

Fraunhofer

Das Magazin für Menschen, die Zukunft gestalten

3 | 25

**Kreislauf-
wirtschaft**
Wie wir
Rohstoffe
im Fluss
halten



Prof. Michael Hudecek,
Fraunhofer IZI



Tür auf!

Neue Wege
für die Medizin



Bomben-Gefahr
Fraunhofer-Software
hilft beim Entschärfen

Cyberkriminalität
Suche nach Sicherheit wird
zum Risiko für Forschende



ER BRACHTE DIE
GESTIRNE
NÄHER

JOSEPH VON
FRAUNHOFER
1787–1826

Jubiläumsjahr 2026

Joseph von Fraunhofer gilt als Begründer der deutschen Präzisionsoptik und verband wissenschaftliche Methodik mit einem sehr erfolgreichen Unternehmertum. Den 200. Todestag ihres Namensgebers wird die Fraunhofer-Gesellschaft 2026 feierlich würdigen. Fraunhofers Grab trug die Inschrift: »Approximavit sidera« (Er brachte die Gestirne näher).

Editorial

Hightech-Transfer ist unser Kerngeschäft

Von Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka

Es ist ein Zufall, aber es ist ein richtungsweisender Zufall, dass sich zwei Entwicklungslinien in dieser einen Woche schneiden. Aus Stuttgart vermeldet Mercedes-Benz einen Gewinneinbruch um 50 Prozent. 95,9 Prozent weniger Gewinn heißt es beim Nachbarn Porsche. In Wolfsburg muss fürs dritte Quartal von Volkswagen ein Verlust von mehr als einer Milliarde Euro verkraftet werden. Das ist die eine, die eher deprimierende Seite dieser Woche. Die andere ist die inspirierende: Die »Hightech Agenda Deutschland« hat Fahrt aufgenommen. »Mit Technologie die Wirtschaft retten?«, wirft die ARD-Tagesschau nach der Auftaktveranstaltung mit 500 Gästen im Berliner Gasometer die Frage auf. Lassen Sie mich die Antwort geben: Womit denn sonst?

Die Schlagworte kennen wir. Technologieoffenheit. Mut zum Risiko. Beschleunigung statt Bürokratie. Lassen Sie uns aus den Worten den Weg in die Zukunft bauen. Unserer Leistungsfähigkeit können wir vertrauen. Deutschland ist Europas Innovationsmotor. Fast ein Drittel aller europäischen Patente mit Beteiligung öffentlicher Forschung stammt aus deutschen Instituten. Gerade hat eine aktuelle Studie des Europäischen Patentamts die Patentanmeldungen von 2001 bis 2020 ausgewertet. Sie attestiert Fraunhofer eine herausragende Rolle: Von den 18 276 Anmeldungen kamen 7852 – und damit 42 Prozent – aus der Fraunhofer-Gesellschaft.

Ängstliche Blicke auf die globalen Umbrüche, sorgenvolles Schielen auf die internationale Konkurrenz, rühselige Rückschau auf vielleicht einfachere Zeiten: All das wird Deutschland und Europa aus keiner Krise helfen. Ganz anders die »Hightech Agenda«. Geplante Investitionen von mindestens 18 Milliarden Euro sind ein kraftvolles Signal zum Aufbruch. Sechs Schlüsseltechnologien sind dabei als Ziele definiert: Künstliche Intelligenz, Quantentechnologie, Mikroelektronik, Biotechnologie, Kernfusion und klimaneutrale Energieerzeugung, Technologien für klimaneutrale Mobilität. Nun gilt es, mit einem klaren Konzept Innovationen in messbare Wertschöpfung umzuwandeln.



Prof. Dr.-Ing.
Holger Hanselka

Mit ihrem Verständnis für den Markt ist die Fraunhofer-Gesellschaft dafür der ideale Partner. Das ist nicht nur Anspruch. Es ist Tradition. Und es ist gelebte Praxis. Mit ihrer Alleinstellung im Wissenschaftssystem konzentriert sich Fraunhofer genau darauf, exzellente Forschung in die Anwendung zu bringen. Nach unserem einzigartigen Fraunhofer-Modell erwirtschaften wir mindestens zwei Drittel unserer Mittel im Wettbewerb selbst. Dank der herausragenden Leistungen unserer 75 Forschungsinstitute ist es der Fraunhofer-Gesellschaft gelungen, auch in konjunkturell schwierigen Zeiten die Wirtschaftserträge zu steigern.

Technologietransfer ist unser Kerngeschäft. Hinzu kommt: Fraunhofer deckt bereits heute mit ihrer Forschungsarbeit alle in der »Hightech Agenda« definierten Schlüsseltechnologien ab. Fraunhofer liefert aus einer Hand. Wirtschaft plus Wissenschaft: Nutzen wir gemeinsam das Startsignal der »Hightech Agenda Deutschland« zum Aufbruch. Jetzt ist der Moment, um unsere Stärken zu bündeln.

Ich freue mich auf unsere Zukunft.

Ihr


Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft

Inhalt



10 **Circular Economy** *Damit es rund läuft*

Jan Luca Twardzik verbessert am Fraunhofer IEM die Kreislauf-fähigkeit von Elektrogeräten.



26 **Arbeiten in der Grauzone**

Das Thema Cybersicherheit birgt viele Unsicherheitsfaktoren für die Forschung. Was ist erlaubt? Was nicht? Und: Was lässt sich verbessern?

03 Editorial

06 Kurz gemeldet

09 Impressum

10 Zurück auf Anfang

Rohstoffe im Dauerlauf halten mithilfe von zirkulärem Design, digitalem Material-Know-how und biobasierten Werkstoffen

24 Schredder oder zweites Leben?

Elektromobilität: Neue Ansätze für das Recycling von Batterien

26 Wenn Forschen strafbar wird

Simulierte Gerichtsverfahren sollen die Rechtssicherheit für die Wissenschaft erhöhen



36 **Titelthema**

Türöffner für die Praxis

Forschende wie Dr. Kathrin Held vom Fraunhofer ITMP bringen medizinische Innovationen in die Anwendung.

38 »CAR-T-Zellen spüren Tumore im ganzen Körper auf«

Ein Interview mit Prof. Michael Hudecek, Mitentwickler der CAR-T-Zelltherapie

42 Die industrielle Revolution für die Krebstherapie

Eine hochautomatisierte Laborplattform steigert das Tempo der Produktion von CAR-T-Zellen

44 Der ewige Kampf gegen die weiße Pest

Neue Ansätze gegen Tuberkulose

48 Schonender Blick auf den Tumor

Radar als smarte Ergänzung für die Röntgen-technologie

50 Next Level in der Krebsdiagnostik

Frühzeitig erkennen: Forschende entwickeln Bluttest für Pankreaskarzinom

53 Blutvergiftung überleben

Sepsis detektieren durch KI-gestützte Sensorik

Kurz gemeldet

Der SUPAWheel soll bald mit recyceltem Aluminium rollen.



Felge der Zukunft: Aluminium neu gedacht

Leicht und nicht korrosiv: Die Automobilindustrie setzt längst auf Aluminium- statt Stahlfelgen. Doch deren Produktion verursacht hohe CO₂-Emissionen. Forschende des Fraunhofer-Instituts für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGGV arbeiten nun im Projekt SUPA-Wheel daran, den Anteil von recyceltem Aluminium auf mindestens 30 Prozent zu erhöhen. Ziel ist es, alte Felgen wiederzuverwerten und so Material sowie Kosten zu sparen: Die Herstellung von recyceltem Aluminium benötigt nur sieben Prozent der Energie, die zur Produktion von Primäraluminium eingesetzt werden muss.

Herausforderung dabei: »Verunreinigungen können die Festigkeit und Langlebigkeit der Felgen beeinträchtigen«, so Robert Kleinhans, Forscher am Fraunhofer IGGV. »Daher ist es entscheidend, die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Elementen in der Legierung genau zu analysieren. Nur so können wir sicherstellen, dass die Eigenschaften der Felgen den hohen Qualitätsstandards der Automobilindustrie gerecht werden.« Eine neu entwickelte Matrix hilft, Legierungen zu identifizieren, die nachhaltig sind und optimale Eigenschaften aufweisen. Für die Methodik wurde bereits ein Patent beantragt. ■

Bilder statt Banner: Datenschutzhinweise besser verstehen

Datenschutzbanner im Internet mit langen, umständlich formulierten Texten werden häufig einfach weggeklickt. Echtzeit-Feedback und eine ansprechende Bildsprache sorgen dafür, dass sie besser verstanden und wahrgenommen werden, haben Forschende des Nationalen Cybersicherheitsforschungszentrums ATHENE der Fraunhofer-Gesellschaft jetzt in einer Studie gemeinsam mit der ETH Zürich herausgefunden. Dafür befragten die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen rund 400 Personen. Das Ergebnis: Die Studienteilnehmer und -teilnehmerinnen begriffen die bebilderten Datenschutzerklärungen nicht nur schneller, sondern empfanden sie auch als angenehmer – insbesondere, wenn ihnen mithilfe von Bildern und Symbolen auch sofort eine Rückmeldung über ihre Datenschutzenscheidung gegeben wurde. So wird eine informierte Einwilligung in die Verarbeitung persönlicher Daten, wie sie die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) eigentlich vorsieht, leichter möglich. ■

Risiken lassen sich mithilfe von Symbolen schneller vermitteln.



Flächen nutzen: Solarstrom aus der Landwirtschaft

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE hat in mehreren Studien das Potenzial für Agri-Photovoltaik (Agri-PV) in Deutschland untersucht. »Es ist die erste Studie in Deutschland, die für die Identifikation geeigneter Standorte alle Arten landwirtschaftlicher Flächen betrachtet, also Dauergrünland, Ackerfläche und Dauerkulturen wie Obstbau, Wein oder Beeren«, erklärt Studienautorin Salome Hauger. Allein auf den geeigneten Flächen könnten bis zu 500 Gigawatt Peak Solarleistung installiert werden, was Deutschlands Ausbauziele für 2040 übertrifft. Zwei Szenarien zur Flächenbewertung zeigen, dass je nach Ausschlusskriterien sogar bis zu 7900 Gigawatt Peak möglich sind. »Diese Studien liefern eine solide



Doppelter Gewinn:
Die PV-Module
schützen auch
vor Hagel.

Datengrundlage für politische Entscheidungsträger und Interessengruppen, um den Ausbau der erneuerbaren Energien zu fördern und zur Erreichung der Klimaziele beizutragen«, betont Anna Heimsath, Abteilungsleiterin Analyse Module und Kraftwerke am Fraunhofer ISE. ■

Altholz: Vom Reststoff zum Rohstoff

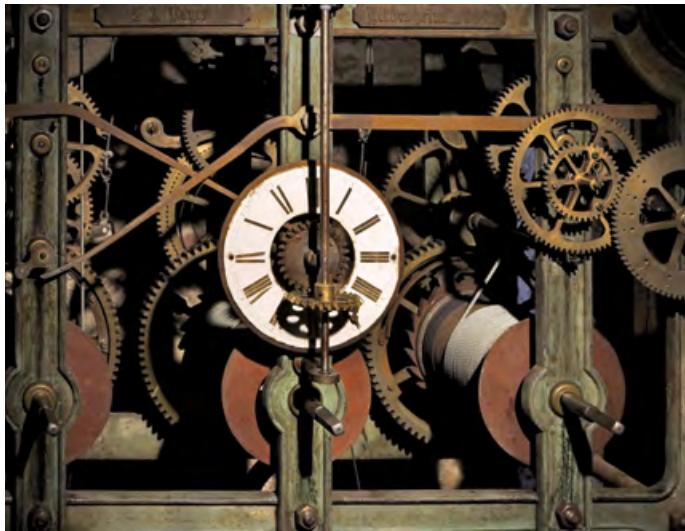


Mehr Recycling könnte den Bedarf an Frischholz deutlich senken und Ressourcen schonen.

Ein innovatives chemisches Verfahren, mit dem sich alte Spanholzplatten vollständig recyceln lassen, hat ein Forschungsteam am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam gemeinsam mit Part-

nern entwickelt. Die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen behandeln das zerkleinerte Holz gebrauchter Möbel oder Bauteile in einem neuartigen Prozess mit einem sogenannten Recyclingagenz – einem eigens entwi-

ckelten chemischen Mittel, das die verwendeten Klebstoffe teilweise löst und reaktiviert. Anschließend pressen die Forschenden aus der Holzmasse neue, formstabile Platten. Das Recyclingagenz lässt sich zu etwa 95 Prozent zurückgewinnen und kann mehrfach eingesetzt werden, ohne an Wirksamkeit zu verlieren. Dieser chemische Prozess wurde bereits erfolgreich in den Technikumsmaßstab übertragen. Die Verarbeitung des recycelten Materials kann auf herkömmlichen Anlagen erfolgen. Das entwickelte Verfahren eignet sich insbesondere für die Produktion von Holzwerkstoffen im Bauwesen sowie für die Fertigung von Möbeln. ■



Das historische Turmuhrwerk aus dem Fundus der SKD blieb dank des sanften Reinigungsverfahrens intakt.

Restaurieren leicht gemacht

Rost, Moose oder Schimmelpilze gefährden Kulturgüter aus Metall und Holz. Mithilfe eines innovativen Vakuum-Saugstrahlverfahrens können sie jetzt schonend, schnell und umweltfreundlich gereinigt werden. Entwickelt haben es Forschende des Fraunhofer-Instituts für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP in Kooperation mit den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden (SKD). Gefördert wurde das Projekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Bei dem neuen Verfahren erfolgt die Reinigung in einer geschlossenen Kammer. Die Forschenden testeten einen präzisen Vakuum-Saugstrahl mit speziellen Düsenformen und Sensorik, die eine detaillierte Kontrolle der Bearbeitungsstelle ermöglicht. Zudem kommt der innovative Saugstrahl ohne sonst übliche Chemikalien aus. Das schützt Restauratoren vor gesundheitsschädlichen Rückständen und ist außerdem nachhaltig, denn das Strahlgut wird gesammelt, gereinigt und wieder in den Prozess zurückgeführt.

Die herkömmliche Reinigung der oft fragilen, historisch gewachsenen Oberflächen ist bisher sehr zeitaufwendig. Die Patina darf nicht verletzt oder zerstört werden, denn sie erzählt die Geschichte der Objekte und ist einzigartiger, individueller Bestandteil des Kulturguts. ■

Unterwasseranalyse mit autonomer Wasserdrohne

Präziser Blick unter die Flussoberfläche: Das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB hat mit der Bezirksregierung Düsseldorf die Ruhr vermessen. Erstmals kam dabei eine autonome Wasserdrohne zum Einsatz, die komplett selbstständig hochauflösende Daten aus einem sechs Kilometer langen Abschnitt erfasste. Die zwei Meter lange Drohne ist besonders geeignet für flache Gewässer und minimiert die ökologische Belastung. Sie vermisst mit Sonar- und optischen Sensoren das Höhenrelief unter und über der Wasseroberfläche. Das Gerät lieferte detaillierte Einblicke in die Unterwasserwelt der Ruhr und unterstützt so bei der Gewässerunterhaltung oder bei Berechnung von Hochwasserereignissen.

»Mit der Idee, Gewässer mittels einer leichtgewichtigen, unbemannten Plattform möglichst vollautomatisch zu vermessen, haben wir bewusst Neuland betreten«, sagt Projektleiter Dr.-Ing. Janko Petereit. Das Fraunhofer-Team will nun in weiteren Pilotprojekten die Technologie optimieren. ■



Die batteriebetriebene
Drohne kann selbstständig
Hindernissen ausweichen.

Impressum

Fraunhofer. Das Magazin,
Zeitschrift für Forschung,
Technik und Innovation.
ISSN 1868-3428 (Printausgabe)
ISSN 1868-3436 (Internetausgabe)

Herausgeber:

Fraunhofer-Gesellschaft
Hansastraße 27c, 80686 München
Redaktionsanschrift wie Herausgeber
Telefon +49 89 1205-1301
magazin@zv.fraunhofer.de
www.fraunhofer.de/magazin

Kostenloses Abonnement:

Telefon +49 89 1205-1301
publikationen@fraunhofer.de

Redaktion:

Monika Landgraf (V.i.S.d.P.),
Josef Oskar Seitz (Chefredaktion),
Dr. Sonja Endres, Beate Strobel

Redaktionelle Mitarbeit:

Dr. Janine van Ackeren, Meike Grewe,
Sirk Henning, Andrea Kaufmann,
Laura Rottensteiner-Wick, Kathrin
Schwarze-Reiter, Mehmet Toprak,
Yvonne Weiß

Layout + Litho:

Vierthaler & Braun

**Fotografie der Titelstrecke und
Rückseite Umschlag:** Sven Döring

Titelbild und Fotografie

»Medizinische Innovationen«:
Simon Koy

Druck:

be1druckt GmbH, Nürnberg

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
München 2025

Fraunhofer in Social Media:

 @Fraunhofer

 www.facebook.com/
fraunhoferde

 www.instagram.com/
fraunhofergesellschaft

 www.linkedin.com/company/
fraunhofer-gesellschaft

 www.youtube.com/
fraunhofer

 Druckprodukt mit finanziellem
Klimabeitrag
ClimatePartner.com/11586-2411-1002

 **MIX**
Papier | Fördert
gute Waldnutzung
FSC® C022647

Im Winter über-
lebenswichtig:
Enteisung am Boden
und in der Luft.



Nachhaltiger fliegen

Vereiste Tragflächen reduzieren den Auftrieb, erhöhen den Luftwiderstand und beeinträchtigen die Manövriertfähigkeit. Eine innovative Fraunhofer-Technologie löst das Eis energiesparend und effizient.

Um die Tragflächen eisfrei zu halten, sind Flugzeuge mit thermischen Systemen ausgestattet, die heiße Luft aus den Triebwerken abzapfen und an die Oberfläche der Flügel leiten. Das Verfahren benötigt viel Energie und verschlechtert außerdem den Wirkungsgrad der Triebwerke.

Im Projekt »Clean Aviation« haben Fraunhofer-Forschende gemeinsam mit Partnern eine wesentlich energiesparende Methode entwickelt: Die vereiste Partie des Flugzeugflügels wird in Schwingungen versetzt, wodurch sich die gefrorene Schicht löst.

Im ersten Schritt melden Sensoren, dass die Tragflächen Eis ansetzen. Anschließend wird die Eigenresonanzfrequenz ermittelt, der Frequenzbereich also, bei dem das Material anfängt zu vibrieren. Dann werden piezoelektrische Aktoren aktiv. Sie lösen an den vereisten Stellen gezielt niederfrequente Materialschwingungen aus. »Die Schwingungen bewegen sich im Bereich von wenigen Kilohertz und sind für das bloße Auge nicht sichtbar, aber sehr wirksam. Das anhaftende Eis wird gelöst und fällt ab«, erklärt Denis Becker,

Forscher am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF. Um die Schwingungsfrequenz zu ermitteln, mussten die Forschenden zunächst das hochkomplexe Zusammenspiel unterschiedlichster Faktoren untersuchen, die bei der Eisbildung für die Eigenresonanzfrequenz verantwortlich sind.

»Zu den bestimmenden Faktoren gehören beispielsweise das Material der Tragflächen, die Geschwindigkeit, die Flughöhe, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Dicke der Eisschicht. Daraus berechnen Algorithmen die Frequenz der Eigenresonanz«, erklärt Becker. Da sich die Außenbedingungen während des Flugs fortlaufend ändern, wechselt auch die Resonanzfrequenz. Das Anwachsen oder Schmelzen der Eisschicht hat ebenfalls einen Einfluss. Deshalb liefert die Sensortik ständig neue Messdaten, damit die Elektronik die Aktoren jederzeit mit der angepassten Frequenz ansteuern kann.

Für das Forschungsvorhaben hat das Fraunhofer-Team unter anderem eine Tragfläche in einem speziellen Vereisungs-Windkanal platziert und die Wirkweise der piezoelektrischen Aktoren optimiert. ■

Circular Economy

Zurück auf Anfang

Wie Fraunhofer-Institute mit zirkulärem Design, digitalem Material-Know-how und biobasierten Werkstoffen Rohstoffe im Dauerlauf halten.

