEN WASSERSTOFF-BOOM VOLL MITNEHMEN.

Wer wird Teil des Megaprojekts Wasserstoff sein? Alle Unternehmen, die schon heute bereit sind, sich auf den nahenden Boom einzulassen, und mit moderner Produktionstechnik parat stehen, all die Elektrolyseure, Rohre, Leitungen, Tanks und Brennstoffzellen zu bauen, die jetzt kommen werden. Um mitzumachen, braucht es Weitsicht, eine Prise unternehmerischen Muts – und Lasertechnik.

LASER IN DER BRENNSTOFFZELLE Das Herz jeder Wasserstoffwirtschaft bildet eine galvanische Zelle, die Energie aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff gewinnt: die Brennstoffzelle. Brennstoffzellen sind exakt der Grund, warum eine Wasserstoff-



DIE GRÜNE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

NUR LASER SCHWEISSEN BIPOLARPLATTEN FÜR BRENNSTOFFZELLEN WIRTSCHAFTLICH.



Atomar: Wasserstoff ist das kleinste, einfachste und häufigste Element des Universums – etwa 90 Prozent aller Atome weltweit. Es besteht aus einem Proton und einem Elektron.

Molekular: Wasserstoff tritt fast ausschließlich als Molekül aus zwei Atomen auf (H₂). Es ist das kleinste Molekül, das es gibt.

Physikalisch: Unter Normalbedingungen ist Wasserstoff ein geruch- und farbloses Gas. Es ist das leichteste aller Gase.

Chemisch: Wasserstoff ist brennbar und bildet mit Luft und anderen oxidierenden Gasen ein explosives Gemisch.

Technisch: Wasserstoff dringt durch jede Ritze. Daher müssen Rohre und Tanks für H₂ dichter geschweißt werden als zum Beispiel für Erdgas.

wirtschaft überhaupt effizient ablaufen kann: In der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff steckt wahn-sinnig viel Energie. Aber anders als bei den meisten anderen hochenergetischen chemischen Reaktionen gibt es mit der Brennstoffzelle eine technische Möglichkeit, sie kontrolliert ablaufen zu lassen. Und ihre Energie lässt sich ohne große Umwege über Verbrennungshitze, Turbinen oder Ähnliches in Strom wandeln. Brennstoffzellen sind Energiewandler. Flexibel sind sie auch noch. Die Brennstoffzelle kann Autos oder Schiffe antreiben, aber auch Gebäude und Industriebetriebe mit Strom versorgen.

Erfahrungen mit Brennstoffzellen gibt es schon, seit sie 1838 zum ersten Mal gebaut wurde. Doch all die Brennstoffzellen, die von da an bis heute produziert wurden, sind ein trauriges Häufchen neben denen, die wir in den nächsten zehn Jahren bauen werden. Gesucht sind also Fabriken und Prozesse, die bald eine hocheffiziente Zelle nach der anderen herstellen.

Je nach Einsatzgebiet haben Brennstoffzellen unterschiedliche technische Designs. Offensichtlich gibt es bei stationären Brennstoffzellen, die Gebäude versorgen, ganz andere Anforderungen an Wirkungsgrad, kurzfristige Energiebereitstellung und Größe als für

mobile Brennstoffzellen in Pkw oder Lkw. Der Typ, der das größte Potenzial für die mobile Anwendung hat, ist die Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell, kurz: Niedrigtemperatur-PEM-Zelle. Denn die PEM-Zelle steckt Erschütterungen während des Betriebs locker weg und hat bezogen auf Volumen und Gewicht eine sehr hohe Leistungsdichte – genau das, was man braucht, wenn man ein Fahrzeug beschleunigen will.

Kern der PEM-Zelle ist ein Stack aus Hunderten sogenannten Bipolarplatten. Je zwei Bipolarplatten umschließen eine Textilmembran. Eine Bipolarplatte wiederum besteht aus zwei aneinandergeschweißten, 75 bis 100 Mikrometer dünnen Edelstahl-Halbschalen, in die feinste Kanäle eingepreßt sind. Durch diese Kanäle strömen später auf der einen Seite Wasserstoff und auf der anderen Seite Sauerstoff zueinander, um in der zwischenliegenden Textilmembran zu Wasser und Energie zu reagieren.