Von Kathrin Schwarze-Reiter;
Fotograf: Sven Döring

Feine Nase: Helen Haug vom Fraunhofer IVV prüft im Gaschromatographen, ob recycelte Verpackungen noch gut riechen oder ob sie sogar gesundheitsschädlich sind.





Etwas muffig, fettig, erinnert an Karton«, sagt Helen Haug, während sie ihre Nase an einen Schlauch hält und schnuppert. »Das müsste (E)-2-Nonenal sein, ein Moleköl, das durch Abbauprozesse von Fetten entstehen kann.« Ein paar Sekunden später notiert sie auf ihrem Blatt »käsig, schweißig« – vermutlich Buttersäure, die sich durch bakteriellen Stoffwechsel im Abfall bildet. Anschließend schreibt sie »blumig, riecht nach Veilchen« – und tippt auf Beta-Ionon, das oft als Duftstoff in Reinigungsmitteln vorkommt. Zum Schluss wird es ganz übel: Skatol. Ein Stoff, der durch mikrobiellen Abbau beim Verpackungsrecycling entsteht, wenn Lebensmittelreste oder Bioabfälle involviert sind.

Als Snifferin prüft Helen Haug Geruchsstoffe. Am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV in Freising bei München untersucht sie unter anderem Kunststoffrezyklate, also Materialien, die bei der Wiederverwertung von Kunststoffen entstehen – und zwar mit Hilfe der Nase. Der Schlauch, durch den die Geruchsmoleküle strömen, hängt an einem Gaschromatographen: ein analytisches Instrument, das ein Probenextrakt aus recyceltem Kunststoff langsam erhitzt und dann die vorhandenen geruchsaktiven Stoffe in einem Gasstrom an Helen Haugs geschulte Riechzellen schickt. Darin enthalten: Moleküle, die der Kunststoff aus seinem Vorleben mitbringt oder die sich durch den Wiederaufbereitungsprozess erst gebildet haben.

»Geruch ist ganz klar ein Qualitätsfaktor beim Recycling«, sagt die 30-jährige Geruchsforscherin, »vor allem, wenn das Material später wieder als verbraucher-nahe Anwendung zum Einsatz kommen soll.« So ist es eine Herausforderung, den Joghurtbecher technisch stabil und vor allem sicher zu recyceln. Wenn er aber am Ende unangenehm riecht, will niemand daraus essen. Deswegen untersuchen Haug und ihr Team die Gerüche, um die Eigenschaften der Rezyklate zu verbessern. Eini-

ge Stoffe, die beim Recycling entstehen, können sogar gesundheitsschädlich sein. Auch nach denen suchen die Forschenden am Fraunhofer IVV.

Vor einiger Zeit stieß Helen Haugs Kollege Ludwig Gruber auf einen unerwarteten Übeltäter: Burgerpapier. »Eigentlich sah alles harmlos aus«, erinnert sich Gruber, Leiter der Störstoffanalytik am Fraunhofer IVV. »Doch als wir das Papier zusammen mit Wasser erhitzten – so wie es in der Mikrowelle mit einem saftigen Burger wirklich passiert – entstanden plötzlich Fluortelomere.« Diese unscheinbaren Moleküle können sich zu PFAS abbauen, jenen »Ewigkeitschemikalien«, die sich in der Umwelt anreichern, lebertoxisch wirken und im Verdacht stehen, krebserregend zu sein.

»Genau deshalb«, so Gruber, »müssen wir beim Testen von Kunststoffen immer die reale Nutzung im Blick haben: Wie werden sie verwendet? Wo lauern Risiken?«

Grubers Spezialgebiet ist das massenspektrometrische Screening. Das Massenspektrometer ist ein analytisches Gegenstück zu Helen Haugs Sniffer-Port. Moleküle, die nicht mit der Nase wahrnehmbar sind, können mit solchen Detektoren erfasst werden, um sie präzise zu entschlüsseln. Die Moleküle werden zunächst voneinander getrennt. Der angeschlossene Detektor – das Massenspektrometer – legt ihr Innenleben offen: Antioxidantien, UV-Stabilisatoren aus alten Gartenmöbeln, Farbstoffreste aus Verpackungsfolien oder Abbauprodukte aus dem Recyclingprozess. »Die Peaks, die die Analyse zeigt, vergleichen wir mit einer Datenbank aus mehr als 80 000 Substanzen«, sagt Ludwig Gruber. »So können wir teilweise auf unter ein Milliardstel Teile genau bestimmen, was da im Recyclingmaterial steckt.« Zusammen mit den Geruchstests entsteht auf diese Weise ein Doppelporträt jedes Kunststoffs. Diese Kombination macht es möglich, verlässlich zu bewerten, ob ein Rezyklat tatsächlich wieder in hochwertige, sichere Produkte zurückkehren kann.

»Wir müssen beim Testen von Kunststoffen immer die reale Nutzung im Blick haben: Wie werden sie verwendet? Wo lauern Risiken?«

Ludwig Gruber,
Fraunhofer IVV

Der Kreislauf als Zukunftsmodell

Jedes Jahr kommt der Erdüberlastungstag früher. Der Tag, an dem wir die nachwachsenden Ressourcen, die die Erde reproduziert, aufgebraucht haben und ab dem wir auf Pump leben müssen.

Wurde er vor 25 Jahren noch am 23. September gefeiert, war es in diesem Jahr bereits am 24. Juli so weit. Denn die Weltbevölkerung wächst rasant, ihr Rohstoff-Hunger ist unermesslich.

Unser lineares »Nehmen–Nutzen–Wegwerfen«-Modell stößt an seine Grenzen: Natürliche Ressourcen werden knapper, die Müllberge wachsen, und die Herstellung neuer Materialien verursacht enorme CO₂-Emissionen. Laut dem International Resource Panel der Vereinten Nationen gehen rund 90 Prozent des weltweiten Biodiversitätsverlusts und etwa die Hälfte aller Treibhausgasemissionen auf die Gewinnung und Verarbeitung natürlicher Ressourcen zurück.

In der Shampoo-Flasche steckt wertvolles Erdöl, im Smartphone sind Rohstoffe wie Palladium, Tantal, Wolfram oder Dysprosium verbaut. Für Batterien ist Zink, Mangan oder Lithium nötig. Und nicht zuletzt die Bauabfälle: Sie wachsen zum größten Abfallberg in Europa an, in dem Seltene Erden, Stahl, Kupfer oder Naturstein lagern. Genau hier setzt die Circular Economy an: Sie will den Materialeinsatz minimieren, Wertstoffe im Kreislauf halten und den ökologischen Fußabdruck der Industrie massiv senken. Kreislaufwirtschaft ist damit weit mehr als reines Recycling – sie erfordert ein Umdenken in Design, Produktion, Konsum und Politik. Und sie bietet viele Chancen: Laut der Ellen MacArthur Foundation könnten europäische Unternehmen bis ins Jahr 2030 jährlich über 600 Milliarden Euro an Materialkosten durch zirkuläre Prinzipien einsparen.

Die Suche nach dem Joghurtdeckel im Kunststoffabfall

Ein wichtiges Zukunftsthema bei Fraunhofer sind innovative Lösungen für die Kreislaufwirtschaft – von der ressourcenschonenden Produktion über intelligente Sor-

Europäische Unternehmen könnten bis ins Jahr 2030 jährlich über **600 Milliarden Euro** an Materialkosten durch zirkuläre Prinzipien einsparen.

tiertechnik bis hin zu neuen Recyclingverfahren und biobasierten Materialien. Im Projekt Waste4Future bündelten acht Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen, um Kunststoffabfälle besser im Kreislauf zu halten. Das Leitprojekt betrachtete die gesamte Wertschöpfungskette: von der Erfassung und Sortierung über mechanisches und chemisches Recycling sowie lösemittelbasiertes Recycling bis hin zur Bewertung ökologischer und ökonomischer Effekte. Ziel ist es, für unterschiedliche Abfallströme die jeweils beste Recyclingroute zu finden und so ein Modell für eine zukunfts-fähige Kreislaufwirtschaft zu entwickeln.

Einer der Schwerpunkte des Projekts lag auf der Sortierung der Kunststoffabfälle. Fachmann dafür ist Dr.-Ing. Georg Maier, Gruppenleiter für sensorgestützte Sortiersysteme in der Abteilung Sichtprüfsysteme am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB. »Entscheidend ist die Sortenreinheit«, sagt Maier. »Nur wenn die Abfallströme zuverlässig nach Kunststoffsorte getrennt sind, können daraus Materialien entstehen, die den hohen Anforderungen der Industrie genügen.«

Um diese Qualitäten zu erreichen, hat das Team im Rahmen von Waste4Future eine prototypische Sortieranlage aufgebaut, die verschiedene Sensortechnologien testet. Da heutige Recyclinganlagen meist mit Infrarotkameras arbeiten, stoßen sie bei Problemfällen an Grenzen – etwa bei schwarzen oder stark gealterten Kunststoffen. »Das ist, als würde man durch eine Sonnenbrille in ein dunkles Zimmer schauen – da sieht man schlichtweg nichts«, beschreibt es Maier. Mit neuen Verfahren wie der Terahertz-Sensorik lassen sich diese Schwächen überwinden: Schwarze Kunststoffe können hiermit erstmals zuverlässig unterschieden und sauber voneinander getrennt werden.

In ersten Praxistests wies die Sortieranlage des Fraunhofer IOSB nach, dass sich selbst schwer unterscheidbare Materialien wie schwarzes Polypropylen und schwarzes Polyethylen auseinanderhalten lassen – beides Kunststoffe, die in der Automobilindustrie häufig eingesetzt werden. Bislang landeten diese nach dem Recycling ►



Die Guten ins Töpfchen:

Dr.-Ing. Georg Maier vom Fraunhofer IOSB trennt im Projekt Waste4Future mit einer Sortieranlage Kunststoffe besser voneinander – erstmals auch schwarze und stark gealterte.

oft in minderwertigen Anwendungen, weil sie nicht sortenrein genug waren. »Wenn wir diese Materialien sauber trennen können, lassen sie sich wieder für hochwertige Bauteile nutzen«, sagt Maier. »So können wir mehr wertvolle Rohstoffe in Europa behalten.«

Weniger ist mehr

Wie viel Verpackung ist nötig – und wie wenig ist genug? Diese Frage stellt sich tagtäglich in der Lebensmittelbranche, wo Millionen Joghurtbecher, Folien und Flaschen über die Bänder laufen. Jede Verpackung hat gleich mehrere Aufgaben: Sie schützt das Produkt vor Sauerstoff, Feuchtigkeit, Licht oder Keimen, sorgt für sichere Lagerung und Transport – und darf gleichzeitig nicht zu viel kosten. »Ein Drahtseilakt«, sagt Prof. Marek Hauptmann, Leiter der Abteilung Verpackungs- und Verarbeitungstechnologie am Fraunhofer IVV in Dresden. »Wird die Becherwand zu dünn, reicht die Stabilität für den Transport nicht aus. Ist sie zu dick, verschwenden wir wertvolle Rohstoffe.« Noch schwieriger wird es, wenn die Verpackung recycelt werden soll. Dann landet die Shampooflasche schnell neben dem Joghurtbecher, das Reinigungsmittel läuft über die Lebensmittelreste, und Farbstoffe oder Schimmel schaffen zusätzliche Schwierigkeiten. Lebensmittelverpackungen fallen zum Beispiel in die Sortierfraktion 324, in der strengere Vorgaben gelten als bei anderen Recyclingprodukten.

Zudem können sich beim Recycling durch Hitze neue Substanzen bilden – unerwünschte und im schlimmsten Fall toxische Verbindungen, die aufgespürt werden müssen. Bislang wurde Verpackungsdesign oft nach Bauchgefühl und mit großen Sicherheitsreserven betrieben. Genau dafür bringt das Projekt KIOptiPack Künstliche Intelligenz in die Produktionshallen und wertet Daten aus, die Sensoren direkt an den Verpackungslinien sammeln: Formdrücke, Siegeltemperatur oder die Gasatmosphäre in der Verarbeitung sowie später in der Packung.

»**Jeder Zehntelmillimeter Folie** bedeutet weniger Kunststoff, weniger Energie, weniger Abfall – und das in Millionenauflage.«

Prof. Marek Hauptmann,
Fraunhofer IVV

Algorithmen können daraus Zusammenhänge erkennen und Vorschläge machen, wie Maschinen betrieben werden sollten, um möglichst dünne Folien mit Rezyklatanteil einsetzen zu können. Oder welche Parameter verändert werden müssen, um trotz reduzierten Materials eine stabile Siegelnah zu erzielen. Hauptmann: »Früher sind die Materialeigenschaften konstant gewesen. Heute lernt die Maschine, präzise zu unterscheiden, ohne Kompromisse bei der Sicherheit zu machen.«

Die KI schlägt zukünftig nicht nur Varianten vor, sondern soll sie in Produktionsumgebungen direkt in der Maschinensteuerung umsetzen. So entsteht eine Art adaptive Verpackungstechnologie, die sich dynamisch an Produkte und Bedingungen anpasst. Dadurch lässt sich Verpackungsmaterial einsparen. Hauptmann: »Jeder Zehntelmillimeter Folie bedeutet weniger Kunststoff, weniger Energie, weniger Abfall – und das in Millionenauflage.«

Mehr Kreis statt Linien

Die Kreislaufwirtschaft ist im Kern eigentlich eine alte Idee mit neuem Anspruch. Jahrtausendelang wirtschafteten Menschen in geschlossenen Stoffkreisläufen: Küchenabfälle wurden verfüttert, Materialien repariert oder wiederverwendet, nichts ging verloren. Erst die Industrialisierung brachte das lineare Prinzip von »take, make, waste« – und damit die Wegwerfgesellschaft. In den 1970er-Jahren tauchte die Circular Economy dann wieder auf der wissenschaftlichen Agenda auf.

David W. Pearce griff diese Ansätze Anfang der 1990er-Jahre auf und prägte den Begriff »Circular Economy« explizit als Gegenentwurf zur ressourcenintensiven linearen Wirtschaft. Geändert hat sich seither jedoch wenig: Laut dem Global Circular Economy Report 2024 zirkulieren aktuell nur 7,2 Prozent der weltweiten Materialien in einem geschlossenen Kreislauf. Das ist sogar noch weniger als in den Vorjahren: 2020 lag die Quote bei 8,6 Prozent und 2018 sogar noch bei 9,1 Prozent. Der Rest endet als Abfall. ▶



»Wir wollen Kreislauffähigkeit schon in der Entwicklung mitdenken – nicht erst, wenn das Produkt auf dem Müll landet.«

Jan Luca Twardzik,
Fraunhofer IEM

Hand in Hand mit der Industrie: Jan Luca Twardzik vom Fraunhofer IEM in Paderborn zeigt im Projekt ZirkuPro, wie Elektrogeräte länger im Kreislauf bleiben.





Sortieren mit der Kraft der KI: Am Fraunhofer IIS verbessert Johannes Leisner mit Künstlicher Intelligenz und Digitalen Zwillingen die Sortierung von Kunststoffen.

Diese Entwicklung ist nicht nur ökologisch fatal. Auch wirtschaftlich birgt sie Risiken: Lieferketten werden fragiler, geopolitische Abhängigkeiten nehmen zu – etwa bei Seltenen Erden oder Lithium für Batterien. Die Kreislaufwirtschaft bietet hier eine strategische Antwort: Sie kann den Ressourcenverbrauch entkoppeln von Wachstum und Wohlstand. Die Rahmenbedingungen wurden dafür im Jahr 2020 von der EU mit dem »Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft« verabschiedet; er legt fest, dass die Wiederverwendungsrate in den Mitgliedsstaaten bis 2030 auf 23,2 Prozent steigen soll.

Recycling schon auf dem Zeichentisch mitdenken

Doch was wäre, wenn Produkte von Anfang an so entworfen würden, dass sie sich leicht reparieren, wiederverwenden oder recyceln lassen? Genau das will ZirkuPro, ein Forschungsprojekt des Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn, gemeinsam mit Partnern wie Miele, WAGO und Diebold Nixdorf erreichen. »Viele Produkte sind heute technisch extrem ausgereift, aber am Lebensende ein echtes Problem«, sagt Projektleiter Jan Luca Twardzik. »Wir wollen Kreislauffähigkeit schon in der Entwicklung mitdenken – nicht erst, wenn das Produkt auf dem Müll landet.«

Der Ansatz ist einfach, aber wirksam: 80 Prozent der Umweltauswirkungen eines Produkts werden schon in der Designphase festgelegt. Ob ein Gerät später repariert, wiederverwendet oder recycelt werden kann, hängt also von Entscheidungen ab, die lange vor der Produktion getroffen werden. Deshalb entwickelt ZirkuPro ein Werkzeugset, das Ingenieurinnen und Ingenieuren schon in der frühen Entwicklungsphase zeigt, welche Materialien und Konstruktionsweisen ressourcenschonend sind – und welche später Probleme bereiten könnten. Dabei werden Daten zur CO₂-Bilanz, zum Energieverbrauch, zur Recyclingfähigkeit und zur Reparaturfreundlichkeit direkt in den Entwicklungsprozess eingespeist.

Die Arbeit im Projekt ist praxisnah. Forschung und Industriepartner treffen sich regelmäßig in Workshops

und testen ihre Ideen an echten Produkten – zum Beispiel an einem modernen, vernetzten Backofen, einem Kassensystem, einem Industrie-Touchpanel und einer Komponente für E-Auto-Ladestationen. Anhand solcher Geräte wird geprüft, wie Gehäuse aus recyceltem Aluminium gefertigt, Elektronikmodule standardisiert oder Bauteile so platziert werden können, dass sie leicht zugänglich sind.

Twardzik kennt solche Hürden aus eigener Erfahrung: »Meine Waschmaschine zu Hause stand still, weil zwei Kohlebürsten im Motor abgenutzt waren – Kostenpunkt zwei Euro. Die Reparatur hätte zehn Minuten gedauert, aber um ranzukommen, musste man das ganze Gerät auf den Kopf stellen. Solche Faktoren verhindern, dass repariert wird. Dinge landen im Müll.«

ZirkuPro betrachtet nicht nur die Technik, sondern auch neue Geschäftsmodelle. Denn eine einfache Reparatur nützt wenig, wenn Ersatzteile zu teuer sind oder Rücknahmesysteme fehlen. Das Projekt untersucht daher auch Serviceangebote, Ersatzteilprogramme oder Konzepte zur Wiederaufbereitung. »Ressourcen sind endlich. Wenn wir sie im Kreis halten, gewinnen Unternehmen, Verbraucher – und die Umwelt«, fasst es Twardzik zusammen.

Auch das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA arbeitet daran, Produkte so zu gestalten, dass sie am Ende ihres Lebens nicht zum Problem, sondern zur Ressource werden. Unter dem Schlagwort »Design for Disassembly« entwickeln die Forscherinnen und Forscher in einem Workshop Gestaltungsrichtlinien, die schon in der Entwurfsphase festlegen, wie Geräte oder Bauteile später wieder auseinandergebaut werden können. Schrauben statt Kleber, modulare Bauweisen statt fest verbundener Komponenten – solche Prinzipien erleichtern es, einzelne Teile gezielt auszutauschen, wertvolle Materialien zurückzugewinnen und Komponenten wiederzuverwenden.

Ein digitales Werkzeug, das die Kreislauffähigkeit von Fahrzeugkomponenten schon in der Konzeptphase messbar macht, entsteht am Fraunhofer-Institut für Arbeits-

»Ganze Recyclinganlagen werden virtuell abgebildet und simuliert, dadurch können Sortierprozesse nicht mehr nur auf Erfahrungswissen beruhen, sondern datenbasiert optimiert werden – in Echtzeit.«

Johannes Leisner,
Fraunhofer IIS

wirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart. Im Projekt CYCLOMETRIC wurde ein modellbasiertes Entscheidungstool entwickelt, das zeigt, wie sich Material- und Designentscheidungen auf CO₂-Bilanz, Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit auswirken. Ein Beispiel: die Mittelkonsole eines Autos. Sie kann aus unterschiedlichen Faserverbundstoffen gefertigt werden – verbunden durch Schrauben, Clips oder Klebstoffe. CYCLOMETRIC vergleicht diese Varianten und macht sofort sichtbar, welche Folgen jede Entscheidung für Umweltbilanz und Kosten hat. So wird Nachhaltigkeit direkt in den Entwicklungsprozess integriert. Ein erster Prototyp des digitalen Werkzeugs wurde bereits umgesetzt und soll bald in die industrielle Praxis übertragen werden.