Das Ganze funktioniert nur, wenn die beiden hauchdünnen Halbschalen und die Wände jedes einzelnen der vielen Kanälchen extrem dicht aneinandergeschweißt werden. Aber schon die geringste Pore auf einer Bipolarplatte kann den Tod für den gesamten Stack bedeuten. Pro Stack summiert sich die Schweiß-

H₂ wird in leichten Tanks aus Kompositwerkstoff transportiert.

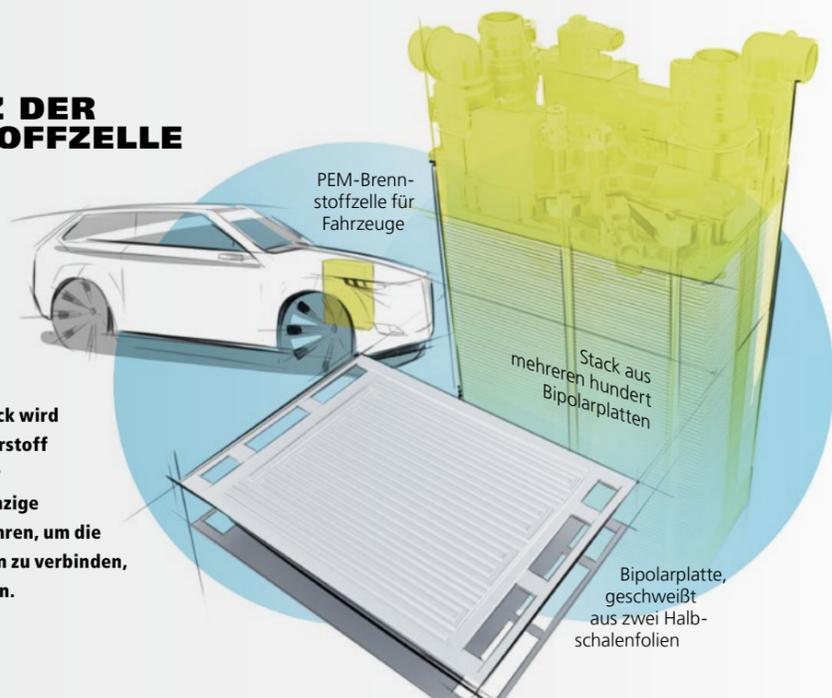
Hochöfen mit Wasserstoff produzieren klimaneutralen Stahl.

Stationäre Brennstoffzellen versorgen die Industrie und Wohngebäude mit sauberer Energie.

Mobile Brennstoffzellen kommen in Pkw, Lkw, Bussen, Zügen und dem öffentlichen Schienenverkehr zum Einsatz.

DAS HERZ DER BRENNSTOFFZELLE

Die PEM-Brennstoffzelle produziert den Strom für Pkw, Lkw und andere Fahrzeuge. In hunderten Bipolarplatten im Stack wird Wasserstoff und Sauerstoff in Energie und Wasser umgewandelt. Das einzige wirtschaftliche Verfahren, um die dünnen Bipolarplatten zu verbinden, ist das Laserschweißen.



EINES IST KLAR: JE MEHR WASSERSTOFF, DESTO MEHR LASERTECHNIK.

naht schon mal auf eine Länge von mehreren Kilometern. Das scannergeführte Laserschweißen ist heute das einzige Verfahren, das diese Anforderung an Präzision, Geschwindigkeit und Sicherheit wirtschaftlich realisieren kann. Die Scanneroptik führt den Spot über das Werkstück, eine Sensorik sorgt für die nötige Prozesssicherheit.

Stationäre Brennstoffzellen führen ein ruhigeres Leben und haben daher andere Bipolarplatten als ihre mobilen Schwestern. Die Bipolarplatten bestehen meist aus geklebten Grafitfolien. Auch hier findet der Laser seinen festen Platz in der Prozesskette, denn der Grafit muss an den Klebestellen von Verschmutzung gereinigt werden. Der Laser verdampft Staub und Fett und aktiviert die Oberfläche für den Fügeprozess.