Doch nicht nur im Designprozess, auch im Recycling selbst können digitale Werkzeuge den Unterschied machen. Während CYCLOMETRIC und ZirkuPro Nachhaltigkeit schon am Reißbrett mitdenken, zeigt das Projekt K3I-Cycling, wie Künstliche Intelligenz den Weg von der Wertstofftonne zurück in den Kreislauf optimieren kann. Am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS arbeitet ein Team daran, mit Künstlicher Intelligenz und Digitalen Zwillingen die Sortierung von Kunststoffen zu verbessern. Im Projekt K3I-Cycling haben Forschende eine Systematik entwickelt, die ganze Recyclinganlagen virtuell abbildet und simuliert, wie Sensoren, Maschinen und Materialströme zusammenspielen.

Johannes Leisner vom Fraunhofer IIS erklärt, dass dadurch Sortierprozesse nicht mehr nur auf Erfahrungswissen beruhen, sondern datenbasiert optimiert werden können – in Echtzeit. Mit Hilfe von multimodaler Sensorik, also zum Beispiel Röntgentechnik oder hyperspektraler Bildgebung, erkennen die Algorithmen automatisch das Material, Form, Gewicht und etwaige Fehlwürfe wie Batterien.

KI-gestützte Systeme steuern unterschiedliche Sortiermechanismen wie Klappen und Roboterarme, verteilen Luftstöße, um die unterschiedlichen Kunststoffe präzise voneinander zu trennen. Joghurtbecher nach links, Aluschale nach rechts. Diese Kombination aus Sensorik und Künstlicher Intelligenz ►

Das Ziel:

Kunststoffe so präzise zu trennen, dass sie als hochwertige Rohstoffe wieder in die Industrie zurückkehren können.



Mit Stroh starten: Dr. Antje Lieske vom Fraunhofer IAP hat im Projekt RUBIO gezeigt, dass sich aus Stroh und Pflanzenresten ein leistungsfähiger und klimafreundlicher Kunststoff herstellen lässt.



Einmal hin und wieder zurück:
Dr.-Ing. Marcus Vater wandelt
am Fraunhofer IAP in Schkopau
Plastikabfall in seine ursprüngli-
chen Bausteine um. Dann
beginnt der Kreislauf von vorne.

sorgt dafür, dass Rezyklate in hoher Qualität zurück in den Kreislauf gelangen. Das Ziel: Kunststoffe so präzise zu trennen, dass sie als hochwertige Rohstoffe wieder in die Industrie zurückkehren können – und nicht verbrannt werden müssen.

Im Müll echte Schätze finden

Damit Plastik als Rohstoff wiederverwertet werden kann, beschäftigt sich das Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP im Pilotanlagenzentrum PAZ in Schkopau mit chemischem Recycling. »Wir wandeln Plastikabfall in seine ursprünglichen Bausteine – die Monomere – um und gewinnen diese so zurück«, erklärt Projektleiter Dr.-Ing. Marcus Vater, zuständig für Scale-up und Pilotierung. »Die sauberen Monomere lassen sich zu neuen, hochwertigen Kunststoffen verarbeiten.«

Konkret bedeutet das: In Kooperation mit der Industrie testet Vaters Team Verfahren, um aus Polyestern wie PET – bekannt aus Getränkeflaschen, Textilien oder Folien – wieder Terephthalsäure, das Schlüsselmolekül hinter PET, zu gewinnen. Damit reagiert das Fraunhofer IAP auf steigende gesetzliche Anforderungen – etwa die Vorgabe, dass in PET-Verpackungen künftig bis zu 30 Prozent Rezyklat enthalten sein müssen. »Wir bieten die Technologieplattform dafür«, sagt Vater. »Industriepartner können hier im Pilotmaßstab ausprobieren, ob ihr Verfahren tatsächlich funktioniert – und ob sich das Material wieder in hochwertige Kunststoffprodukte verwandeln lässt.« Dadurch sinkt die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen, Ressourcen werden geschont und die Materialqualität bleibt erhalten. Oder wie es Vater formuliert: »In einer idealen Zukunft ist Plastik kein Müll, sondern Wertstoff – und wird im Jahr 2050 in einem nahezu geschlossenen Kreislauf wiederverwertet.«

Aus Stroh Gold spinnen

Bioplastik aus Stroh und anderen pflanzlichen Reststoffen – das war die Idee von RUBIO. 18 Forschungseinrich-

tungen und Industriepartner haben gezeigt, dass sich aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten ein leistungsfähiger Kunststoff herstellen lässt, der klimafreundlich ist und nicht mit Lebensmitteln konkurriert. Herzstück ist Polybutylensuccinat (PBS): ein biobasiertes, biologisch abbaubares Polymer, das sich wie herkömmlicher Kunststoff verarbeiten lässt – am Ende seines Lebenszyklus aber wieder in natürliche Kreisläufe zurückkehrt.

Das Besondere: RUBIO setzt auf Regionalität statt Import. Stroh oder Rückstände aus der Zuckerproduktion stammen aus heimischer Landwirtschaft. Diese Biomasse wird aufgeschlossen und mithilfe von Mikroorganismen biotechnologisch zu Monomeren umgewandelt. Aus den Monomeren werden am Fraunhofer IAP völlig neuartige PBS-Typen synthetisiert. Der Prozess wurde am Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum PAZ in Schkopau bereits in den 100-Kilogramm-Maßstab übertragen. »Wir

fangen mit Stroh an und enden bei Produkten des alltäglichen Lebens – das ist wie aus Stroh Gold spinnen«, sagt Dr. Antje Lieske vom Fraunhofer IAP. Das vom September 2021 bis August 2024 laufende Projekt ist inzwischen abgeschlossen. Viele der entwickelten Verfahren und Produkte werden in neuen Forschungsvorhaben und Kooperationen fortgeführt.

Entstanden sind erste marktfähige Anwendungen: Verpackungsfolien, recycelbare Monomaterialbeutel, Vliesstoffe für Textilien oder Papierbeschichtungen. Sie hielten den Praxistests in modernen Maschinen stand – von Reißfestigkeit über Barrierewirkung bis zur Verarbeitbarkeit. Der Weg dahin war nicht ohne Hürden: Reinheit der Rohstoffe, Verarbeitungsstabilität, Oberflächenfehler – immer wieder mussten die Forschenden nachjustieren. Doch der Aufwand lohnt: RUBIO hebt den Biokunststoff PBS nicht nur auf ein neues Niveau, vielmehr liefert es auch einen Proof of Concept für die Kreislaufwirtschaft – weniger CO₂, weniger fossile Rohstoffe, mehr regionale Wertschöpfung. Und es zeigt, dass das Potenzial von biobasierten Materialien wächst – wenn Wissenschaft und Industrie eng zusammenarbeiten. ■

»In einer idealen Zukunft ist Plastik kein Müll, sondern Baustein – und wird im Jahr 2050 in einem nahezu geschlossenen Kreislauf wiederverwertet.«

Dr.-Ing. Marcus Vater,
Fraunhofer IAP

Schredder oder zweites Leben?

Je weiter die Elektromobilität voranschreitet, desto drängender das Recycling der Batterien. Eine Entwicklungsanlage soll die vollautomatische Demontage in den Alltag holen – für verschiedene Batteriesysteme und Recyclingansätze.

Von Dr. Janine van Ackeren

Auch wenn die Elektromobilität auf den Straßen in Deutschland momentan eher langsam vorankommt: Die Menge an Altbatterien wird sich in der EU bis 2030 voraussichtlich mehr als verzehnfachen. Trotz einer Restkapazität von 70 bis 80 Prozent werden ausgediente Traktionsbatteriesysteme bislang geschreddert, verbrannt oder maximal auf Rohstoffebene recycelt. Das Bündeln einiger alter Batteriezellen zu großen Speichersystemen für Unternehmen, Privathaushalte oder Stromnetzbetreiber scheitert bisher an der Wirtschaftlichkeit – die Weiternutzung ist aufgrund der teuren Demontage schlachtweg zu teuer. Das soll sich ab Juli 2026 ändern.

Nadelöhr Demontage

Das Forscherteam rund um Dr.-Ing. Rico Schmerler vom Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU setzt auf Automatisierung, um Wirtschaftlichkeit zu erreichen. »Wir bauen gemeinsam mit der EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG eine Entwicklungsanlage, die Batterien per Roboterhand in die einzelnen Komponenten zerlegt und diese mit verschiedenen Analyseverfahren auf ihre weitere Tauglichkeit untersucht – gesteuert von Künstlicher Intelligenz«, erläutert Schmerler. Als Basis für die Entwicklung dienen zwei Beispielbatteriesysteme: ein Hochvoltspeicher aus einem Elektrofahrzeug sowie eine Batterie aus einem elektrischen Nutzfahrzeug. Wenn beide Systeme im Juli erfolgreich zerlegt

werden, geht die Forschungsarbeit in die nächste Runde. Dann soll die Anlage Antworten geben auf eine entscheidende Frage der Industrie: Wie lässt sich die Automatisierung an verschiedene Batterietypen anpassen, damit die Unternehmen sie wirtschaftlich demontieren können?

Roboter plus Analyse plus KI

Optische Kameras sind die Augen der Demontageroboter, KI das Gehirn – denn die Aufgaben sind vielfältig. Zunächst muss die Fahrzeughbatterie geöffnet werden. Der Roboter entfernt den Deckel und widmet sich anschließend den elektrischen Kontaktierungen, um die Gesamtspannung der Batterie zu reduzieren und die Sicherheit zu erhöhen. Auch müssen mechanische Barrieren wie Kabel, Stromschienen und Verbindungen weichen, da sie die weitere Demontage behindern. »Im ersten Schritt geht es darum, die mechanische Zugänglichkeit zu gewähren und Gefahren zu reduzieren«, fasst Schmerler zusammen. Die Bahnplanung für den Roboterarm übernimmt eine Künstliche Intelligenz: Wann muss wo geschraubt, gedrückt, gezogen oder geschnitten werden? Stets überwacht wird auch der Zustand der demontierten und der verbleibenden Komponenten. Während optische Methoden beispielsweise Risse detektieren, wird die Batterie bei der elektrochemischen Impedanzspektroskopie gezielt ge- und entladen, während ihre elektrische Speicherfähigkeit gemessen wird. Ist das verbliebene Batteriepack fit für eine weitere Anwendung, oder befinden

sich zu stark gealterte Zellen darunter, die für einen nachfolgenden Einsatz entfernt werden müssen?

Die Vielzahl der Varianten ist eines der schwierigsten Themen für die Forschenden. »Gefordert sind daher möglichst flexible Werkzeuge, die mit wenigen Wechseln verschiedene Batterien zerlegen können«, verdeutlicht Schmerler. Die Forschenden des Fraunhofer IWU bewerten die am Markt verfügbaren Optionen und wählen passende aus. Die Konstruktion und die finale Umsetzung liegt bei der EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG. Auch Sicherheitsaspekte spielen bei der Planung der Anlage eine wichtige Rolle – etwa die Brandsicherheit. Schmerler: »Würde es zu einem thermischen Durchgehen der Zellen kommen, können wir dies über eine Thermografie-Kamera frühzeitig detektieren. Entwickelt sich zu viel Hitze, bemerken wir dies bereits, bevor es zu einem Brand kommt.«

Gesetzeslage: Hier wird geholfen

Parallel zu den technischen Möglichkeiten, Batterien automatisiert und damit wirtschaftlich zu zerlegen, sind auch zahlreiche Details rund um Gefahrgut und Abfallrecht zu klären. Zwar gibt es Gesetze, die das Batterie-Recycling regeln, doch besteht bei den Formulierungen Interpretationsspielraum. Und: Die wenigsten Firmen haben damit Erfahrung. Auch hier wollen die Forschenden unterstützen und Klarheit schaffen. Mithilfe der Anlage sollen Industriekunden befähigt werden, Batteriezellen und -module optimal im Kreislauf zu halten. ■



In einer Pilotanlage zum Recycling von Batterien will Mercedes-Benz Kobalt, Nickel und Lithium zurückgewinnen.



Wenn Forschen strafbar wird

Personenbezogene Daten sind für Forschende tabu, Verstöße werden strafrechtlich verfolgt – auch mit Escape-Taste gibt es kein Entkommen.

Cybersicherheitsforschende bewegen sich schnell im rechtlichen Graubereich. Was ist erlaubt, was nicht? Simulierte Gerichtsverfahren sollen Klarheit schaffen.

Von Dr. Janine van Ackeren

»Wir brauchen Rechtssicherheit für Cybersicherheitsforschende.«

Dr. Annika Selzer,
Fraunhofer SIT



Es ist der 27. August 2025. Richter, Staatsanwalt und zwei Strafverteidiger sitzen in schwarzen Roben zu Gericht – so weit alles wie gewohnt. Und doch ist bei dieser Verhandlung vieles anders: Auf dem richterlichen Prüfstand steht ein fiktiver Fall, eröffnet mit dem Satz »Aufruf zur Strafsache XX aus Simulationsstadt«. Auch findet die Verhandlung nicht in einem echten Gerichtssaal statt, sondern in den Räumen des Fraunhofer-Instituts für Sichere Informationstechnologie SIT in Darmstadt. Die »Angeklagten« sind Mitarbeitende aus dem Forschungsinstitut. Sie stellen zwei Cybersicherheitsforschende dar, die eine Schwachstelle in der Online-Fotoablage einer Beratungsstelle für Gewaltopfer aufgespürt haben. Die Anklage: Verletzung des höchstpersönlichen Lebensbereichs durch Bildaufnahmen sowie Ausspähen von Daten.

Mit einem Bein im Gefängnis

»Viele Gesetze sind so geschrieben, dass sie für alle Menschen gelten, sie enthalten also keine

spezifischen Regeln nur für Forschende«, erläutert Dr. Annika Selzer, Koordinatorin des Forschungsbereichs »Legal Aspects of Privacy & IT Security« im Nationalen Forschungszentrum für angewandte Cybersicherheit ATHENE, einer Forschungseinrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft. Selzer hat die Gerichtsverhandlung mit ihrem Team organisiert.

Das Problem: Cybersicherheitsforschende nutzen die gleichen Tools und Methoden wie Hacker, wenn auch mit einer gänzlich anderen Motivation. Hacker greifen Unternehmen an, um Daten abzuziehen oder den Zugriff auf Daten zu verhindern und Geld zu erpressen. Cybersicherheitsforschende wollen Schwachstellen aufspüren, um mögliche Gegenmaßnahmen identifizieren und umsetzen zu können und so die Cybersicherheit zu erhöhen. Das Strafrecht zieht hier mitunter keine klare Grenze.

»Wir brauchen Rechtssicherheit für Cybersicherheitsforschende«, fordert Selzer. »Solange sie sich im rechtlichen Graubereich bewegen, sind sie rechtlich angreifbar – bis hin zur Strafverfol-

gung.« Wie hoch ist das Strafmaß, falls ich etwas falsch mache? Würde es sich um eine Freiheits- oder Geldstrafe handeln? Und wer zahlt diese? Solche und ähnliche Fragen lähmen die Forschung im Bereich der Cybersicherheit. Zugleich ist sie nötiger denn je: Die Angriffszahlen auf IT-Infrastrukturen steigen stetig. So verzeichnete allein das Landesamt für Sicherheit in der Informations-technik Bayern im Jahr 2024 rund 5800 verdächtige Aktivitäten gegen bayerische Landesbehörden – mehr als je zuvor. Die Cybersicherheitsbehörde des Bundes schätzt die Lage der Cybersicherheit in Deutschland in ihrem Bericht für 2024 als »besorgniserregend« ein.

Klarer Rechtsrahmen ist unerlässlich

Viele reale Szenarien der Cybersicherheitsforschung sind vom geltenden Recht nicht ausreichend abgedeckt. Beispielsweise geht die Datenschutz-Grundverordnung davon aus, dass stets im Vorfeld einer Datenerhebung bekannt ist, ob



und wenn ja, wann welche personenbezogenen Daten verarbeitet werden. Suchen Forschende im Darknet nach neuen Werkzeugen, mit denen Hacker ihre Angriffe verrichten, ist es jedoch durchaus möglich, dass sie Dokumente herunterladen, auf denen sich gestohlene Login-Daten befinden, ohne dass dies für die Forschenden vorher erkennbar war. In diesem Moment haben sie bereits personenbezogene Daten erhoben. »Das

Datenschutzrecht kennt kein Instrument, das erlaubt, eine eventuell bevorstehende, nicht näher zu definierende Datenerhebung rechtskonform zu planen. Cybersicherheitsforschende bringt das in eine schwierige Lage.« Selzer bekräftigt: »Wir brauchen einen klaren Rechtsrahmen – Forschende dürfen nicht genauso behandelt werden wie bösartige Hacker.«

Realistische Verhandlungen, fiktive Fälle

Bisher bleibt es Richtern überlassen, Klarheit für die Cybersicherheitsforschung zu schaffen – und zwar in jedem Einzelfall. Da noch viele Fragen rund um die rechtliche Zulässigkeit von Cybersicherheitsforschungs-Aktivitäten offen sind, sollen die simulierten Gerichtsverfahren, die seit September 2024 bis 2027 jährlich stattfinden, weitere Orientierung schaffen und den Forschenden aufzeigen, welche Forschungsaktivitäten nach Meinung des Simulationsgerichts wie rechtskonform umsetzbar sind. Deshalb sind die Verfahren nah an der Realität. Die Angeklagten sagen vor Gericht aus, ein technischer Sachverständiger erklärt komplexe Abläufe und gibt eine Einschätzung, inwieweit er das Vorgehen für vertretbar hält. Der Staatsanwalt stellt basierend auf diesen Angaben einen Antrag zum Strafmaß, die Strafverteidiger argumentieren dagegen.

Im Gerichtsverfahren vom August 2025 wird simuliert Recht gesprochen. Die beiden Forschenden werden vom Gericht unter Vorbehalt zu einer Geldstrafe von 30 Tagessätzen zu je 100 Euro verwarnt und müssen jeweils 500 Euro an eine Opferberatungsstelle zahlen, die sensible Fotos nicht hinreichend geschützt zum Download für Betroffene zur Verfügung gestellt hatte. Ausschlaggebend war vor allem das Speichern der Fotos zur Dokumentation auf dem Server der Forschungsgruppe, auf den auch Forschende Zugriff hatten, die nicht an der konkreten Forschungsaktivität beteiligt waren.

»Durch die simulierten Verhandlungen wollen wir möglichst realistische rechtliche Leitplanken für Cybersicherheitsforschende und ihr Handeln erwirken«, sagt Dr. Annika Selzer. Die Forschenden können somit künftig besser einschätzen, bei welchen Handlungen das Eis unter ihren Füßen dünn wird. ■

Es gab im Jahr 2024 rund

5800

verdächtige Aktivitäten

gegen bayerische Landesbehörden – mehr als je zuvor.

Raps statt Rind

Deutschland ist der größte Rapsproduzent innerhalb der EU. Doch die leuchtend gelbe Pflanze kann noch viel mehr sein als Lieferant für Speiseöl, Futtermittel und Biodiesel: Dank eines neuen Verfahrens verwandeln Fraunhofer-Forschende sie in proteinreiche Fleischalternativen.

Von Yvonne Weiß

Strahlend gelb, hochgewachsen, unverzichtbar: Etwa 4,3 Millionen Tonnen Raps wurden 2023 in Deutschland geerntet und weiterverarbeitet. Vor allem Rapsöl ist begehrt: Mit etwa 86 Millionen Litern belegte es 2024 Platz eins der beliebtesten Speiseöle der Bundesbürgerinnen und -bürger – noch vor Sonnenblumen- und Olivenöl. Als problematisch aber gilt das gesundheitsschädliche Hexan, das aus der Aufbereitung von Mineralölen stammt und bisher als Lösemittel in der Rapsölproduktion zum Einsatz kommt.

An einem Aufbereitungsverfahren, das ganz ohne Hexan auskommt, arbeiten daher Forschende des Fraunhofer-Zentrums für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP in Leuna: »Wir setzen auf Ethanol, um aus dem nachwachsenden Rohstoff Raps das Bestmögliche herauszuholen und neue Lebensmittelprodukte wie natürlich proteinreiche Fleischalternativen auf den Markt zu bringen«, erklärt Dr. Robert Hartmann, Leiter der Forschungsgruppe Biomassefraktionierung am Fraunhofer CBP.

Dafür haben die Forschenden in Leuna eine spezielle Aufbereitungsanlage errichtet. Die Rapssaat wird zunächst geerntet und geschält: Eine Walze bricht sie dafür auf, ein Luftstrom separiert die leichten Schalen, die Bitterstoffe zum Schutz vor Fressfeinden wie Käfern enthalten, von den gelben Kernen. Die Schalen lassen sich anschließend wiederverwerten, etwa als Verpackungsmaterial.

In konventionellen Produktionsanlagen werden die Rapspflanzen bisher gemeinsam mit den Schalen in schneckenförmige Pressen gegeben. Durch mechanischen Druck lässt sich so der Großteil des Öls gewinnen; der verbleibende Rest wird mit Hilfe von Hexan aus dem Konzentrat extrahiert, das Öl zwar löst, aber schädlich ist für Mensch und Umwelt. Grenzwerte und Rückstände im Öl werden daher streng kontrolliert. Der Einsatz der Chemikalie könnte in der EU künftig weiter eingeschränkt, möglicherweise sogar ganz verboten werden. Wegen der mitgepressten Schalen ist das Rapskonzentrat zudem so bitter, dass sich davon maximal fünf Prozent in Tierfuttermitteln einsetzen lassen.

Mit etwa
86
Millionen Litern
belegte Rapsöl
2024 Platz eins
der beliebtesten
Speiseöle.



Kugelförmig: Die schwarzen Samen der Rapspflanze sind ein bis zwei Millimeter groß.

Aufgrund hoher Drücke und Temperaturen in herkömmlichen Anlagen werden zudem funktionelle Proteine, die Raps von Natur aus enthält, denaturiert und damit deren Nährwert stark vermindert. »Das Ergebnis ist Rapsschrot, das zahlreiche Bitterstoffe, Reste des Hexans sowie denaturierte Proteine beinhaltet«, so Hartmann. »Hier möchten wir ansetzen – und das große Potenzial von Raps nutzen.«

In der neuen Anlage in Leuna versetzt das Team die Kerne daher mit 96-prozentigem Ethanol ohne Bitterstoffe, das den Geschmack schont. »Ethanol hält die Temperaturen während der Pressung zudem konstant und vermeidet Spitzen von mehr als 70 Grad«, erklärt Hartmann. »Die natürlichen Proteine im Raps bleiben somit intakt, die Nährstoffe bewahrt.« Nach der Pressung löst frisches Ethanol nicht nur das verbleibende Öl aus dem Rapskonzentrat, sondern auch Fettsäuren und Lecithine – ungewollte Wertstoffe, die bislang aufwendig chemisch entfernt und nur vereinzelt wiedergenutzt werden. Die Forschenden möchten die Nebenstoffe aufbereiten und wiederverwenden, etwa in Kosmetikprodukten und Pflanzenschutzmitteln.

Das Ergebnis: ein geschmacksneutrales, leicht verdauliches, regionales Rapskonzentrat mit einem natürlichen Proteinanteil von mehr als 50 Prozent. Besonders für die zunehmend beliebten Fleischalternativen kann es laut Robert Hartmann eine vielversprechende Basis bieten – und eine Alternative zu Soja sein, das dafür bisher meist zum Einsatz kommt, aber abhängig ist von Importen und Lieferketten.

Erste Tierfuttermittel aus der Anlage sowie pflanzliche Alternativen zu Burger Pattys, Eiern und Hackfleisch hat das Team bereits testen lassen. Das Feedback? Durchweg positiv. Um den Proteinanteil noch weiter zu steigern, optimieren die Forschenden aktuell die Produkte. Dabei werden auch Daten erhoben, die zukünftig für die Beantragung einer Erstzulassung für neue Nahrungsmittel notwendig sind.

Robert Hartmann freut sich über den Erfolg: »Wir können aus Raps so viel mehr gewinnen, als es bisher geschieht. Mich begeistert, dass wir hierzu einen Beitrag leisten können – und Nahrungsmittelquellen nachhaltig nutzen.« ■

Explosives Erbe

Hunderttausende Fliegerbomben sind im Zweiten Weltkrieg nicht detoniert und stecken noch in deutschen Böden. Eine Fraunhofer-Software hilft, Gefahren präzise zu ermitteln.

Von Dr. Sonja Endres

Die Räumung eines der größten Krankenhäuser Kölns im Oktober 2024 war selbst für die erfahrenen rheinischen Expertinnen und Experten eine Herausforderung. Eine amerikanische Zehn-Zentner-Bombe war mitten auf dem Gelände des Klinikums Merheim gefunden worden und musste kontrolliert gesprengt werden. 287 Patientinnen und Patienten wurden evakuiert, 1200 Einsatzkräfte und Rettungsdienste aus ganz NRW waren im Einsatz, der Luftraum wurde kurzzeitig gesperrt.

Der Kölner Untergrund ist explosiv: Allein im Jahr 2024 wurden hier 21 Sprengbomben entdeckt. Die Blindgänger aus dem Zweiten Weltkrieg werden meistens bei Bodensondierungen für geplante Baumaßnahmen aufgespürt, müssen entschärft und die Anwohner daher in Sicherheit gebracht werden. Doch nicht immer ist die Gefährdungslage so klar wie in Merheim. Bei der oft schwierigen Entscheidung, ob eine Räumung tatsächlich durchgeführt werden muss, hilft seit fünf Jahren die Risiko-Analyse-Software VC Blastprotect, die Forschende am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI gemeinsam mit der Virtual City Systems GmbH

und dem Kampfmittelbeseitigungsdienst NRW entwickelt haben. Sie simuliert die Druckwellenausbreitung in der Luft und den Splitterflug in virtuellen 3D-Stadtlandschaften auf Basis physikalischer Modelle – und kann so dazu beitragen, unnötige, kostspielige und im Falle von medizinischen Einrichtungen häufig riskante Evakuierungen zu vermeiden.

Jetzt wollen die Forschenden am Fraunhofer EMI die physikalischen Modelle der Software im Projekt »Schockanalyst« weiterentwickeln. In Zukunft sollen die Simulationen die Auswirkungen der Spannungswellen im Boden ebenso berücksichtigen wie die Effekte der Sicherungsmaßnahmen, die die Kampfmittelräume vor der Entschärfung ergreifen.

Dafür führte das Forschungsteam zusammen mit den Kampfmittelräumdiensten Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und NRW im Mai einen Großversuch auf einem alten Militärgelände der Nationalen Volksarmee bei Rostock durch. An sechs Tagen wurde jeweils unter unterschiedlichen Bedingungen eine 500-Pfund-Weltkriegsbombe in der Erde versenkt und kontrolliert gesprengt.

»Das knallt schon ganz ordentlich«, erzählt Dr.-Ing. Christoph Grunwald vom Fraunhofer EMI. Nur

Auch ländliche Gebiete blieben nicht von Angriffen verschont. Blindgänger werden unter anderem beim Pflügen zutage befördert.



wenige Meter von den Explosionen entfernt hatte er gemeinsam mit seinem Team den Messstand in einem abbruchreifen ehemaligen Stabsgebäude aufgebaut. Mithilfe zahlreicher Sensoren erfassten die Forschenden beispielsweise die Erschütterung durch die Detonationen und die Intensität der Druckwelle unter vollständig realistischen Bedingungen. Dazu gehörten unter anderem präventive Abdeckungen der Bombe und Aluminiumringe, die die Sprenggrube abstützten.

»VC Blastprotect geht bisher vom Worst Case aus und berechnet die größtmöglichen Schäden bei einer ungeschützten Sprengung«, erklärt Grunwald. »Mit unseren Prognosen ist man daher immer auf der sicheren Seite.« Die Messdaten helfen jetzt nicht nur dabei, die Simulationen zu präzisieren, spezielle Gefahrenbereiche auszuweisen und den Evakuierungsradius zu verkleinern. Sie enthalten auch wichtige Informationen für die Kampfmittelräumer über die Effektivität ihrer Sicherheitsvorkehrungen. Um vergleichen zu können, wie sich diese im Einzelnen auf die Zerstörungskraft der Bombe auswirken, erfolgte eine der Sprengungen ohne eindämmende Maßnahmen. Grunwald: »Wir haben uns alle einen guten Kilometer entfernt in Sicherheit gebracht. Trotzdem hat unser Auto bei der Explosion spürbar gewackelt.«

Die Messergebnisse zeigten unter anderem: Ein riesiger Wassersack auf der Bombe dämpft den Splitterflug und die Druckwelle genauso wirkungsvoll wie Sand. »Damit konnten wir den Kampfmittelräumern eine große Freude machen«, sagt Grunwald und schmunzelt. Denn der Wassersack hat den Vorteil, dass er aus sicherer Entfernung mithilfe eines Feuerwehrschaubes befüllt werden kann. Auch lässt sich Wasser einfacher und schneller an den Fundort transportieren.

Der Nachteil der Abdeckung: Die Energie, die nicht mehr in die Luft entweichen kann, geht ins umgebende Erdreich – der sogenannte Groundshock verstärkt sich. Grunwald: »Man kann sich diese Druckwelle vorstellen wie ein sehr starkes, schnell ablauendes Erdbeben.« Welche Schäden das an Fundamenten, U-Bahn-Schächten, Gas- oder Datenleitungen anrichten kann: Darüber gab es bisher kaum Erkenntnisse. Auch hier sammelten die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen im Großversuch wichtige Daten. Eine ungeschützte Sprengung, so Grunwald, sei trotz dieser Problematik keine Alternative: Insbesondere die Bombensplitter sind tödliche Geschosse, die mehrere Kilometer weit fliegen und durch Fenster auch in Wohnungen eindringen können. »Die Gefechtsköpfe sind ja bewusst so entwickelt, dass sie möglichst wirkungsvoll fragmentieren. Würde man kein Dämpfungsmaterial aufbringen, müsste man noch ein wesentlich größeres Gebiet absperren.«

Ihre Messwerte wollen die Forschenden ergänzen durch im Labor ermittelte Daten, wo sie gezielt verschiedene Böden wie Sand oder Lehm und die Effekte von Parametern wie Feuchtigkeit, Dichte oder Druckwellenintensität untersuchen. »Das ist schon alles sehr komplex«, gibt Grunwald zu. Das Team arbeitet zurzeit an einem ersten physikalischen Modell, das den Groundshock in Sandböden abbilden soll – eine wichtige Entscheidungshilfe für Städte, ob die Absicherung von unterirdischer Infrastruktur oder die Sperrung von Gasleitungen notwendig ist. Grunwald: »In Zukunft könnten wir mithilfe unserer Modelle berechnen, ob eine Gasleitung tatsächlich kurzfristig außer Betrieb genommen werden muss oder es eventuell reicht, den Druck im Rohr zu senken.« Das kann Unternehmen hohe Kosten durch Produktionsausfall ersparen. ■

Ein riesiger Wassersack auf der Bombe dämpft den Splitterflug und die Druckwelle genauso wirkungsvoll wie Sand.

Was für ein Müll

Mehr als 5,6 Millionen Tonnen Kunststoffverpackungen landen in Deutschland Jahr für Jahr nach nur einmaliger Nutzung in der gelben Tonne. Fraunhofer-Forschende wollen daraus Bauteile drucken.

Von Yvonne Weiß



Deutschland sammelt Plastikmüll. Doch nur weniger als ein Drittel der Joghurtbecher, Cremedosen oder Frischkäseverpackungen, die nach einmaligem Gebrauch in der gelben Tonne landen, wird recycelt – bisher. Mit einer Machbarkeitsstudie beweisen Forschende des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM und der Hochschule Bremen, dass es eine Lösung gibt.

»Post-Consumer-Abfälle sind besonders schwer wiederzuverwerten, da sie meist stark verschmutzt und sehr heterogen sind«, erklärt Silke Eckardt, Professorin für zukunftsfähige Energiesysteme und Ressourceneffizienz an der Hochschule Bremen. »Diese schwer verwertbaren Kunststoffe aus Privathaushalten möchten wir wiederaufbereiten – und in hochwertiges Material für den 3D-Druck verwandeln«,

ergänzt Dr.-Ing. Dirk Godlinski. Der Projektleiter in der Arbeitsgruppe Composite Technology schildert die Herausforderung: »Abfälle, die als Rezyklat in der additiven Fertigung zum Einsatz kommen, müssen äußerst hohe Anforderungen erfüllen, besonders hinsichtlich ihrer Reinheit, Form und Größe.«

Um diesen Kriterien gerecht zu werden, bereitete Silke Eckardt mit ihrem Team den Output aus der Sortieranlage auf: Im Kreislaufwirtschafts-Labor der Hochschule Bremen zerkleinerten sie die Kunststoffe, wuschen diese und separierten unerwünschtes Material vom Hauptstrom. Verbleibende Fremdkunststoffe wurden mittels Nahinfrarottechnologie identifiziert und ebenfalls entfernt. Danach zerkleinerten die Forschenden das Material erneut auf die für die Weiterverarbeitung erforderliche Größe und trockneten es.



»Wir möchten schwer verwertbare Kunststoffe aus Privathaushalten wiederaufbereiten – und in hochwertiges Material für den 3D-Druck verwandeln.«

Dr.-Ing. Dirk Godlinski, Fraunhofer IFAM

Aus Alt mach Neu:
Forschende geben verschmutztem Kunststoffmüll ein zweites Leben.

Das Ergebnis: Material mit einer Reinheit von mehr als 99,8 Prozent.

Im Anschluss übernahmen Dirk Godlinski und sein Team. Am Fraunhofer IFAM stellten sie einen festen Kunststoffstrang aus Polypropylen her: einem Material, das langlebig, bruchfest und relativ flexibel ist. In einem Extruder führten die Forschenden dafür die Schnipsel der aufbereiteten Abfälle zunächst zusammen, durchmischten diese und schmolzen sie bei Temperaturen von etwa 200 Grad auf. Abschließend pressten sie das Material durch eine Düse.

»Das Know-how besteht darin, entlang des Herstellungsprozesses in Abhängigkeit der diversen mechanischen Schneckengeometrien die Temperaturen, Drücke und Geschwindigkeiten exakt so einzustellen, dass am Ende homogenes Polypropylen entsteht«,

erklärt Dirk Godlinski. Für die Verwendung im 3D-Druck muss der Durchmesser des Strangs über die gesamte Länge hinweg rund und konstant sein, die Oberfläche glatt.

Das Ergebnis? Ein Erfolg: Der etwa zwei Millimeter dicke, graue Kunststoffstrang ließ sich auf Anhieb als Filament im 3D-Drucker nutzen; erste Bauteile hat das Team um Dirk Godlinski bereits erfolgreich gedruckt.

Die Machbarkeitsstudie haben die Projektpartner damit abgeschlossen, aktuell optimieren sie den Produktionsprozess. Laut Dirk Godlinski ließen sich die rezyklierten Kunststoffe etwa weiter veredeln und im Produktionsprozess zusätzliche Stoffe wie Glasfasern hinzufügen. Selbst sehr hochwertige 3D-gedruckte Bauteile für die Luftfahrt oder die Automobilindustrie wären somit denkbar. ■

Das Ergebnis:
Material mit
einer Reinheit
von mehr als

**99,8
Prozent**

Moor kann mehr

Klimaziele erreichen und gleichzeitig Energie gewinnen: Solaranlagen über wiedervernässten Moorflächen sind politisch dringend erwünscht. Nun ist die Forschung am Zug: Wie kann Moor-PV gelingen?

Von Beate Strobel

Wichtige Wasser- und Kohlenstoffspeicher: Moore machten einst 4,2 Prozent der Landfläche Deutschlands aus.

Noch wird die sechs Hektar große Fläche in Mecklenburg-Vorpommern landwirtschaftlich genutzt. Doch schon bald wird es dort aussehen wie auf einem Messestand für Solaranlagen. Unter dem kritischen Blick von Forschenden des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg und der Universität Greifswald werden hier in dem 2024 gestarteten Projekt MoorPower verschiedene PV-Modultypen in diversen Höhen und auf unterschiedlichen Fundamenten Sonnenstrahlen in Strom umwandeln. Während der Boden darunter langsam nasser wird.

Moore sind so etwas wie der Kohlenkeller der Natur, denn der Torf darin besteht zu mehr als 50 Prozent aus Kohlenstoff. In den noch vorhandenen Moorböden Deutschlands sind aktuell 1,3 Milliarden Tonnen des Elements gespeichert. Werden diese Böden jedoch entwässert für eine landwirtschaftliche Nutzung, reagiert der im Moor gebunkerte Kohlenstoff mit dem Sauerstoff der Luft und gelangt als Kohlendioxid (CO_2) in die Atmosphäre. Durch mikrobielle Abbauprozesse entsteht außerdem das noch klimaschädlichere Lachgas (N_2O).

Entsprechend spielen der Erhalt sowie die Renaturierung von Mooren eine bedeutende Rolle im Maßnahmenkatalog, mit dem Deutschland seine Klimaziele erreichen will. Denn aktuell sind rund 70 Prozent der Moore landesweit trockengelegt. 44 Prozent der gesamten Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft entfallen auf sie. In der 2022 von der Bundesregierung beschlossenen Nationalen Moorschutzstrategie wurde festgelegt, dass die jährlichen Emissionen aus Moorböden bis 2030 um fünf Millionen Tonnen CO_2 -Äquivalente gesenkt werden sollen. Um das Pariser Klimaschutzziel zu erreichen, wäre jedoch deutlich mehr erforderlich: Mindestens 50 000 Hektar Fläche müssten pro Jahr wieder in Moore umgewandelt werden.

Damit sich die Restauration der Moore für die Landwirtschaft lohnt, gilt Moor-

PV – die Gewinnung von Solarenergie auf wiedervernässten Mooren – seit dem 2023 verabschiedeten Solarpaket 1 als förderwürdig. Das Fraunhofer ISE bescheinigt Moor-PV bei bundesweit 1,4 Millionen Hektar landwirtschaftlich genutztem Moorböden und einer Belegungsdichte von 0,25 bis 0,6 Megawattpeak pro Hektar ein technisches Potenzial von 321 bis 771 Gigawatt Nennleistung pro Jahr.

Energie ernten auf nassen Moorböden, deren Flächen nicht mehr auf konventionelle Weise für Anbau oder Viehhaltung genutzt werden können: Die Idee klingt plausibel. Doch sie hat einen Haken: »Mit Photovoltaik parallel zur Wiedervernäsung von Moorflächen betreten wir absolutes Neuland«, sagt Umweltwissenschaftlerin Agnes Katharina Wilke vom Fraunhofer ISE. Und das nicht nur in Deutschland: Auch international geht die Erfahrung mit Moor-PV gegen null. Wilke: »Wir sehen Deutschland hier in einer Vorreiterrolle.«

Um diese auszubauen, ist die Forschungsfläche des Fraunhofer ISE in Mecklenburg-Vorpommern da: »Mit MoorPower wollen wir unter anderem herausfinden, welche Technologien sich überhaupt für Moor-PV eignen«, erklärt Hydrologin Wilke. Denn nasse Moorböden bringen ein paar Besonderheiten mit: »Wiedervernässte organische Böden sind konstant in Bewegung und haben eine geringere Tragfähigkeit. Außerdem steht bei der Restauration der Erhalt von Torf im Zentrum. Je größer die Torfmächtigkeit, also die Dicke der instabilen Torfschicht von der Bodenoberfläche bis zum festen mineralischen Untergrund, desto komplizierter und teurer wird eine Verankerung der PV-Module.«

Eine Idee ist, mit Gelenken in der Aufständerung zu arbeiten, also in dem Gestell, das die Solarmodule trägt. So könnten die Bodenbewegungen womöglich ausgeglichen werden. Eine Alternative für dauerhaft überstaute Bereiche könnte aber auch Floating-PV sein, bei der die Module nicht im Boden verankert sind, sondern – mit Seilen fixiert – auf der Oberfläche

schwimmen. »Das allerdings bedeutet eine ständige Bewegung der PV-Module und der Verankerungen im Boden. Gut möglich, dass sich so keine bodenschützende Vegetationsdecke bilden kann, die nicht nur den gespeicherten Kohlenstoff bewahrt, sondern auch die Tragfähigkeit und damit die Zugänglichkeit des Bodens erhöht«, befürchtet Wilke. Der Einfluss der Fundamente auf die chemische Zusammensetzung des Bodens ist ebenfalls eine Teilaufgabe des Projekts.