TANKS UND ROHRE Lasertechnik ermöglicht es, Brennstoffzellen massenweise zu fertigen. Richtig spannend wird es, wenn man sich die komplette Infrastruktur einer grünen Wasserwirtschaft vorstellt, in der alle Bereiche ineinandergreifen (siehe Grafik Seite 20). Die Unternehmen werden nicht nur viel mehr Brennstoffzellen als heute bauen, sondern auch kilometerweise Edelstahlrohre und tausendfach Tanks. Bei Tanks in Fahrzeugen oder Tanks zum Transport von Wasserstoff über Land und Wasser spielt das Gewicht natürlich eine herausragende Rolle. Darum verwendet man hier gerne leichte Kompositwerkstoffe, für deren Ver-

arbeitung Lasertechnologie eingesetzt wird. Auch bei großen Wasserstoff-Hochdruckbehältern aus Stahl, die an Häfen oder Tankstellen stehen werden, sorgen Laser für eine dichte, rasch gezogene Schweißnaht.

Und egal, wohin das ganze H₂ letztlich kommt: Überallhin wird es durch Edelstahlrohre höchster Güte fließen müssen. Sogar neue, kilometerlange Pipelines sind angedacht. Für den Laser ein Heimspiel, ist er doch ohnehin schon seit Jahren als Werkzeug für das wirtschaftlichste Rohrschweißverfahren etabliert. Auch die höheren Anforderungen an die Dichtigkeit der Schweißnaht wird fürs Laserschweißen sprechen. Denn Wasserstoff ist das kleinste Molekül der Welt, viel kleiner als etwa Erdgas, und schlüpft durch jede Ritze. Kurz: je mehr Wasserstoff, desto mehr Laser.

Die Pläne stehen, die öffentlichen Gelder fließen bereits an die Unternehmen, die in Wasserstoff investieren. Und ob wir nun dabei an Jules Verne denken oder nicht: Mithilfe der Lasertechnik wird die Menschheit zeigen, dass der bärtige französische Schriftsteller mit dem Wasserstoff – wie schon mit der Mondlandung, der Unterwasserseefahrt, der Leuchtreklame, Wolkenkratzern und Rechenmaschinen – wieder einmal den richtigen Riecher hatte. ■

Ansprechpartnerin:

Isabel Thome, Industry Management Fuel Cell bei TRUMPF, Telefon: +49 7156 303-30116, isabel.thome@trumpf.com

Wenn bei Wasserstoff von Farben die Rede ist, bezieht sich das nicht auf die Eigenschaften des Gases, sondern auf die Art seiner Gewinnung:

Grüner Wasserstoff entsteht durch klassische Elektrolyse von Wasser. Die Energie für das Verfahren stammt ausschließlich aus regenerativen Quellen wie etwa Windkraft und setzt kein CO₂ frei.

Grauer Wasserstoff entsteht, indem man Erdgas in sogenannten Dampfreformern erhitzt und in Wasserstoff sowie CO₂ umwandelt. Das Verfahren ist noch deutlich billiger als die Elektrolyse, aber klimaschädlich.

Blauer Wasserstoff entsteht ebenfalls aus Erdgas in Dampfreformern. Allerdings wird hier das CO₂ aufgefangen und unter der Erde verpresst, zum Beispiel in erschöpften Erdgasfeldern.

Türkiser Wasserstoff wird aus Erdgas gewonnen durch energieintensive Hochtemperatur-Methanpyrolyse. Dabei entsteht fester Kohlenstoff, den man weiter nutzen kann. Nur klimafreundlich, wenn man eh vorhandene Abwärme für das Verfahren umnutzen kann.

Bunter Wasserstoff ist ein Sammelbegriff für alle anderen Arten, an Wasserstoff zu kommen. Keines dieser Verfahren ist derzeit jedoch industriell anwendungsreif.



SCHAU DOPPELT!



In der vernetzten Fertigung kommt es auf den Sensor-Blick an. Besser gesagt: auf zwei Blicke.

Wie soll eine Fabrik smart werden, wenn ihre Maschinen blind sind? Nur ein Beispiel: Hairpin-Schweißen beim Elektromotor. Hier werden die Spitzen von Kupferdrähten (Hairpins) miteinander verschweißt, die die Spule im Motor bilden. Durch sie fließt später Strom. So baut sich ein Magnetfeld auf, das wiederum den Elektromotor in Schwung bringt. Deshalb hängt am Ende alles davon ab, wie gut jede einzelne Schweißung sitzt. Das Problem ist die Positionierung der Hairpins: Nicht immer stehen alle Kupferstäbe auf gleicher Höhe eng zueinander, sodass sie stabil verschweißt werden könnten. Klar, die Laseroptik hat eine Kamera und schaut sich die Sache von oben an, bevor sie schweißt, sieht aber eben nur zwei Kupferflächen und weiß leider nichts darüber, in welchem Höhenverhältnis sie zueinander stehen. Das kann zu einer schlechten Schweißqualität führen.

Darum haben wir das Problem mit einem Sensor gelöst, der optische Kohärenz-Tomografie nutzt (OCT-Sensor). Dieser Sensor schaut zusätzlich durch die Laseroptik auf die Hairpins. Er lenkt einen Messstrahl auf das Bauteil, vergleicht die Strecke mit einem Referenzstrahl und generiert ein Höhenprofil der Hairpins. So findet der OCT-Sensor heraus, ob die beiden Flächen – also die Enden der Hairpins – wirklich auf gleicher Höhe stehen. Die Kamera erkennt zusätzlich die Lage der Hairpins. Zusammen liefern die beiden Sensoren ein genaues Bild darüber, wie die Pins in der Maschine positioniert sind. Mit diesen Daten kann nun die smarte Fabrik arbeiten. Sie kann sie für die Schweißung nutzen und sie für die spätere Qualitätskontrolle ablegen. Sie kann sie auch in eine Datenbank schreiben, wo Algorithmen typische Fehlstellungen ermitteln können, auf die die Maschine sich direkt einstellen kann. Die Smart Factory lebt von Daten. Je mehr Sensoren, desto mehr Daten – klar. Und je besser die Daten sind, die die Fabrik aus den harten, realen Fertigungsprozessen verarbeitet, desto schlauer wird sie. Denn jetzt kann sie den Prozess der Realität anpassen und ist nicht darauf angewiesen, dass die Realität dem Prozess folgt. ■



Wilrid Dubitzky ist Head of Product Management Pulsed Laser bei TRUMPF.

TORNADO, HURRA!

Der Maschinenbauer Bergmann & Steffen bläst einen Miniwirbel um die Scanneroptik und holt noch mehr Leistung aus der Remote-Schweißanlage heraus.

Was arbeitet doppelt so schnell wie eine Scanneroptik? Zwei Scanneroptiken. Wenn die aber nebeneinander schweißen, passiert es leicht, dass die eine der anderen ihren Schmauch vor die Linse pustet – und das kann den Schweißprozess stören. Üblicherweise bläst ein sogenannter Crossjet einen horizontalen Luftstrom quer zum Laserstrahl und hält den Arbeitsbereich des Scanners frei von Dämpfen und Schweißspritzern. Mittlerweile kommt es aber immer häufiger vor, dass links und rechts von der Scannereinheit nicht mehr nur leerer Raum ist, sondern eben eine zweite Optik arbeitet. Der Maschinenbauer Bergmann & Steffen hat das Schmauchproblem elegant gelöst. Nebenbei, sozusagen. Denn eigentlich ging es ihm um etwas ganz anderes.

DRUCK ABBAUEN Geschäftsführer Uwe Bergmann ist einer der Pioniere des Remote-Schweißens. Seit nunmehr 20 Jahren stattet er Automobilzulieferer mit solchen Laseranlagen aus. Und seither plagt ihn ein Gedanke: „Die Kompressoren für den Crossjet fressen mir zu viel Energie. Das treibt die Betriebskosten der Anlage in die Höhe. Unnötigerweise, wie ich finde.“ Crossjets arbeiten mit einem Druck zwischen zweieinhalb und zehn Bar. „Über die Lebensdauer unserer Anlagen kommt somit einiges an Druckluftkosten für unsere Kunden zusammen.“ Trotz der energieintensiven Luftströme halten die Crossjets außerdem längst nicht jeden Spritzer von der Optik fern. So müssen die Betreiber regelmäßig das irgendwann verschmutzte Schutzglas tauschen, was natürlich den Produktionsprozess unterbricht und zu weiteren Kosten führt. „Insgesamt war ich der Ansicht, dass es möglich sein muss, mit weniger Aufwand bessere Ergebnisse zu erzielen“, sagt Bergmann.