Parallel zur Klärung der technologischen Fragen will MoorPower untersuchen, wie sich Moor-PV betriebswirtschaftlich lohnen kann. Ein Anreiz für die Landwirtschaft könnte Paludi-PV sein, also die Gewinnung von Solarenergie, während sich unterhalb der Module eine Nasswiese entwickelt, auf der sich beispielsweise Seggen etablieren ließen, die etwa zur Biomasseproduktion für die energetische Verwertung genutzt werden. Paludi-PV ergibt aber nur ökologisch einen Sinn, wenn trotz energetischer und agrarwirtschaftlicher Nutzung wiedervernässter Flächen der für die CO_2 -Speicherung wichtige Torf entsteht und erhalten bleibt. Ob das möglich ist, muss ebenfalls noch die Forschung klären.

Immerhin: Erkenntnisse aus der klassischen Agri-Photovoltaik, also der Solarenergie-Gewinnung über Agrarflächen, deuten darauf hin, dass eine Verschattung der Moorflächen eine Verdunstung des Wassers reduzieren dürfte und somit die Chancen auf eine erfolgreiche Wiedervernäsung erhöhen könnte.

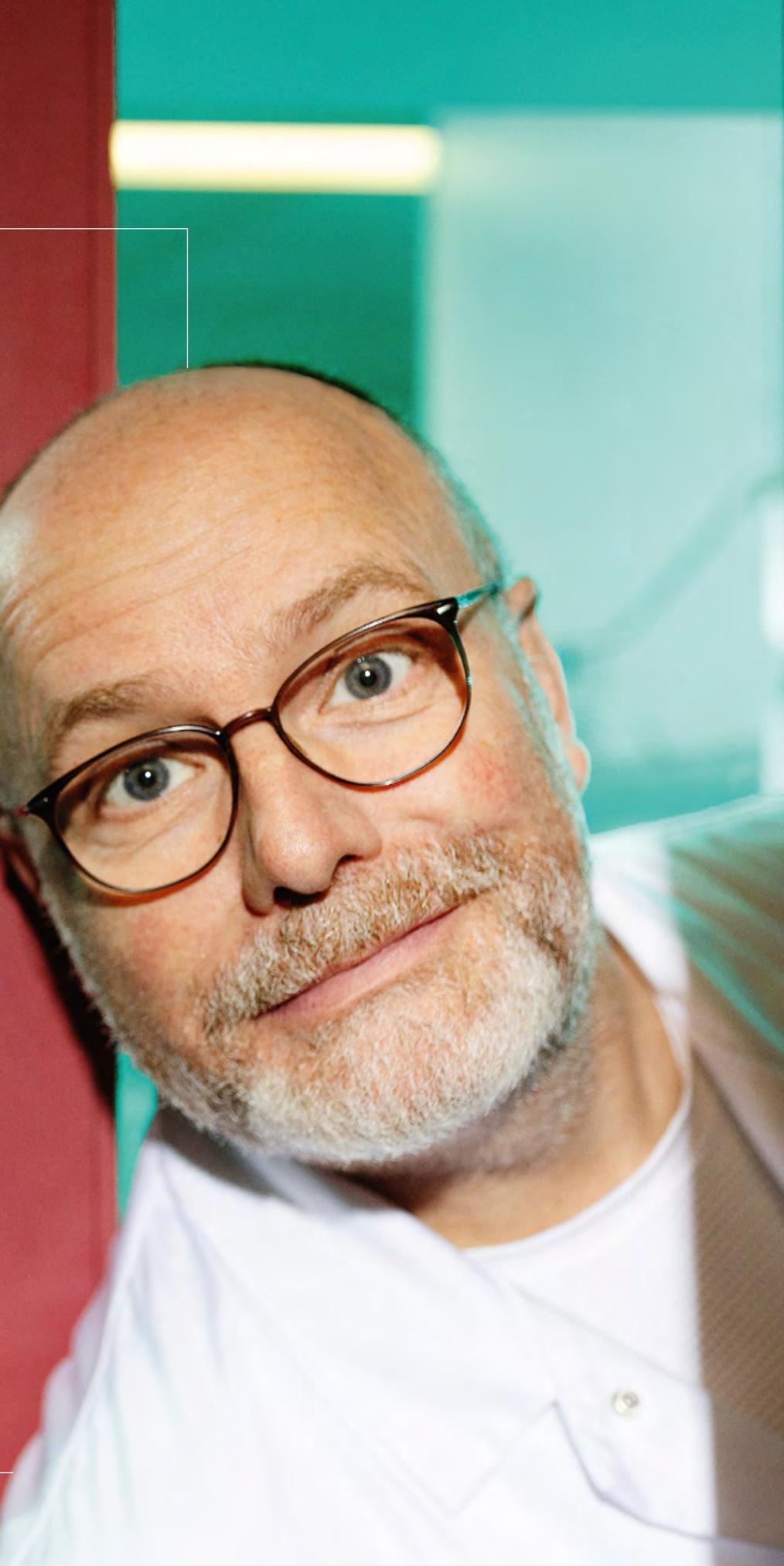
Das Forschungsvorhaben MoorPower wird 2028 enden, doch schon jetzt macht sich Projektleiterin Wilke Gedanken über mögliche Folgeprojekte. Da es Jahrzehnte dauert, bis aus einer dehydrierten Nutzfläche wieder ein funktionierendes Moorökosystem wird, dürfe man nicht noch mehr wertvolle Zeit verstreichen lassen: »Mit Projekten zu Moor-PV tragen wir gleich in mehrfacher Hinsicht entscheidend bei zu zukunftsrelevanten Themen wie Klimaerwärmung, Energiesicherheit, Biodiversität und nachhaltiger Landwirtschaft.« ■

Medizinische Innovationen

Türöffner für die Praxis

Künstliche Intelligenz und innovative Bluttests machen es möglich, Krebs, Sepsis oder Tuberkulose immer früher zu erkennen. Mit neuen Substanzen und personalisierten Therapien lassen sie sich wirkungsvoll bekämpfen. Fraunhofer-Forschende öffnen den medizinischen Innovationen jetzt die Tür in die Anwendung.

Fotograf: Simon Koy



Rechtzeitig Einblick gewinnen: Dr. Kai Sohn vom Fraunhofer IGB hat mit seinem Team eine nicht-invasive Methode entwickelt, um den gefährlichen Bauchspeicheldrüsenkrebs früh zu diagnostizieren.

Medizinische Innovation

»CAR-T-Zellen spüren Tumore im ganzen Körper auf«

Noch kostet die Therapie bis zu 400 000 Euro. Doch verbesserte Herstellungsmethoden senken die Kosten. Zudem nimmt die neue Variante der CAR-T-Immunzelltherapie jetzt auch solide Tumore ins Visier. Die modifizierten Immunzellen spüren sogar Metastasen auf. Das schafft Hoffnung für viele Patientinnen und Patienten. Fraunhofer hilft, die wissenschaftliche Exzellenz in die Praxis zu bringen.

Interview von Mehmet Toprak

Er ist einer der Pioniere der zellulären Immuntherapie: Prof. Michael Hudecek hat die erste Welle der CAR-T-Zelltherapie in den USA mitentwickelt. Heute arbeitet er an einer optimierten Version. Am Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI verbessert er zudem die Herstellungsverfahren für die CAR-T-Zellen. Das Ziel: die Therapie für mehr Patientinnen und Patienten zugänglich zu machen.

— Herr Prof. Hudecek, was hat Sie zu Ihrem Thema Krebs gebracht?

Als junger Mediziner hatte ich von 2007 bis 2012 das Glück, in Seattle am Fred Hutchinson Cancer Research Center zu arbeiten, der Wiege der Knochenmarktransplantation. Dort entwickelten wir die ersten CAR-T-Zellen im Labor und es entstand dann eine der ersten klinischen Studien, in denen CAR-T-Zellen bei Patienten mit hämatologischen Krebserkrankungen, umgangssprachlich Blutkrebs genannt, eingesetzt wurden. Das Projekt hat zu einem zugelassenen CAR-T-Zell-Produkt geführt, mit dem heute viele Patientinnen und Patienten erfolgreich behandelt werden.

— Die neue Generation der CAR-T-Zellen könnte auch gegen solide Tumore wie etwa Brust- oder Bauchspeicheldrüsenkrebs wirken. Wie kann das gelingen?

Bei soliden Tumoren müssen CAR-T-Zellen viel wirksamer sein als bei Blutkrebs, denn sie verfügen über starke Resistenzmechanismen. Um diese auszutricksen, müssen wir den CAR-T-Zellen besondere Eigenschaften mitgeben. Wir müssen sie leistungsfähiger machen und ihre Überlebensfähigkeit

verlängern. Man könnte auch einen zweiten Rezeptor hinzuziehen, der zusätzliche Krebsstrukturen erkennen kann, um die Wirkung spezifischer zu machen. Hier zeigt sich ein Vorteil der Immunzelltherapie: Man kann Eigenschaften kombinieren und fast beliebig viele Qualitäten in ein Zellprodukt einbauen. Das unterscheidet sie von anderen Therapien, bei denen eine Einzelsubstanz wirkt – oder eben nicht wirkt.

— Wie funktioniert das bei Krebsarten, die bereits gestreut haben?

Hier liegt eine entscheidende Qualität von CAR-T-Zellen. Einen singulären Tumor kann man versuchen, chirurgisch zu entfernen, doch bei Metastasen werden die Eingriffe komplexer. Deshalb könnten gerade Patientinnen und Patienten mit metastasierten Tumoren von der neuen Therapie profitieren. CAR-T-Zellen können Metastasen im Körper erkennen und bekämpfen.

— Warum setzt man die CAR-T-Zelltherapie nicht von Anfang an ein, sondern erst nach Bestrahlung und Chemotherapie?

Diese Frage stellen uns auch die Patientinnen und Patienten. Bei aller Euphorie müssen aber bestimmte Grundprinzipien der medizinischen Praxis beachtet werden. Eine wesentliche Regel lautet: Zuerst wird die etablierte Therapie eingesetzt, denn da gibt es Erfahrungen über viele Jahre. Erst dann folgt die experimentellere Behandlung. Die ist zwar sehr vielversprechend, aber auch mit Risiken verbunden. Wir müssen diesen vorsichtigen Ansatz beibehalten, auch wenn das für Patientinnen und Patienten mit ungünstiger Prognose oft schwer auszuhalten ist. ►

Grün ist die Farbe der Hoffnung: Prof. Michael Hudecek entwickelt am Fraunhofer IZI die Möglichkeiten der CAR-T-Zelltherapie im Kampf gegen Tumore weiter.



Aber wir machen Fortschritte. Viele Studien zeigen für CAR-T klare Vorteile gegenüber Chemotherapie und Bestrahlung. Die Therapie wird mittlerweile bei bestimmten Formen von Lymphknotenkrebs und beim multiplen Myelom schon in der zweiten Therapielinie eingesetzt. Das bedeutet, sie kommt zum Einsatz, wenn die Erstbehandlung nicht ausreichend wirksam war oder die Krankheit zurückkehrt. Es gibt auch schon Studien, die CAR-T als Teil der ersten Therapielinie evaluieren.

Die Therapie kostet bis zu 400 000 Euro pro Patient oder Patientin. Warum ist sie so teuer?

Zum einen ist das Verfahren aufwendig. Zunächst wird dem Patienten in der Klinik in einem Kreislaufverfahren Blut abgenommen. Die darin enthaltenen weißen Blutkörperchen – die Leukozyten – werden angereichert, daher der Name Leukapherese. Dann wird das Material in ein Reinraumlabor transportiert, in dem das Zellprodukt unter streng kontrollierten, sterilen Bedingungen hergestellt wird.

Klingt nicht sonderlich kompliziert ...

Ist es aber. Wir arbeiten mit hochempfindlichen Reagenzien und benötigen hochspezialisiertes Personal, Technologien, Geräte und Verfahren. Am Ende werden die Zellen geprüft, eingefroren, freigegeben und in die Klinik transportiert. Erst nach einer vorbereitenden Behandlung – einer modifizierten Chemotherapie, die die vorhandenen Immunzellen im Patienten reduziert – werden die CAR-T-Zellen verabreicht. Das ist eine komplexe Choreografie. Jeder Schritt muss perfekt sein. Und: Das Timing muss stimmen.

Kommt hier das Fraunhofer IZI ins Spiel? Die Optimierung von Herstellungsprozessen ist eine Fraunhofer-Spezialität.

Genau. Wir arbeiten daran, durch automatisierte Verfahren und Logistik die Infrastruktur zu vereinfachen und zu standardisieren, ohne dabei die medizinische Qualität zu beeinträchtigen. So konnten wir die Herstellungszeit von bisher 12 bis 14 Tagen auf 7 bis 10 Tage fast halbieren. Bald werden es nur noch 3 oder 4 Tage sein. Außerdem nutzen wir ein neuartiges Verfahren für die gentechnische Programmierung der Immunzellen. Wir verwenden nicht wie üblich modifizierte Viren, sondern nicht-virale mRNA- und DNA-Vektoren. Das macht die Therapie für die Patientinnen und Patienten verträglicher und hilft nebenbei, die Kosten zu senken,



**Prof. Michael Hudecek,
Pionier und Brückenbauer
für die CAR-T-Zelltherapie**

In der CAR-T-Zelltherapie (chimärischer Antigen-Rezeptor, CAR) werden Immunzellen des Körpers, die sogenannten T-Zellen, genetisch modifiziert und mit einem Rezeptor versehen, der Tumorzellen erkennt und gezielt angreift. Bisher wurde die Therapie nur für hämatologische Tumore eingesetzt, wie Leukämie, Lymphome und multiples Myelom. Eine neue Variante zielt auch auf solide Tumore wie Brustkrebs. Fraunhofer hilft, die wissenschaftliche Exzellenz in die Praxis zu bringen: Die Forschungsteams decken das Spektrum vom Design der Zellprodukte bis hin zu klinischen Studien ab.

Prof. Michael Hudecek gehört zu den Pionieren der zellulären Immuntherapie und hat die erste Welle der CAR-T-Zelltherapie an einem renommierten Krebsforschungszentrum in den USA mitentwickelt. Heute arbeitet er an der neuen Version der CAR-T-Zelltherapie. Mit einem Team von fast 70 Mitarbeitenden führt er ein Forschungsprogramm am Universitätsklinikum Würzburg. Zugleich leitet er die Würzburger Außenstelle des Fraunhofer-Instituts für Zelltherapie und Immunologie IZI. Dort wird das Herstellungsverfahren für die CAR-T-Zellen erforscht und optimiert. Das Ziel: die komplexe Herstellung des Immunzell-Präparats zu verbessern, zu beschleunigen und zu skalieren, damit Patientinnen und Patienten schneller ihre Therapie erhalten.

weil mRNA- und DNA-Vektoren viel besser skaliert werden können und bestimmte Sicherheitsvorkehrungen entfallen.

_____ **Teuer bleibt das Verfahren aber immer noch. Kann unser Gesundheitssystem das stemmen?**

Wenn wir die Kosten ins Verhältnis setzen zu Nutzen und Heilerfolg der Therapie, und dann noch den Vergleich mit anderen Therapien machen, schneiden CAR-T-Zelltherapien gut ab. Bei Lymphomen oder beim multiplen Myelom werden Kombinationstherapien mit bis zu drei oder vier Präparaten eingesetzt, die sehr hohe Jahrestherapiekosten verursachen. Die Patienten müssen dafür jeden Monat in die Klinik. Im Vergleich sind die Kosten für eine CAR-T-Zell-Behandlung in vielen Fällen sogar günstiger als die einer konventionellen Therapie.

_____ **Was bringt die Zukunft? Was sind die nächsten Schritte?**

Wir erforschen bereits die nächste Stufe, den In-vivo-Gentransfer. Dabei wird der Gentransfervektor intravenös direkt in den Körper der Patientin oder des Patienten verabreicht. Der bildet dann die CAR-T-Zellen selbst aus.

_____ **Der Mensch wird zu seiner eigenen Zellfabrik?**

Richtig. Es gibt erste Fallberichte, die zeigen, dass das gut funktionieren kann.

Einen singulären Tumor kann man oft chirurgisch entfernen, doch

20

Metastasen

nicht mehr. Deshalb werden gerade Patientinnen und Patienten mit metastasierten Tumoren von der neuen Therapie profitieren.

»CAR-T-Zellen sind aktuell die spannendste Form der Zelltherapie.«

Prof. Michael Hudecek, Fraunhofer IZI

_____ **Könnte man CAR-T-Zellen auch präventiv einsetzen?**

Ja, wir beschäftigen uns bereits mit entsprechenden Ideen. Durch den Einsatz von KI wird vieles möglich. Das Zukunftsbild, das wir entworfen haben, beinhaltet, dass KI in der Lage sein soll, mithilfe von Daten aus medizinischen Untersuchungen, darunter beispielsweise Blutbild, bildgebende Verfahren und genetische Tests, ein Risikoprofil für jeden Menschen zu erstellen. Daraus wiederum lässt sich ableiten, ob das Risiko für eine bestimmte Krebserkrankung so hoch ist, dass es angebracht ist, mit CAR-T-Zellen zu behandeln – das ist präventive Medizin.

_____ **Werden CAR-T-Zellen zur dominanten Zelltherapie?**

Aktuell sind CAR-T-Zellen die führende und spannendste Form der Zelltherapie. Das Potenzial ist riesig. CAR-T-Zelltherapien können prinzipiell bei jeder Form von Krebs und auch zur Behandlung nicht-maligner Erkrankungen wie Infektionen und Autoimmunerkrankungen eingesetzt werden. Bisher gibt es einen eindeutigen klinischen Wirkungsnachweis und Zulassungen bei bestimmten Formen der Leukämie, beim Lymphknotenkrebs und beim multiplen Myelom. Wir forschen intensiv weiter und arbeiten – gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus der Forschenden-Community – an neuen klinischen Studien und immer weiter optimierten Produkten und Prozessen. Ich bin sehr sicher, dass wir schon bald weitere Zulassungen in verschiedenen Bereichen der Medizin sehen werden.

_____ **Wie passt die Avantgarde der Krebsforschung mit Fraunhofer zusammen?**

Exzellent! Mir war der Transfer in die medizinische Praxis immer wichtig, damit möglichst viele Menschen eine Chance auf Heilung bekommen. Das hat mich zu Fraunhofer geführt. Wissenschaftliche Exzellenz wird erst durch den Transfer in die Praxis sichtbar und für die Gesellschaft spürbar. ■

Wegbereiter: Dr.-Ing. Bastian Nießing vom Fraunhofer IPT setzt in der Krebstherapie auf Automatisierung.

»Am Ende erhalten wir immer ein patienten-individuelles, qualitativ hochwertiges und sicheres Produkt.«

Dr.-Ing. Bastian Nießing,
Fraunhofer IPT



Medizinische Innovation

Die industrielle Revolution für die Krebstherapie

Künstliche Intelligenz statt Handarbeit: Die hochautomatisierte Herstellung soll die CAR-T-Zelltherapie bezahlbar machen. Eine erste Produktionsplattform existiert bereits.

Von Beate Strobel

Die CAR-T-Zelltherapie ist ein Lichtblick in dem düsteren Kapitel der Krebskrankungen. Doch dieser neue Ansatz hat seinen Preis: Die Hersteller verlangen bis zu 300 000 Euro allein für die Produktion der individuellen genmodifizierten Immunzellen für an Krebs erkrankte Menschen.