WIRBEL MACHEN Zusammen mit TRUMPF befasst sich Bergmann & Steffen drei Jahre mit der Aufgabe. Die Grundidee ist charmant einfach: Statt eines seitlichen Druckluftstrahls aus dem Kompressor soll ein schlichtes, ringförmiges Gebläse um das Schutzglas den Prozessschmauch niederhalten. Bergmann: „Wir beschäftigen uns schon seit Langem mit Luftströmungen in unseren Anlagen.“ Darum war auch rasch klar, was das Geheimnis des leichten Lüftleins sein sollte: ein Wirbel. Die Strömungsführung erzeugt einen Minitornado. Dieser wirbelt entlang der Arbeitsachse der Optik und lenkt die Spritzer seitlich nach unten ab. Bergmann & Steffen taufen ihr neues Produkt folgerichtig „Tornadoblade“. Und weil der Abstand zwischen Optik und Werkstück recht groß ist, reichen gerade einmal 0,3 Bar aus, um den Schmauch abzulenken.

GUTER NACHBAR „Mit dem Tornado stellen wir sicher, dass der Laserstrahl stets in einer sauberen Umgebung arbeitet. Die Schweißergebnisse sind optimiert und auch die Bearbeitungsgeschwindigkeit konnten wir erhöhen, weil der Luftwirbel den Arbeitsstrahl umschließt und so jede Bewegung der Optik mitmacht“, erläutert Bergmann die Vorteile des Tornados, der auf alle TRUMPF Scanneroptiken passt und sich auch nachrüsten lässt. Zusätzlich verlängert er die Lebensdauer der Schutzgläser deutlich. Ach ja, und ohne es zu beabsichtigen, hat er auch gleich das Schmauchproblem für die Nachbaroptiken gelöst. Ihr Arbeitsbereich bleibt dank Tornado ebenfalls schmauchfrei. ■

Kontakt: Bergmann & Steffen GmbH, Uwe Bergmann, Geschäftsführer, Telefon: +49 5225 8786-15, u.bergmann@bergmann-steffen.de

Die kreisförmige Düse um die Optik erzeugt einen tornadoartigen Luftwirbel, der den Arbeitsstrahl umschließt. Er hält Dampf und Spritzer von der Optik fern und sorgt für einen schnellen, sauberen Schweißprozess.



Uwe Bergmann, Geschäftsführer des nordrhein-westfälischen Anlagenbauers Steffen & Bergmann, ist einer der Pioniere des Remote-Schweißens.



Bergmann & Steffen

stattet Automobilzulieferer mit Remote-Schweißmaschinen aus. Diese Anlage schweißt Sitzkonstruktionen und ist einer der Bestseller.

„Da kommt einiges an Druckluftkosten zusammen. Ich war der Ansicht, dass man mit weniger Aufwand bessere Ergebnisse erzielen kann.“

Uwe Bergmann, Geschäftsführer

Prof. Jörg
Wrachtrup will mehr
Quantenmechanik
im Maschinenbau.
Hier spricht er
über ultragenauere
Sensoren und die
Verbindung von Hirn
und Maschine.

„Ich habe mich an das Unmögliche gewöhnt“



Tobias Gerber / Fraunhofer



In echt kann ein
Physiker nicht an
mehreren Orten
gleichzeitig sein.
Seine Quanten aber
schon. Und das
revolutioniert jetzt
die Sensorik.



Herr Wrachtrup, verstehen Sie die Quantenphysik?

Sagen wir so, ich habe mich an sie gewöhnt. Denn sie ist Teil meiner Alltagserfahrung: Ich beobachte quantenphysikalische Phänomene in meiner Arbeit, indem ich sie Experimenten unterziehe. Ich weiß daher zum Beispiel, dass das Prinzip der Lokalität in der Quantenphysik nicht existiert. Heißt: Ich sitze jetzt hier auf meinem Stuhl. Für Quanten gilt das nicht, die sitzen zur selben Zeit auf mehreren Stühlen. Unsere Modelle sagen das voraus, wir messen es mit höchster Genauigkeit. Kurz: Die Natur ist halt so. Das verstehe ich. Und jetzt bauen wir mit diesem Wissen Sensoren für Maschinen.

Was für Sensoren?

Hochempfindliche Sensoren. Selbst bei den feinsten nanoskopischen Sensoren gehen die Signale irgendwann in thermischem oder technischem Rauschen unter. Mit Quantensensoren jedoch können Sie sogar den magnetischen Moment eines einzelnen Elektrons nachweisen – so hoch ist die Empfindlichkeit! Technisch nutzen wir dafür einzelne atomare Defekte in Diamanten, zum Beispiel das sogenannte Stickstofffehlstellenzentrum. Das sind, einfach gesagt, einzelne Stickstoffatome, gefangen in einem Gitter aus reinem Kohlenstoff. Mit einem

gut kontrollierten Laserlicht kann man Quantenzustände, wie etwa den Spin, optisch auslesen – und zwar bei Raumtemperatur. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf umgebende Magnetfelder ziehen. Damit können zum Beispiel die Magnetresonanztomografie, die autonome Navigation oder die neuro-magnetische Prothesen-Steuerung verbessert werden.

Was bietet die Quantenphysik dem Maschinenbau?

Ein vollkommen neues Konzept, Größen ultragenau zu bestimmen. Ich sage bewusst ganz allgemein „Größen“, denn das geht von der Temperatur über elektrische oder magnetische Felder bis zur Positionsbestimmung – alles Mögliche! Maschinenbauer wollen ja immer wissen: Wo ist jetzt der Roboterarm, wie verhalten zwei Maschinenteile sich zueinander? Seit Jahren wachsen im Maschinenbau die Anforderungen an die Exaktheit der Bestimmung von Abstand, Länge oder Position. Denken Sie nur an die EUV-Lithografie zur Mikrochipherstellung, mit der sich wenige Nanometer große Schaltkreisstrukturen herstellen lassen. Künftig wird sich bei solchen Skalen immer öfter die Frage stellen: Finde ich überhaupt noch ein klassisches technisches Mittel, um diese Präzision zu

„Technische Geräte per Hirnstrom bedienen – ist Ihnen das revolutionär genug?“

erreichen? Und immer öfter lautet die Antwort: Nein, das erfordert einen Quantensensor.

Ist Ihr Quantensensor jetzt eigentlich einfach nur ein besserer Sensor oder ein revolutionärer Ansatz?

Sie fragen das ja gerade so, als wäre es leicht, beides voneinander zu unterscheiden!

Etwas nicht?

Ganz und gar nicht. Manchmal erlaubt ein besserer Sensor etwas bis dato fundamental Unmögliches. Ich gebe Ihnen ein Beispiel. Derzeit arbeiten wir unter anderem mit dem Quantentechnologieunternehmen Q.ANT zusammen an einem tragbaren Sensor, der Gehirnmagnetfelder messen kann. Magnetfeldsensoren gibt

es schon lange, aber halt riesige, nicht besonders robuste und, was die Messgenauigkeit betrifft, verhältnismäßig unempfindliche. So gesehen wäre unser Sensor einfach „nur“ ein besserer. Aber die Konsequenzen sind enorm: Denn er ermöglicht es, Menschen und Maschinen zu verbinden! Plötzlich können Sie kognitive Prozesse verfolgen und zur Steuerung nutzen. Die Leute könnten per Hirnstrom mit ihren Prothesen kommunizieren oder andere komplexe technische Geräte bedienen. Klingt Ihnen das revolutionär genug?

Absolut! Und ist das alles? Oder wird es noch mehr geben?

Aber ja, ganz neue Anwendungsfälle. Kollegen von mir arbeiten gerade an Sensoren, die sehr genau das Gravitationsfeld der Erde vermessen.

Wozu braucht man das?