Bislang ist diese Behandlung lediglich zugelassen für spezielle Formen von Leukämie und Lymphom. Da die CAR-T-Zelltherapie jedoch intensiv beforscht wird, könnte sie bald auch für andere Krebsarten infrage kommen oder gar präventiv eingesetzt werden. Gut aus Sicht der Betroffenen – doch eine finanzielle Last für das ohnehin bereits ächzende Gesundheitssystem.

Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT entwickeln Forschende deshalb in dem EU-geförderten Projekt AIDPATH (»AI powered, Decentralized Production for Advanced Therapies in the Hospital«) gemeinsam dem Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI sowie Unternehmen und Einrichtungen aus sieben Ländern eine Anlage, die CAR-T-Zellen hochautomatisiert herstellt. Seit Sommer 2025 steht der Prototyp einer solchen Laborplattform im Universitätsklinikum Würzburg.

Von der T-Zelle zum versandfertigen Endprodukt

Was bislang von Fachkräften händisch erledigt werden muss, übernimmt jetzt die Maschine: »In einem ersten Schritt werden die T-Zellen aus dem Blut der Patientin oder des Patienten separiert und aktiviert, sodass sie sich vermehren«, erklärt Medizintechniker Dr.-Ing. Bastian Nießing, Abteilungsleiter Bio-Adaptive Produktion am Fraunhofer IPT und Projektkoordinator. »Im nächsten Step wird der passende CAR-Rezeptor in die T-Zellen eingefügt – entweder über einen Virus oder aber via Elektroporation, also eine elektrisch induzierte Durchlässigkeit der Zellmembran.« Danach werden die CAR-T-Zellen in einem Bioreaktor vermehrt, schließlich geerntet, aufgereinigt, abgefüllt und kontrolliert. Das Endprodukt ist bereits tiefkühl und damit transportfähig.

Der hohe Automatisierungsgrad senkt nicht nur die Personalkosten der Produktion, sondern auch die Fehlerquote. Nießing: »Viele der Tätigkeiten in der händischen Herstellung von CAR-T-Zellen sind sehr repetitiv und dadurch fehleranfällig. Die Maschine hingegen arbeitet rund um die Uhr auf gleichbleibendem Qualitätsniveau.« Die am Fraunhofer IPT entwickelte Software COPE ermöglicht eine einfache Bedienung der Plattform.

Die Verwendung Digitaler Zwillingszellen erlaubt zudem eine KI-gestützte Produktionsplanung. Mittels Künstlicher Intelligenz werden etwa die Parameter im Bioreaktor optimiert, sodass die Zellkulturen dort im idealen Tempo wachsen und zum bestmöglichen Zeitpunkt geerntet werden. »Das garantiert, dass ich – unabhängig von der Anzahl oder Güte der Zellen zu Beginn des Prozesses – am Ende immer ein patientenindividuelles, qualitativ hochwertiges und sicheres Produkt erhalte«, erklärt Nießing. Durch die Integration von Patientendaten, Produktionsparametern und Therapie-Monitoring verbessert die KI sich kontinuierlich.

Die CAR-T-Zellen werden durch die Produktionsplattform nicht schneller hergestellt, »das ist ein biologisch limitierter Prozess, der nun einmal zwei bis drei Wochen benötigt«, erklärt Nießing. Die Skalierungsmöglichkeiten der Technologie liegen also nicht in der Geschwindigkeit, sondern in der Menge pro Zeitraum. Der Plattform-Prototyp kann bereits Zellen für bis zu zwölf Krebskrankte parallel herstellen. Das Fraunhofer IPT arbeitet zudem mit einem Lizenznehmer an einer Anlage, die bis zu 10 000 Produkte pro Jahr generieren kann. Dadurch ließen sich die Produktionskosten im Vergleich zur manuellen Herstellung langfristig um ein Drittel senken, glaubt Nießing.

Inwiefern diese Ersparnis sich im Endpreis einer CAR-T-Zelltherapie niederschlagen wird? Nießing vermutet, dass sich die Therapiekosten bei 150 000 bis 200 000 Euro einpendeln werden – und damit gleichziehen mit denen für eine Chemotherapie. Für die Patientinnen und Patienten wäre das bereits ein Gewinn. ■



Tuberkulose früher erkennen: Dr. Kathrin Held sucht am Fraunhofer ITMP nach verräterischen Stoffen im Blut.

Medizinische Innovation

Der ewige Kampf gegen die weiße Pest

Die Tuberkulose ist behandelbar. Trotzdem sterben an der Krankheit jedes Jahr über eine Million Menschen. Neue diagnostische Tests und Wirkstoffe sollen helfen. Die Gefahr ist nahe. Besonders hoch ist der Anteil multiresistenter Erreger unter anderem in der Ukraine.

Von Dr. Sonja Endres

Die Entscheidung, in die Forschung zu gehen, fällte Dr. Norbert Heinrich vor 17 Jahren. Es war in einem Busch-Krankenhaus in Malawi. Der Kinderarzt musste mit ansehen, wie seine kleinen Patientinnen und Patienten immer dünner und schwächer wurden. Sie schwanden dahin wegen der Schwindsucht – so nannte man die Tuberkulose früher in Deutschland. Der starke Abbau von Muskel- und Fettgewebe ist für die Krankheit charakteristisch. Im 19. Jahrhundert starb hierzulande rund ein Siebtel der Bevölkerung an der »weißen Pest«, die per Tröpfcheninfektion übertragen wird. Doch während bessere Lebensbedingungen, die Einrichtung von Tuberkulose-Fürsorgestellen und ab Mitte der 1940er-Jahre Antibiotika dafür sorgten, dass die Krankheit in Deutschland selten geworden ist, gehört sie in einigen Regionen Afrikas und Südostasiens zu den häufigsten Todesursachen. Weltweit ist Tuberkulose die Infektionskrankheit, die die meisten Todesopfer fordert. 1,25 Millionen waren es allein im Jahr 2023.

Den Willen zum Kampf gegen die Krankheit hat Heinrich aus Malawi mitgenommen. Er weiß: Entscheidend sind die frühzeitige Diagnose und eine schnell einsetzende effiziente Therapie. An beidem arbeiten Heinrich und seine Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer-Institut für Translationale Medizin und Pharmakologie ITMP und am LMU Klinikum München. Gerade haben sie ein Ergebnis ihrer Forschung zum Patent angemeldet.

Die Diagnostik der Tuberkulose hat sich seit Robert Koch kaum verändert. 1882 entdeckte der spätere Nobelpreisträger das *Mycobacterium tuberculosis* im Sputum von Patienten. Das zähflüssige Sekret sammelt sich in den tiefen Regionen der Lunge und wird beim Husten ausgeworfen. Noch heute erfolgt der Nachweis der Tuberkulose mittels Sputumprobe.

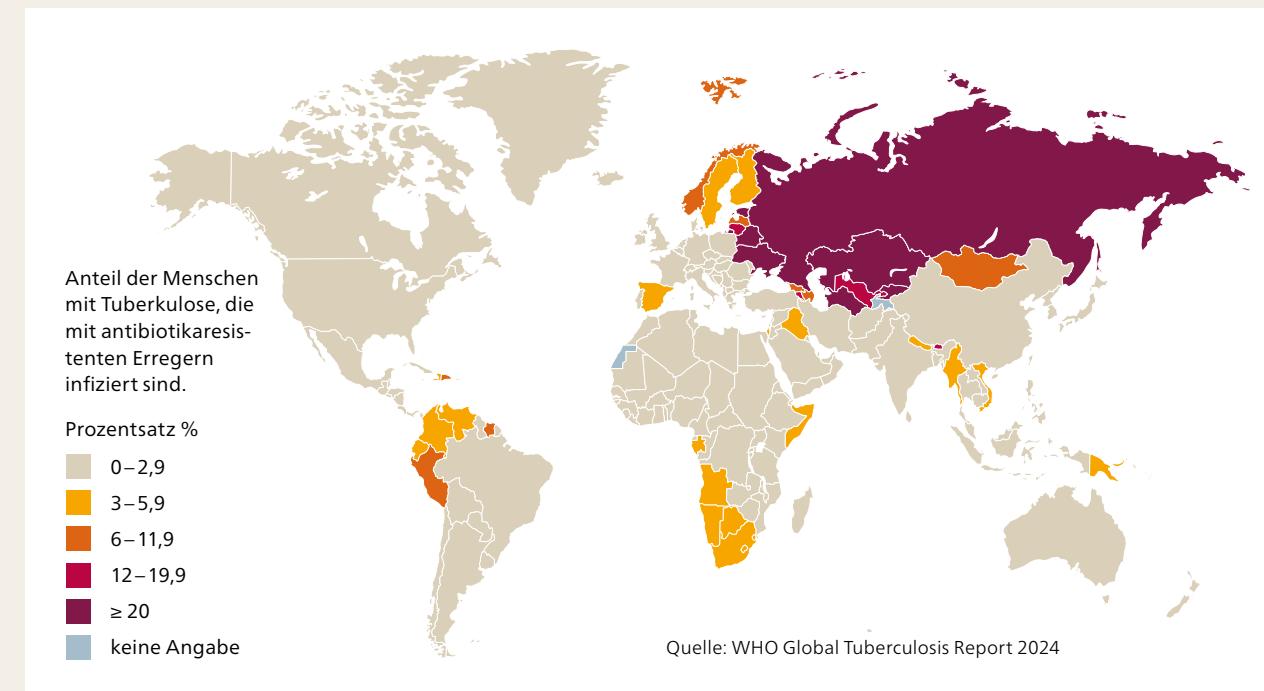
»Aber versuchen Sie mal, von kleinen Kindern Sputum zu erhalten«, gibt Heinrich zu bedenken. Je jünger die Kinder, desto höher ist außerdem die Wahrscheinlichkeit für eine sogenannte extrapulmonale Tuberkulose, bei der das Bakterium in andere Organe wandert. Die Lunge bleibt dann oft asymptomatisch. Heinrich: »Mehr als 200 000 Kinder sterben jedes Jahr weltweit, weil die Erkrankung nicht erkannt wird.«

Wie schwierig die Weiterverarbeitung der hochinfektiö-

sen Sputumprobe ist, erklärt Heinrichs Kollegin, die Kinderärztin Dr. Laura Olbrich. Unter dem Mikroskop lässt sich der Erreger erst bei einer sehr hohen Bakterienlast von etwa 10 000 Erregern pro Milliliter Sputum erkennen – eine Menge, die nur bei einer schweren Erkrankung vorhanden ist. Der Goldstandard für die Diagnostik ist daher der Nachweis über eine Bakterienkultur, anhand derer sich auch gleich mögliche Antibiotika-Resistenzen abklären lassen. Die Labore müssen hohen Sicherheitsanforderungen entsprechen, die Arbeitsabläufe und Maschinen besonders kontrolliert sein, um eine Kultur ►

»**Mehr als 200 000 Kinder sterben jedes Jahr weltweit, weil die Erkrankung nicht erkannt wird.«**

Dr. Norbert Heinrich,
Fraunhofer ITMP



erfolgreich anzüchten zu können. Olbrich: »Die notwendige medizinische Infrastruktur, zu der auch entsprechendes Fachpersonal gehört, fehlt aber gerade in vielen der ärmeren Länder mit hohen Tuberkulose-Fallzahlen.« Außerdem wächst die Kultur nur langsam, zwei bis acht Wochen dauert es, bis der endgültige Nachweis vorliegt.

Nur jeder Zehnte erkrankt

Im Projekt DisTB entwickelt Olbrich daher gemeinsam mit einem interdisziplinären Team und unter Beteiligung des Pharmaunternehmens Roche neue diagnostische Tests. Sie sollen eine schnelle, einfache und frühzeitige Diagnose der Tuberkulose ermöglichen. Diese ist entscheidend, damit Erkrankte die Infektion nicht weitertragen und von schweren gesundheitlichen Schäden sowie Folgeerkrankungen verschont bleiben. Dafür suchen die Forscherinnen und Forscher in Blut, Urin und Speichel nach hochempfindlichen spezifischen Biomarkern, beispielsweise bestimmten Botenstoffen des Immunsystems oder Antigenen.

Zwar gibt es mit dem IGRA-Test bereits einen Bluttest, der nachweisen kann, dass das Immunsystem des Patienten Kontakt mit dem Tuberkulose-Bakterium hatte. »Ob der Mensch aber an Tuberkulose erkrankt ist, sagt uns der IGRA-Test nicht«, erklärt Immunologin Dr. Kathrin Held, die an der Seite von Olbrich in DisTB forscht. Denn nur bei etwa einem von zehn Infizierten bricht die Krankheit tatsächlich aus – vor allem bei solchen, deren Immunsystem gerade geschwächt ist. Olbrich: »Der Körper von gesunden

Menschen ist normalerweise in der Lage, das Bakterium abzukapseln und so unschädlich zu machen.« Mediziner sprechen von einer latenten Tuberkulose, die nicht infektiös ist. Wird das Immunsystem aber durch einen anderen Erreger wie HIV stark beansprucht oder künstlich gehemmt, zum Beispiel wegen einer Chemotherapie oder einer rheumatologischen Behandlung, kann das Tuberkulosebakterium die Oberhand gewinnen und der Mensch erkranken – auch noch Jahre nach der Ansteckung.

Den Forschenden ist es jetzt gelungen, Biomarker im Blut zu finden, die nicht nur sehr spezifisch für Tuberkulose sind, sondern auch einfach nachzuweisen. Sie konnten sogar eine bestimmte Biomarker-Kombination identifizieren, anhand derer sich eine aktive Erkrankung diagnostizieren und ein Therapieerfolg messen lässt. Diese sogenannte Signatur ist inzwischen zum Patent angemeldet.

Ihre Erkenntnisse wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in einen möglichst simplen Test überführen, der ohne aufwendige Labor-Diagnostik und Fachpersonal auskommt. Olbrich: »Ideal wäre eine Art Fingerpicks-Test, wie ihn heute beispielsweise Diabetes-Patienten zur Messung des Blutzuckerspiegels nutzen.« Ein Tropfen Blut, ein Teststreifen und ein kleines Auslesegerät: Mehr würde nicht benötigt. Held ergänzt: »Mit ausreichend sensitiven Tests, die uns zeigen, wie aktiv die Tuberkulose gerade im Körper ist, könnten wir gezielter präventiv behandeln als bisher möglich und dem Ausbruch der Erkrankung zuvorkommen.« So ließen sich,

hoffen die beiden Forscherinnen, Behandlungszeiten verkürzen und die Anzahl der Neuinfektionen reduzieren.

Heftige Nebenwirkungen

Zurzeit wird die Tuberkulose mit einer Kombination aus vier Antibiotika therapiert. Der Wirkstoff-Cocktail ist notwendig, weil das Bakterium sehr schnell Resistenzmutationen gegen einzelne Substanzen bildet. Heinrich: »So senken wir das Risiko, dass einige Bakterien die Behandlung überleben und sich weiter vermehren können.« Die Therapie dauert mindestens vier, meistens jedoch sechs Monate oder länger. Die Nebenwirkungen sind erheblich, die Patientinnen und Patienten leiden häufig unter Übelkeit, Erbrechen und Durchfall, gelegentlich auch unter Hauausschlägen, Schwindel und Leberfunktionsstörungen. Noch schwerwiegender sind die Nebenwirkungen bei der Therapie gegen multiresistente Tuberkulose, wenn die sogenannten First-Line-Antibiotika nicht mehr helfen, weil die Bakterien gegen die Wirkstoffe unempfindlich geworden sind, und auf Reserve-Antibiotika zurückgegriffen werden muss. Besonders verbreitet sind die multiresistente Erreger in der europäischen Region der WHO, wozu auch Russland, Weißrussland und die Ukraine gehören. Ihr Anteil liegt hier bei etwa

Besonders verbreitet sind die multiresistente Erreger in der europäischen Region der WHO, wozu auch Russland, Weißrussland und die Ukraine gehören. Ihr Anteil liegt hier bei etwa

24 Prozent aller neu diagnostizierten Fälle.

Tuberkulose erleidet unter der Therapie eine Neuropathie, also eine Nervenschädigung, oft wird das Knochenmark in Mitleidenschaft gezogen. Als Folge entwickelt sich eine Blutarmut, die das Immunsystem schwächt und anfällig für schwere Infektionen und Blutungen macht. Die gesundheitlichen Schäden können dauerhaft bestehen bleiben. Manchmal muss die Therapie abgebrochen werden, was die Bildung weiterer Resistzenzen fördert.

Problematisch ist im Antibiotika-Mix vor allem der hochtoxische, aber auch sehr wirksame Wirkstoff Linezolid. Ihn hoffen Heinrich und seine Kolleginnen und Kollegen bald durch zwei neue Substanzen zu ersetzen: Sutezolid und Delpazolid. Sie gehören zur gleichen Antibiotikaklasse, sind jedoch deutlich weniger toxisch. In zwei Phase-IIb-Studien haben die Forscherinnen und Forscher gemeinsam mit afrikanischen Partnern die Wirk-

stoffe jetzt erstmals in Kombination mit den anderen drei Tuberkulose-Antibiotika getestet. Untersucht wurden die Medikamente bei Patientinnen und Patienten mit multiresistenter Tuberkulose in Südafrika und Tansania. Die Ergebnisse zeigen eine deutlich bessere Verträglichkeit, im Falle von Delpazolid auch eine sehr gute Wirksamkeit. Sie wurden im renommierten Fachjournal »The Lancet Infectious Diseases« veröffentlicht und sorgten in der Fachwelt für Aufsehen, weil sie einen erheblichen Fortschritt in der Therapie ermöglichen könnten.

Neue Hoffnungsträger

In einer Phase-III-Studie will das Forschungsteam an seinen Erfolg anknüpfen und der Zulassung der innovativen Wirkstoffe einen Schritt nähern. Neben Delpazolid soll hier auch das am Institut für Infektions- und Tropenmedizin des LMU Klinikums München und am Hans-Knöll-Institut in Jena neu entwickelte Antibiotikum BTZ-043 zum Einsatz kommen und einen weiteren problematischen Wirkstoff in der Vierfach-Kombinationstherapie ersetzen: Bedaquilin. Gegen den einstigen Hoffnungsträger, der vor rund 20 Jahren die Therapie der multiresistenteren Tuberkulose revolutionierte, indem er sie deutlich verträglicher machte und die Behandlungszeit um zwei Drittel verkürzte, wird das Bakterium zunehmend unempfindlich. Vor allem in vielen Ländern im südlichen Afrika ist die Entwicklung bedrohlich.

Mit großer Sorge sieht Heinrich auch den Rückzug der USA aus den weltweiten Präventions- und Therapie-

bemühungen. Bisher war die US-Regierung der größte Geldgeber im Bereich der Tuberkulose-Forschung. »Unsere amerikanischen Kolleginnen und Kollegen sind ziemlich verzweifelt, muss man sagen.« Die Mittelkürzungen bedeuten auch, dass viele Hilfsprogramme nicht weiter fortgeführt werden können und die Versorgung in zahlreichen Ländern gefährdet ist. Heinrich befürchtet einen deutlichen Anstieg der Tuberkulose-Fälle und -Todesopfer. Da Antibiotika-Behandlungen mangels Medikamente vorzeitig abgebrochen werden müssen, könnten neue, noch widerstandsfähigere Erreger entstehen – eine ernsthafte Bedrohung für die globale Gesundheit. Heinrich: »Wir brauchen dringend neue Werkzeuge, um dieser Krankheit Herr zu werden.« Bevor die weiße Pest Europa und andere Regionen weltweit zurückerobert, weil keines unserer Medikamente mehr hilft. ■

Medizinische Innovation

Der schonendere Blick auf den Tumor

Weniger Strahlenbelastung bei der Diagnostik und Therapie von Krebs: Fraunhofer-Forschende nutzen eine Technologie, die man aus einem ganz anderen Bereich kennt.

Von Beate Strobel

Röntgenstrahlen faszinieren Dr. Victoria Heusinger-Heß: Sie verraten uns schnell und detailliert, was unter einer Oberfläche steckt oder passiert. Als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI kommt sie an diesem Thema aber auch nicht vorbei: Röntgen spielt am Standort Efringen-Kirchen eine wichtige Rolle. Mit Hochgeschwindigkeits-Röntgen sind die Wissenschaftler beispielsweise in der Lage, dynamische Prozesse abzubilden – Prozesse, die im Millisekunden- oder Mikrosekundenbereich stattfinden. Und das auch schon mal mit 1000 Bildern pro Sekunde. »Mit einem solchen Röntgenvideo«, erklärt die Mathematikerin, »können wir ganz direkt beobachten, was etwa während eines Autocrashes bei hoher Geschwindigkeit im Fahrzeuginnenraum und mit den Insassen passiert.«

In der Medizin hingegen sind Röntgenuntersuchungen Segen und Gefahr zugleich: Je länger und häufiger ein Mensch der dabei verwendeten ionisierenden Strah-

»Durch die Integration von Zusatzinformationen aus einem vorangegangenen Röntgenscan lässt sich die nachfolgende Radar-Bildgebung auf ein höheres Niveau heben.«

Dr. Victoria Heusinger-Heß,
Fraunhofer EMI

lung ausgesetzt ist, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass Zellen und Gewebe geschädigt werden. Bereits bei einem einmaligen CT-Scan erhält der Mensch die doppelte bis fünffache durchschnittliche Strahlungsdosis, die er natürlicherweise in einem Jahr erfährt.

So wenig wie möglich, so oft wie nötig, lautet deshalb die ärztliche Devise bei der Verwendung von Bildgebungsverfahren wie dem Röntgen oder der Computertomographie. Besonders sorgfältig müssen Nutzen und Risiken gegeneinander abgewogen werden bei Menschen, die eine genetische Prädisposition für Krebs oder bereits einen Tumor haben. Also fragte man sich beim Fraunhofer EMI: Gibt es eine technologische Lösung, die aussagekräftige Bilddaten liefert, aber zugleich so schnell und effektiv arbeitet, dass die Erkrankten möglichst wenig Röntgenstrahlen ausgesetzt werden?

Elektromagnetische Wellen für den flüchtigen Blick ins Innere

Gemeinsam mit Forschenden der Fraunhofer-Institute für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR und für Digitale Medizin MEVIS entschied sich das Team vom Fraunhofer EMI im Projekt »Multi-Med« für einen überraschenden Weg: Radar. Eine Technologie, die bislang eher im Schiffs- und Flugverkehr genutzt wird oder auch zur Erfassung von Wetterdaten. Das Prinzip ist einfach: Ein Radargerät schickt elektromagnetische Wellen los, die bestimmte Materie (etwa ein Flugzeug) nicht durchdringen können, sondern zurückgeworfen werden auf das Radar. Anhand von Zeit und der Frequenzänderung der reflektierten Wellen können dann Rückschlüsse über Form, Materie und Bewegung des detektierten Objekts getroffen werden. Auch die sogenannten »Körperscanner« am Flughafen arbeiten mit Radarwellen: Sie machen den Körper samt möglicherweise suspekter Gegenstände unter der Kleidung sichtbar.



Den Durchblick optimieren:
Dr. Victoria Heusinger-Heß
kombiniert am Fraunhofer
EMI Röntgen und Radar –
zum Wohle von Brustkrebs-
Betroffenen.

Der Vorteil der Radartechnologie: In geeigneter Frequenz können elektromagnetische Wellen auch in den Körper eindringen und Gewebeveränderungen abbilden, ohne dabei gesundheitsschädigend zu sein. Der Nachteil: Die Auflösung solcher Bilder ist eher grob. »Wenn wir uns auf Radar beschränken, könnten wir sehen, dass ein Tumor da ist«, führt Heusinger-Heß aus. »Eine genaue Lokalisierung ist jedoch nicht möglich.«

Um dieses Defizit auszugleichen, kombinieren die Fraunhofer-Forschenden Radar- und Röntgentechnologie. Heusinger-Heß: »Durch die Integration von Zusatzinformationen aus einem vorangegangenen Röntgenscan lässt sich die nachfolgende Radar-Bildgebung auf ein höheres Niveau heben.« In der Praxis würde etwa zu Beginn einer Krebstherapie – wie bislang – ein Röntgen-CT-Scan vom Tumor gemacht. Folgeuntersuchungen könnten dann durch die weniger belastende Radartechnologie ersetzt werden, in die via intelligenter Algorithmik das Vorwissen aus dem ersten Röntgenbild einfließt.

Eine Phantombrust aus Gelatine und Fett

Aktuell stehen Brust- und Lungentumor im Zentrum der Forschung am Fraunhofer EMI. Das hat ganz praktische Gründe: Brust und Lunge sind relativ kompakte Körperbereiche, bei denen – anders als etwa im Bauchbereich – nicht zu viele unterschiedliche Organe und Gewebearten vorliegen und zugleich – anders als etwa im Schädel

– keine massive Knochenplatte das Durchkommen der Radarwellen erschwert.

Das Patent für die kombinierte Radar-Röntgen-Tomographie ist bereits erteilt, nun steht die Weiterentwicklung der Technologie an. Dafür haben Victoria Heusinger-Heß und ihr Team sogenannte Messphantome einer Brust entwickelt, die in erster Linie aus Gelatine und Fett bestehen. Damit wird zum einen die Algorithmik weiterentwickelt, aber auch unterschiedliche Scan-Varianten geprüft: Lassen sich Röntgen- und Radarbilder beispielsweise gleichzeitig erstellen oder ist die zeitversetzte Bildaufnahme sinnvoller? Können durch Radarmessungen Artefakte in Röntgenbildern verändert oder kompensiert werden? Und: Kann eine Künstliche Intelligenz, trainiert mit Simulationsdaten und echten Messwerten, in einem weiteren Schritt neuronale Netze dazu befähigen, aus den Bilddaten die passenden Rückschlüsse zu ziehen?

Auch Einsatzgebiete außerhalb der Medizin sind denkbar, etwa für den Schnell-Check von Containern im Hafen oder beim Handgepäck-Scanning am Flughafen. Womit das Fraunhofer-Team dann wieder im Sicherheitsbereich, also der Ausgangsfrage seiner Forschung, angekommen wäre: »Die Röntgentechnologie liefert uns die schnelle Information, dass sich da ein viereckiger Gegenstand im Koffer befindet«, erklärt Victoria Heusinger-Heß. »Das Radar aber gibt uns die wichtigen Details: Ist es Sprengstoff – oder doch nur eine Tafel Schokolade?« ■

Medizinische Innovation

Next Level in der Tumordiagnostik

Fraunhofer-Forschende haben eine hocheffektive Methode zur Früherkennung von Bauchspeicheldrüsenkrebs entwickelt. Der Ansatz könnte die Präzisionsmedizin nach vorne katapultieren.

Von Beate Strobel

Federn, Rapskerne, Lignin: In der Installation »Circular« im Foyer des Stuttgarter Fraunhofer-Instituts für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB hängen – fixiert zwischen Glasplatten – unterschiedliche Materialien von der Decke. In einem sind jedoch lediglich vier schmale Reihen voll schwarzer Strichlein und Pünktchen zu sehen. »Ein Überbleibsel aus meiner Doktorarbeit«, erklärt der promovierte Biologe Kai Sohn – Fragmente der menschlichen DNA, sichtbar gemachte genetische Information. Die Sequenzierung nur eines menschlichen Genoms kostete vor zwei Jahrzehnten 100 Millionen Dollar, heute ist derlei dank neuester Technologien bereits ab 100 Dollar machbar. Und inzwischen hat die Wissenschaft auch verstanden, welche Optionen der tiefe Blick ins Genom tatsächlich bereithält: Damit lässt sich Leben retten!

Eine diagnostische Herausforderung sind vor allem Tumorerkrankungen, die auf Veränderungen nicht nur eines Chromosoms, sondern ganzer Chromosomenkomplexe beruhen. Ein solcher Endgegner ist der Bauchspeicheldrüsenkrebs: Mit einer Überlebensrate von weniger als zehn Prozent innerhalb der ersten fünf Jahre nach Diagnosestellung gilt das Pankreaskarzinom als die gefährlichste Krebserkrankung. Diese Tumorart wächst besonders schnell und breitet sich früh in Nachbarorgane im Bauchraum aus.

Die Sterblichkeitsrate ist aber auch so hoch, weil ein Bauchspeicheldrüsentumor unbemerkt heranwächst:

Symptome wie Bauchschmerzen, Gewichtsverlust oder Verdauungsprobleme treten erst im Spätstadium auf. »Es gibt bislang keine Vorsorgeuntersuchung oder Instrumente zur Frühdagnostik eines Pankreaskarzinoms«, fasst Kai Sohn die Lage zusammen. »Bislang kann es erst diagnostiziert werden, wenn es zu spät ist. Und genau deshalb haben wir uns diese Krankheit ausgesucht für unsere Forschung.«

In Kooperation mit Prof. Georg Weber vom Uniklinikum Erlangen und dem Unternehmen Genedata hat ein

Fraunhofer-Forschungsteam um Kai Sohn ein innovatives Verfahren entwickelt, mit dem sich Bauchspeicheldrüsenkrebs extrem früh erkennen lässt – und das, ohne den Menschen dafür aufzuschneiden zu müssen. Benötigt wird lediglich eine Blutprobe.

»Es gibt bislang keine Vorsorgeuntersuchung oder Instrumente zur Frühdagnostik eines Pankreaskarzinoms. Und genau deshalb haben wir uns diese Krankheit ausgesucht für unsere Forschung.«

Dr. Kai Sohn, Fraunhofer IGB

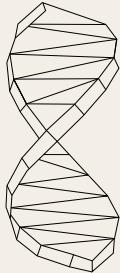
Klug gewickelt – aber mit Sollbruchstelle

In seinem Büro legt Kai Sohn ein weißes Kunststoff-Modell auf den Tisch, das aus einer DNA-Doppelhelix besteht, die sich sorgfältig um ein schwammartiges Gebilde im Inneren windet. »In unseren

Zellen liegt die DNA bestmöglich komprimiert vor in einer solchen Verpackungseinheit – dem Nukleosom«, erklärt der Forscher. »Der Kern des Nukleosoms besteht aus Histonproteinen, um die sich der DNA-Strang wickelt. Auf diese Weise entsteht eine maximal kompakte Struktur.« Die einzelnen Nukleosom-Einheiten wiederum sind durch sogenannte »Linker-DNA« miteinander verbunden – den »Sollbruchstücken« des Komplexes. ▶



Was kommt? Dr. Kai Sohn, Biologe am Fraunhofer IGB, setzt auf Präzisionsdiagnostik als Game-Changer in der Medizin.



»Mein Traum ist, dass wir eines Tages bereits die Krankheiten von morgen und übermorgen frühzeitig erkennen können – und das allein durch die Analyse winziger DNA-Fragmente.«

Dr. Kai Sohn, Fraunhofer IGB

An genau diesen Schwachstellen können Nukleosom-Komplexe auseinanderbrechen. Etwa beim natürlichen Zellzerfall, aber auch bei der Entstehung von Tumoren oder durch Entzündungsreaktionen im Körper. Im Blut jedes Menschen existieren derlei Bruchstücke, auch zirkulierende freie DNA (cfDNA) genannt. »Nach diesen DNA-Fragmenten fahnden wir im Plasma«, erklärt Sohn. Oder genauer gesagt: danach, ob sich Methylgruppen an den DNA-Rest geheftet haben. Denn Tumor-DNA unterscheidet sich von gesunder DNA durch unterschiedliche biochemische Signaturen. Und nicht nur das: »Abhängig davon, wo die Methylierung stattgefunden hat, wissen wir, ob dieses Nukleosom aus einer Immunzelle stammt, aus dem Darm, der Leber oder eben aus der Bauchspeicheldrüse.«

Für solche Detailuntersuchungen steht im Tiefgeschoss des Fraunhofer IGB ein kantiges Gerät von der Größe eines Tischdruckers, dessen Bauchbinde sanft rosa leuchtet und dem jemand zwei fröhliche Wackelaugen aufgeklebt hat. Der Job des Illumina NextSeq2000 ist die sogenannte Hochdurchsatzsequenzierung, auch Next-Generation Sequencing (NGS) genannt – jene Technologie, die es der Forschung inzwischen erlaubt, Genome in hoher Geschwindigkeit zu analysieren. Sohn: »Wir können heute 30 Millionen DNA-Fragmente über Nacht sequenzieren, also die genaue Abfolge der Nukleotide bestimmen und nach Methylierungsmustern fahnden.«

Die Biomarker, die von den Forschenden der Abteilung In-vitro-Diagnostik am Fraunhofer IGB gefunden wurden, ermöglichen nicht nur eine Unterscheidung zwischen gesunden und Tumorpatienten, sondern auch die sehr genaue Differenzierung etwa zwischen Bauchspeicheldrüsenentzündung und einem bösartigen Pankreastumor – zwei Erkrankungen, die ein nahezu identisches Symptombild aufweisen. Mithilfe von KI-basierten Algorithmen konnten die Forschenden sogar an einigen Beispielfällen zeigen, dass ihr Diagnostikverfahren auch Vorstadien des Pankreaskarzinoms klassifizieren kann. Kai Sohn stimmt das optimistisch: »Ich bin überzeugt davon, dass diese Technologie ein echter Game-Changer ist in der Bekämpfung von Bauchspeicheldrüsenkrebs.«

Als nächste Stufe stehen nun weitere klinische Tests sowie der Technologietransfer in die Krankenhausroutine an. Hier, betont Sohn, habe Fraunhofer einen besonderen Vorteil: »Durch die enge Zusammenarbeit mit den künftigen Produzenten und Anwendern entwickeln wir Technologien, die von Beginn an die Bedürfnisse der Nutzer einbeziehen.«

Die Genom-Analyse als Schlüssel zur individuellen Medizin

Am Fraunhofer IGB wird die NGS auch eingesetzt, um neue Biomarker für die Diagnostik von weiteren Tumorerkrankungen, aber auch für bestimmte Infektionskrankheiten zu finden. Die am Fraunhofer IGB entwickelte Diagnostik-Plattform DISQVER – inzwischen von der Fraunhofer-Ausgründung Noscendo betrieben – ist beispielsweise in der Lage, mehr als 16 000 Mikroben (Bakterien, DNA-Viren, Pilze und Parasiten) innerhalb von 24 Stunden zu identifizieren und so die Therapieentscheidung schnellst- und bestmöglich zu unterstützen. Auch hier ist lediglich eine Blutprobe des Patienten oder der Patientin nötig.

Die rasche, effektive und kostengünstige Analyse von Genomen mit biochemischen und bioinformatischen Methoden wie der NGS, so Sohn, sind der Schlüssel zur patientenindividuellen Medizin – und haben das Potenzial, einen Paradigmenwechsel einzuläuten: weg von der diagnostischen und hin zur Präventivmedizin. Noch stehe man am Anfang der Entwicklung, doch die Fortschritte allein innerhalb weniger Jahre seien bereits enorm. »Wir verstehen jetzt langsam, welche Informationsfülle ›Fragmentomics‹, also die Analyse von DNA-Bruchstücken, bereithält«, erklärt der Forscher. »Mein Traum ist, dass wir eines Tages bereits die Krankheiten von morgen und übermorgen frühzeitig erkennen können – und das allein durch die Analyse winziger DNA-Fragmente.« ■

Medizinische Innovation

Blutvergiftung überleben

Sepsis zählt zu den häufigsten Todesarten weltweit. Ein Frühwarnsystem mit KI-gestützter Sensorik kann Leben retten. Wie Fraunhofer-Forschende die Erkennung von Gesundheitsrisiken ermöglichen wollen.

Von Beate Strobel

Eine pochende Fingerwunde, eine Zahnlinfektion, ein Harnwegsinfekt: Am Anfang einer Blutvergiftung steht stets eine Entzündung. Gelangen Erreger in den Blutkreislauf, kann sich blitzschnell eine Sepsis entwickeln. Das Immunsystem setzt eine Flut an Entzündungsbotenstoffen frei, die Blutgefäße erweitern und schädigen. Flüssigkeiten gelangen ins Gewebe, die Blutgerinnung gerät außer Kontrolle, das Thromboserisiko steigt, Organe versagen. Einen septischen Schock überlebt nur jeder Zweite. Weltweit ist die Krankheit eine der häufigsten Todesursachen.

Da bei einer Sepsis jede Minute zählt, haben Forschende am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD im Projekt HealthView nach einer Lösung gefahndet, wie sich typische Symptome möglichst früh detektieren lassen. »Unser Projektpartner, das Stralsunder Unternehmen Hypros GmbH, vertreibt ein Gerät, das kritische Kliniksituationen wie Bettfluchten oder beginnendes Delirium durch optische Sensorik erkennt«, erklärt Dr.-Ing. Mario Aehnelt, stellvertretender Standortleiter am Fraunhofer IGD am Standort Rostock. »Um dessen Funktionen zu erweitern, haben wir gemeinsam KI-gestützte Sensoriken evaluiert, die wichtige Vitaldaten wie Körpertemperatur, Atem- und Pulsfrequenz berührungslos erfassen können«, ergänzt Projektleiter Dr.-Ing. Gerald Bieber.

Ideal sind etwa Sensoren, die Menschen im Bett dreidimensional abbilden. Aus dem Heben und Senken der Bettdecke selbst im Millimeterbereich können Algorithmen die Atemfrequenz ermitteln. Auch der Pulsschlag lässt sich indirekt erfassen: Bei jedem Herzschlag ändert sich die Durchblutung der Gesichtshaut minimal. Allein daraus lässt sich der Puls ableiten. »Die Körpertemperatur wiederum«, so Bieber, »ist eine sehr gute Schätzung auf Basis der Daten von Wärmebildkameras sowie der täglich von der Pflegekraft gemessenen Temperatur.« Die Vitaldaten werden lokal verarbeitet und nur in ausgewerteter Form zur Verfügung gestellt, was datenschutzrechtliche Bedenken minimiert.

Die Machbarkeitsstudie am Fraunhofer IGD ist Basis für die Weiterentwicklung zu einem marktfähigen Sys-

tem – interessant etwa für junge Unternehmen auf der Suche nach einem innovativen Produkt. Im nächsten Schritt will das Forschungsteam Mediziner mit an Bord holen, um der KI die klinische Interpretation der erobtenen Parameter beizubringen: Wie müssen die Eskalationsstufen gestaltet werden?

Parallel prüft das Fraunhofer-Team weitere Skalierungs-ideen. Bieber: »Kontinuierlich und ohne Personalaufwand Daten zu gewinnen und zielgenau zu analysieren – das kann zum einen für andere Krankheitsverläufe interessant sein, aber auch für die sensorische Überwachung von Tieren, im betrieblichen Gesundheitsmanagement, in sicherheitsrelevanten Berufen oder beim autonomen Fahren.« Die Weiterentwicklung Digitaler Patientenzwillinge werde ebenfalls befeuert. »Durch die kontinuierliche Datenerhebung wächst unser Wissen über den Grenzbereich zwischen Gesundheit und Krankheit«, betont Mario Aehnelt. »Wir stehen noch am Anfang dieser Entwicklung. Doch dass hier spannende Möglichkeiten liegen, ist bereits erkennbar.« ■

Notfall Sepsis – die Warnsignale

Die Symptome ähneln denen einer Grippe – bis auf niedrigen Blutdruck, Verwirrtheit und hohe Atemfrequenz.



Fieber
(> 38 °C) oder
Untertemperatur
(< 36 °C)

Kurzatmigkeit und Hyperventilation
(beschleunigte Atmung)

Übelkeit
und/oder
Erbrechen

Tachykardie
(erhöhte Herzfrequenz)
in Kombination mit niedrigem Blutdruck

Veränderungen des Bewusstseinszustands
Verwirrtheit oder Desorientierung

Hautveränderungen
feuchte, warme oder gerötete Haut; kalte Extremitäten

Gründen mit Fraunhofer: Aus der Wissenschaft in die Wirtschaft

Mehr ist immer möglich

Daten sind der Schlüssel: Als Spin-off des Fraunhofer IPA optimiert plus10 mit KI-Software-Lösungen die Produktivität von hochautomatisierten Maschinen und Anlagen.