Nun, damit können Sie die Masseverteilung unter ihren Füßen herausfinden und daraus schließen, was sich dort wo befindet: Gestein, Höhlen, Metall, generell die geografische Beschaffenheit. Denken Sie etwa an die Bewertung von Baugrundstücken oder die Navigation von U-Booten in dunkler Tiefsee.

Wie kamen Sie auf die Idee, Quantensensoren zu entwickeln?



Jörg Wrachtrup ist Professor für Physik an der Universität Stuttgart und Fellow am Max-Planck-Institut für Festkörperphysik. Bekannt ist er in der Szene vor allem für seine Arbeiten zu Diamant-Quantensensoren. Wrachtrup ist einer der meistzitierten Physiker der Gegenwart.



Wir in der Wissenschaft denken, glaube ich, genau andersherum als Ingenieure. Ein Maschinenbauer denkt sich: „Ich muss das hier positionieren mit der Genauigkeit von einem Mikrometer. Was für Sensoren gibt es denn da und was kosten die?“ Wir fragen uns eher: „Wie weit können wir einen Quantenzustand ausnutzen? Wie nahe können wir uns an eine prinzipielle Genauigkeitsgrenze heranrobben?“ Ich gebe auch

gerne zu, dass ich als Forscher immer zuerst wissenschaftliche Anwendungen im Kopf habe. Im Grunde bauen wir die Sensoren für uns selbst. Wir benutzen sie etwa, um vollkommen neue Materialien zu untersuchen. Und dann kommt man auf die Idee: „Okay, das könnte man jetzt auch benutzen, um Gehirnmagnetfelder oder Partikel genauer zu messen.“ Spätestens jetzt braucht man einen Partner aus dem Maschinenbau.

Dann sind Sie also so eine Art Schnittstelle zwischen Forschung und Anwendung?

Ja, schon. Besonders in den letzten Jahren arbeiteten wir eng mit kleinen und mittleren Unternehmen zusammen, gaben Ideen und halfen, Demonstratoren zu entwickeln. Steht der Demonstrator, lassen wir das Projekt nach und nach los. Für Quantenphysiker-Verhältnisse sind das

schon ziemlich konkrete, anwendungsnahe Aufgaben.

Wie kamen Sie eigentlich zur Quantenphysik?

Ich glaube, jeder Physiker ist fasziniert von der Quantenphysik, weil sich die Natur auf dieser Skala einfach nicht mehr so verhält, wie wir es gewohnt sind. Wie gesagt, habe ich mich mittlerweile an das Unmögliche gewöhnt. Manche Postulate aus der Theorie – von Niels Bohr und anderen – klingen sogar so verrückt, dass manche sie lange als theoretische Konstrukte abtaten, reine Gedankenspiele. Ich wollte und will diesen Postulaten im Labor nachgehen und die Phänomene experimentell sichtbar machen. Wo sind die Grenzen dessen, was wir als Annahmen haben? Und wie müssen wir unsere Modellvorstellung erweitern? Das sind meine Fragen.

Haben Sie Antworten gefunden?

Viele! Ich bin froh, auf reichlich Heureka-Momente zurückblicken zu dürfen. Es ist wie beim Bergsteigen: Wenn man einen Gipfelpunkt erreicht, sieht man den nächsthöheren und will auf den auch noch drauf. Und jetzt münden unsere Experimente der letzten 20 Jahre in praktische Anwendungen wie den Quantensensor – klasse! ■

HINDENBURG'SCHE DISSONANZ

WARUM SICH AUCH WASSERSTOFF SOZIALPSYCHOLOGISCHEN THEORIEN BEUGT UND DER LASER HEUTE MAL IM RUHEMODUS BLEIBT.

Wasserstoff hat in seiner Karriere als chemisches Wunder-Element schon einige Auf- und Abs hinter sich. Der Hype um das „in seine Elementarteile zerlegte Wasser“ als Energieträger begann schon im 19. Jahrhundert mit dem Science-Fiction-Autor Jules Verne (siehe auch Seite 18). Dass im Wasserstoff eine mächtige Energie steckt, führte der brennende Zeppelin „Hindenburg“ der Welt 1937 leidend vor Augen, als er kurz vor seiner Landung in Lakehurst, New Jersey, in wenigen Sekunden in einem Inferno niederging. Das Luftschiff war mit Wasserstoff gefüllt.

Spüren Sie jetzt auch eine gewisse Dissonanz? So viel Hoffnung und Anstrengung in Wasserstoff, nur um festzustellen, dass das Ergebnis den Erwartungen nicht gerecht wird! Der US-Sozialpsychologe Leon Festinger prägte 1957 hierfür den Begriff der kognitiven Dissonanz – ein als unangenehm empfundener Gefühlszustand. Die fatale Katastrophe der „Hindenburg“, deren Fotografie spätestens 1969 als Albumcover der britischen Rockband *Led Zeppelin* ihren Weg in die Popkultur fand, bedeutete das Ende der Luftschiffahrt, nicht aber das Ende der Träume vom Wasserstoff. Denn Dissonanzen lassen sich auflösen, etwa indem wir – um in unserem Beispiel zu bleiben – die Gründe für die Katastrophe auf andere Ursachen zurückführen. Ob die

„Hindenburg“ aufgrund eines technischen Defekts, eines Zufalls oder einer Sabotage in Flammen aufging, ist nicht abschließend geklärt.

Mehr denn je steht Wasserstoff heute wieder – oder noch immer – im Fokus: ob als Antriebsalternative zum klassischen E-Auto oder als Speicher regenerativer Energien im Kontext der Energiewende. Kognitive Dissonanzen stellen sich aber weiterhin ein. Denn Wasserstoff wird derzeit zum Großteil noch aus fossilen Brennstoffen gewonnen – und hat somit keine allzu gute Klimabilanz. Diese Dissonanz lösen wir, indem wir den Widerspruch ein Stück weit herunterspielen und auf das Potenzial und die glorreiche Zukunft des Wasserstoffs verweisen. Elon Musk übrigens, der Tesla-Pionier, dürfte vor einigen Jahren auch eine Dissonanz gespürt haben zwischen seinem Traum von der Elektromobilität und der „alten“ Automobilwelt. Er löst seine Dissonanz heute auf, indem er die Realität um ihn herum an seinen Traum anpasst.

Dass es in dieser Kolumne keinen direkten Bezug zum Werkzeug Laser gibt, ist meine ganz persönliche kognitive Dissonanz. Ich fühle mich ein bisschen unwohl. Und wie löse ich diese Dissonanz auf? Ich leugne sie einfach! Wer sagt denn, dass es hier jedes Mal um den Laser gehen muss? ■



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

➔ Bei welcher Technologie haben Sie schon einmal eine Dissonanz verspürt?
Schreiben Sie an: athanassios.kaliudis@trumpf.com

WO STECKT DER LASER?

Im Edelwhisky. Wenn Sie mal nicht wissen, wohin mit all Ihrem Geld: Warum nicht eine Flasche seltenen Whiskys für eine Million Euro kaufen? Entweder zum Genießen oder als eigenwillige Anlage. Aber Achtung: Fälschungen im Umlauf! Woher soll man wissen, dass tatsächlich drin ist, was auf dem Etikett steht? Forscher der University of St. Andrews in Schottland – wo sonst? – bringen dafür die Raman-Laserspektroskopie in Anschlag.

Der Laserstrahl schießt durch die ungeöffnete Flasche, die Moleküle der Flüssigkeit streuen das Licht mit veränderter Wellenlänge zurück, die Verzerrungen durch das Flaschenglas werden rausgerechnet. Jeder Edelwhisky hat in den Datenbanken der Forscher ein charakteristisches Profil, einen Fingerabdruck sozusagen. Und daher ist in Sekunden klar, ob Perle oder Plörre. Ob der Whisky schmeckt, wissen Sie dann aber immer noch nicht. ■

230 000 000
VON KILOMETER
ZU HAUSE

Das Namensschild des Marsrovers Perseverance wurde mit einem TRUMPF Laser geschrieben. Damit zählt es zu den am weitesten von Ditzingen entfernten Werkstücken. Zumindest, soweit wir wissen. Werden unsere Nachnachsen es eines Tages in einem Mars-Museum besichtigen?

TRUMPF



LASERCOMMUNITY.33 erscheint im Herbst 2021.

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