Von Beate Strobel

Messen sind Orte, an denen nicht nur Bewährtes vorgeführt wird. Auch Neues kann entstehen – wie das Start-up plus10 beweist. Seine Unternehmensgeschichte begann 2016 auf der Automatica, der internationalen Leitmesse für intelligente Automation und Robotik. »Felix Müller, damals Gruppen- und Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, präsentierte sein Exponat am Hauptstand von Fraunhofer, während ich mit einem EU-Forschungsprojekt in einer anderen Halle untergebracht war«, erinnert sich Automatisierungsexperte Pablo Mayer, heute COO von plus10. »Abends traf man sich am Fraunhofer-Stand auf ein Bierchen. Felix und ich kamen dabei ins Gespräch, diskutierten über unsere Forschung und tauschten Ideen aus.« Ein Feierabend mit Folgen.

Eine der Ideen war die der datengetriebenen Produktionsoptimierung durch intelligente Software-Tools: Inwiefern lässt

sich die Effizienz und Produktivität in der Fertigungsindustrie durch KI steigern? Felix Müller, heute CEO von plus10, hatte bereits konkrete Pläne für eine Ausgründung und dafür eine Förderung durch das exist-Gründungsstipendium des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie beantragt. Gemeinsam mit Pablo Mayer und Thomas Hilzbrich (inzwischen CTO bei plus10) entwickelte Müller noch unter dem Dach des Fraunhofer IPA einen Prototyp des Analysetools. Die Software erfasst hochfrequente Daten aus der Maschinensteuerung, wertet sie über selbstlernende Algorithmen zeitsynchron aus und meldet zurück, ob Fehler im Fertigungssystem vorliegen und inwiefern diese zusammenhängen. Ein zweites Tool – das intelligente Werker-Assistenzsystem Shannon® – liefert auf Basis der Daten Step-by-step-Anleitungen, wie sich Fehlproduktionen beheben oder gar vermeiden lassen.

Als drittes Software-Tool vergleicht ein intelligentes Maschinen-Benchmarking

namens Darwin die Produktionsleistungen ähnlicher Maschinen und entwickelt daraus einen idealen Prozessablauf. Im automatisierten Abgleich erkennt Darwin frühzeitig, wenn eine Maschine beispielsweise langsamer läuft als vorgesehen, und weist auf mögliche technische Ursachen und Optimierungspotenziale hin.

Auf den Start folgte die Pandemie

Nachdem die entwickelten Tools sich bei Pilotkunden bewährt hatten, wagten Müller, Mayer und Hilzbrich 2019 den Sprung in die Selbstständigkeit: Die plus10 GmbH – der Name zielt ab auf Produktivitätssteigerungen durch intelligente Optimierung – startete mit je einem Büro in Augsburg und Stuttgart. Kaum ein halbes Jahr später kam der erste Corona-Lockdown.

»Ich erinnere mich an Tage, an denen wir stundenlang mit FFP2-Maske in Produktionshallen standen und mit zehn Meter Abstand voneinander in Werkskantinen aßen«, erzählt Pablo Mayer. »Auch der wirtschaftliche Abwärtstrend während und nach der Pandemie hat sich natürlich auf uns ausgewirkt.« Für eine Unternehmensgründung ein alles andere als idealer Zeitpunkt. »Aber«, schließt Mayer an, »wir sind durchgekommen, weil die Auftragslage trotz allem gepasst hat.« Dank der Zeit beim Fraunhofer IPA mussten die Entrepreneu-

Im Schnitt können durch die smarten Tools von plus10 Steigerungen zwischen 5 und 20 Prozent erreicht werden.

Ja zur Steigerung: Das Start-up plus10 hilft Unternehmen, aus automatisierten Produktionslinien das Maximum herauszuholen.

re nicht bei null anfangen, sondern konnten auf bestehende Firmenkontakte aufbauen. Auch das spezielle Mindset half, das die Gründer in ihrer Fraunhofer-Zeit erworben hatten: »Durch die Arbeit an den wechselnden Projekten bekommt man nicht nur wertvolle Einblicke in unterschiedliche Produktionsabläufe, sondern lernt auch, sich immer wieder mit Neuem auseinanderzusetzen und Dinge schnell umzusetzen«, erklärt Pablo Mayer. All das trägt bis heute bei zum Erfolg der plus10 GmbH. Das Team vereint inzwischen Mitarbeitende aus den Bereichen KI, Software-Entwicklung, Automatisierungs- und Steuerungstechnik sowie der Produktions-technik.

Ein weiterer Bonus: Vom klassischen Maschinen- und Anlagenbau über die Automobilbranche sowie die Pharma- und Medizintechnik bis hin zur Herstellung von Konsumgütern sind der DataCollector, Shannon® und Darwin branchenübergreifend einsetzbar. Speziell für den Spritzgießbetrieb von Elastomeren und Thermoplasten wurde zudem das jüngste KI-Tool Hopper entwickelt: Es analysiert die verschiedenen Einflussparameter der Rohmaterialien, die auf Maschinen und Anlagen verarbeitet werden, und optimiert situativ die Maschineneinstellungen, um Ausschuss und Zykluszeit so gering wie möglich zu halten.

Produktivität steigern und Neuanläufe verkürzen

Von den plus10-Kompetenzen profitierten in den vergangenen sechs Jahren namhafte Unternehmen wie Freudenberg, Roche, SCHOTT, YPSOMED und Aumovio sowie Hidden Champions aus dem Maschinenbau wie ZAHORANSKY, Arburg oder Hosokawa. M10 Solar Equipment, eine neu aufkommende Solarmodultechnologie mit zugehöriger Fertigungstechnologie, setzte bereits seit Markteintritt auf die Zusammenarbeit mit plus10. Im Bereich der vollautomatisierten Elektronikmontage konnte Continental die Verfügbarkeit der Anlagen mittels plus10-Shannon® um 18 Prozent steigen.

Im Schnitt können durch die smarten Tools von plus10 Steigerungen zwischen 5 und 20 Prozent erreicht werden. Aktuell

werden die Tools auch zur Beschleunigung in der Anfangsphase neuer Produktionsanlagen eingesetzt – Feedback etwa aus dem Bereich medizinische Spritzenproduktion ist hierbei eine Verkürzung von 20 Prozent. Das entspricht eingesparten Millionenbeträgen bei großen Produktionsanlagen.

Generell gilt: Je komplexer der Produktionsprozess, desto größer das Verbesserungspotenzial. Der Mensch kann die Vielzahl dynamischer Einflussfaktoren nicht mehr überblicken und die Systeme etwa mithilfe von Anleitungen oder aus seinem Erfahrungswissen nur noch schwer handisch optimieren. Tools wie Shannon®, Darwin oder Hopper nutzen nicht nur alle Daten, sondern arbeiten auch 24/7 kontinuierlich als Helfer immer mit. Mayer: »Dadurch minimieren sie Produktions-schwankungen zwischen den Schichten oder am Wochenende.«

Bei den »2025 Industrial AI Awards« hat SIEMENS nach der Bewertung von mehr als 60 globalen KI-Start-ups im Fertigungsumfeld bekannt gegeben, dass plus10 zu den Top 3 gehört – und das weltweit einzige Unternehmen ist, das intelligente Optimierungstools in regulierten kritischen Produktionsbereichen wie sicherheitsrelevante Automotive-Bauteile, Pharma und Medizintechnik entwickelt, die einen echten Nutzen bringen. ■



Unter den Top 3 weltweit: plus10 (2. v. r.: Felix Müller, CEO) bei den »2025 Industrial AI Awards«.

Mit Pappeln gegen den Klimawandel

Agroforstwirtschaft kombiniert Bäume und Ackerbau. Diese historische Form der Landnutzung könnte die Zukunft sein – für Bauern, Bäuerinnen und Bauwirtschaft.

Von Dr. Sonja Endres

Leise rieselt der Sommerschnee: Von Mai an fällt von Pappeln der weiße Flaum, der die Samen schützt, und bedeckt oft zentimeterdick den Boden. Dr. Moira Burnett-Barking fasziniert jedoch eine andere Eigenschaft der Weidengewächse. Die Forschungsgruppenleiterin am Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI begeistert sich vor allem für ihr schnelles Wachstum: »In 10 bis 15 Jahren entstehen Stämme mit einem Durchmesser von 20 Zentimetern. Andere Baumarten brauchen dafür durchschnittlich fünfmal so lange. Das macht Pappeln für die Holzindustrie so interessant.«

Im Projekt PappelWERT arbeitet die Holztechnologin gemeinsam mit ihrem Team und Partnern daran, Pappelholz für verschiedene Anwendungen nutzbar zu machen – und gleichzeitig die Landwirtschaft zukunftsfähig umzugestalten. Dafür greifen die Forscherinnen und Forscher auf eine historische Form der Landnutzung zurück: Agroforstsysteme, also eine Kombination aus Ackerbau, Bäumen und Büschen. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts war diese Bewirtschaftungsart in Deutschland weit verbreitet: Pappelreihen begrenzten Feldränder und wirkten als Windschutz, Hecken waren ein wichtiger Rückzugsort für viele Tiere, Streuobstwiesen sorgten durch abfallendes Laub und Fallobst für eine gute Nährstoffversorgung der Böden. Mit der Maschinisierung der Landwirtschaft war das Gehölz jedoch zunehmend im Weg. Bäume und Büsche wurden entfernt, was sich unter anderem nachteilig auf die Bodenqualität und das Mikroklima auf den Feldern auswirkte. Durch die vermehrte Ausbringung von Dünger und künstliche Bewässerung versuchte man, die Defizite auszugleichen. Burnett-Barking: »Doch da ist die Landwirtschaft jetzt an Grenzen gestoßen. Die zunehmenden Wetterextreme infolge des Klimawandels – lange Trockenphasen ebenso wie ungewöhnlich hohe Niederschlagsmengen – machen Veränderungen in der Landnutzung dringend notwendig. Nur so lassen sich die Erträge langfristig sichern.«

Die Zukunft soll aus der Vergangenheit kommen: moderne Agroforstsysteme, die an die heutige landwirtschaft-

liche Produktionstechnik bestmöglich angepasst sind. Das PappelWERT-Team entwickelt Best-Practice-Beispiele und untersucht sechs Pappel-Agroforstsysteme in Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg – Regionen, in denen sich die Folgen des Klimawandels bereits deutlich zeigen. Alle 25 Meter durchbrechen hier drei- bis vierreihige Pappel-Streifen die Felder. Die Pflanzung in Reihen und die Abstände ermöglichen, dass sich Acker und Baumkultur gut mit Maschinen abfahren und bewirtschaften lassen. Die Kombination aus Feldfrüchten und Bäumen hat Vorteile für Natur, Klima – und Geldbeutel.

Mehr Wasser, Nährstoffe und Schutz

Wie große Pumpen befördern die Pappeln durch die Kapillarwirkung ihrer Wurzeln Wasser und gelöste Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche. Der Baumschatten verlangsamt die Verdunstung, sodass der Boden auch in Dürreperioden nicht zu stark austrocknet. Die Pappeln wirken als Windschutz und verhindern, dass Saatgut weggeweht wird, zusätzlich unterbinden sie Bodenerosion. Abfallendes Laub und abgestorbene Feinwurzeln führen dazu, dass sich Humus anreichert und die Bodenqualität steigt. In den Pappelanpflanzungen tummeln sich zudem viele Tiere und Insekten, die Biodiversität wächst. Burnett-Barking fasst zusammen: »Es entsteht eine ganze Wirkungskette, die positive Folgen für das Feld hat.« Wie sich die Effekte genau auswirken, inwiefern beispielsweise nur die Feldfrüchte in unmittelbarer Nähe zu den Pappeln profitieren oder auch weiter entfernte, dazu sammeln die Forschenden noch Daten.

Doch Pappeln schaffen Zukunft nicht nur für Bauern und Bäuerinnen – auch der Bau kann profitieren. »Pappelholz lässt sich hervorragend für Möbel oder als Konstruktionsholz im Hausbau nutzen. Die Festigkeit ist sehr gut und mit Fichte oder Kiefer vergleichbar«, betont Burnett-Barking. Das Fraunhofer WKI-Team will aus dem Pappelholz höherwertige Holzprodukte fertigen. Zunächst





Pappeln in Reih und Glied lassen sich leicht bewirtschaften und wirken sich günstig auf angrenzende Feldkulturen aus.

haben sich die Expertinnen und Experten die Produktion von OSB-, Furnier- und Brettschichtholzplatten vorgenommen.

OSB-Platten bestehen aus länglichen Holzspänen, so genannten Strands, die mit Harz verbunden und gepresst werden. Furnierschichtholz ist stabiler, denn hier werden mehrere Lagen Holzfurnier, also dünne Holzschichten, miteinander verleimt. Um die Platten herstellen zu können, müssen Burnett-Barking und ihr Team die herkömmlichen Holzverarbeitungsprozesse an das junge Pappelholz anpassen. Die Furnierproduktion arbeitet üblicherweise mit 50 bis 60 Zentimetern Stammdurchmesser. »Diese Stämme werden ähnlich wie ein Apfel in der Maschine geschält«, vergleicht Burnett-Barking. Die 10- bis 15-jährigen Pappelstämme sind höchstens halb so dick. Deshalb müssen sie häufiger gewechselt werden und ergeben wesentlich kleinere Holzblätter. Außerdem hat Pappel andere Wuchseigenschaften und wird nicht so fest wie Eiche oder Buche. Das erfordert mehr Vorsicht beim Schälen. »Aber das kriegen wir hin, darauf sind wir ja hier am Fraunhofer WKI spezialisiert.«

Mit Pappeln hoch hinaus

Die Furnierholzplatten können beispielsweise als Türverkleidung zum Einsatz kommen, die OSB-Pappelholzplatten als Wandelemente in Fertighäusern. »In den USA werden sehr viele Holzhäuser aus OSB hergestellt«, berichtet Burnett-Barking. Außerdem lassen sich daraus Dachschalungen, Deckenverkleidungen oder Möbel fertigen. Die robusteren Brettschichtholzplatten, die aus miteinander verleimten Holzlamellen bestehen, sind sogar für tragende Elemente in Baukonstruktionen wie Balken oder Stützen geeignet. »Wir sehen in der Bauwirtschaft das größte Potenzial, das Pappelholz gewinnbringend zu vermarkten«, so Burnett-Barking. Sie ist überzeugt: »Die Nachfrage nach diesen Produkten wird in Zukunft stark steigen.«

Die Zuversicht wirkt berechtigt. Schon heute werden immer mehr Wohngebäude in Deutschland in Holzbauweise errichtet – trotz Konjunkturflaute in der Bauindustrie. 2023 ist ihr Anteil an den Neubauten auf rund 22 Prozent gestiegen. Das leichte Holz eignet sich gerade zur Aufstockung von Bestandsgebäuden in Städten, wo Wohnraum Mangelware ist, darüber hinaus ist es nachhaltig. Holz muss nicht wie Stahl oder Beton energieintensiv hergestellt werden, sondern wächst mithilfe von Licht, Luft, Erde und Wasser. Dabei entzieht es der Atmosphäre das Treibhausgas Kohlendioxid, das im Holz gebunden bleibt. So helfen die Pappelbäume aus den Versuchspflanzungen nicht nur, Weizen, Roggen und Co vor den Folgen des Klimawandels zu schützen – sondern auch, diesen weiter einzudämmen. ■

Die Carbonfaser-Revolution

Forschende des Fraunhofer IAP haben eine Kohlenstofffaser aus Zellulose entwickelt, die sich dank hoher Funktionalität für eine Vielzahl von Einsatzgebieten empfiehlt.

Von Beate Strobel

Die Neuerfindung der Carbonfaser beschäftigt Dr.-Ing. Jens Erdmann, Faserexperte am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam, seit mehr als einem Jahrzehnt. Ein Vorhaben von nahezu historischer Bedeutung: »Seit gut 50 Jahren arbeitet die Wissenschaft daran, eine wettbewerbsfähige Carbonfaser aus biogenen Rohstoffen zu entwickeln«, erzählt der Materialwissenschaftler. Jetzt endlich ist es so weit: Erdmanns Forschungsteam ist es gelungen, eine hoch funktionale Carbonfaser auf der Basis von Zellulose herzustellen.

Doch warum überhaupt etwas neu erfinden, das sich seit den 1950er-Jahren zum Liebling der industriellen Produktion hochgearbeitet hat? Die traditionelle Carbonfaser ist schließlich so etwas wie die eierlegende Wollmilchsau unter den Werkstoffen: Sie ist leicht, extrem stabil und zugleich äußerst widerstandsfähig gegenüber Temperatur und Chemikalien. Verbundwerkstoffe aus Carbonfasern ergeben Hochleistungsmaterialien, die mit großer Robustheit gegenüber Zug, Druck, Biegung und Schlägen auch unter anspruchvollsten Einsatzbedingungen punkten. Carbonfasern, die durch Pyrolyse von organischen Pechen hergestellt werden, besitzen zudem außerordentlich hohe elektrische und Wärmeleiteigenschaften. Entsprechend vielfältig sind ihre Einsatzmöglichkeiten.

Multitalent Zellulose als ideale Ausgangsbasis

Die fossil basierte Kohlenstofffaser hat aber auch ihre Schattenseiten. Denn als Vorläufermaterial – im Fachjargon: Präkursor – setzt die Industrie zu 95 Prozent auf das erölbasierte Polymer Polyacrylnitril (PAN), das in einem höchst energie- und ressourcenintensiven Prozess zu Carbonfasern verarbeitet wird. Pro Tonne Carbonfasern entstehen dabei bis zu 20 Tonnen Kohlendioxid – das entspricht in etwa den jährlichen CO₂-Emissionen von zwei Bundesbürgern. Und: Das von der Carbon-Industrie verwendete PAN stammt vor allem aus den USA und dem asiatischen Raum – eine angesichts der geopolitisch wechselhaften Lage schwierige Rohstoffabhängigkeit.

Der Ansatz, die bislang verwendeten fossilen Ausgangsmaterialien durch Zellulose zu ersetzen, hat deshalb großen Charme: Als Hauptbestandteil pflanzlicher Zell-

wände ist das biogene Polymer nicht nur die in der Natur am häufigsten vorkommende organische Verbindung, sondern auch einer der wichtigsten natürlichen Speicher für Kohlenstoff. »Ein großer Vorteil der Zellulose ist jedoch ihre Eigenschaft, fadenbildend zu sein. Daraus hergestellte Spinnfasern haben eine erstaunlich hohe mechanische Stabilität – sie halten echt viel aus«, lobt Jens Erdmann. »Mir ist kein anderes biogenes Material bekannt, das sich auf so vielfältige Weise technisch nutzen lässt.« Zudem wäre die gesamte Zellulosewertschöpfungskette in Deutschland beheimatet: Zum einen ist Wald ausreichend vorhanden, zum anderen können Papier- und Zellstoffindustrie sowie Carbonfaser-Spinnereien ein passendes industrielles Umfeld bieten.

Für die sogenannte Carbonisierung, also die Umwandlung des gesponnenen Präkursors in hochmodulige (HM) Kohlenstofffasern, sind teilweise Temperaturen von über 2500 Grad Celsius nötig. So können flüchtige organische Bestandteile entfernt, ein hoher Kohlenstoffgehalt im Endprodukt erhalten und zugleich die mechanischen Eigenschaften erhöht werden. Das Forschungsteam von Jens Erdmann hat für Zellulose als Präkursor ein Produktionssystem entwickelt, das mithilfe geeigneter Katalysatoren und Additive die Carbonisierungstemperatur um bis zu 1000 Grad Celsius senkt, den Prozess trotzdem beschleunigt und die Ausbeute von 15 auf bis zu 45 Prozent Gewichtsprozente erhöht. Die Forscher machen sich dabei zunutze, dass die aus Zellulose gesponnenen Fäden nahezu schwammartig notwendige Additive und Katalysatoren aufsaugen können. So lässt sich die Faser für den späteren Carbonisierungsprozess zielgerichtet optimieren.

Rund, elliptisch, nieren- bis blütenförmig

Durch Anpassung des Spinnprozesses sowie von Parametern wie Temperatur, mechanische Vorstreckung und Verweilzeit während der anschließenden Carbonisierung gelang es den Forschenden am Fraunhofer IAP, biobasierte, ultradünne Carbonfasern mit einem Durchmesser von deutlich unter vier Mikrometern zu erreichen – das entspricht beinahe einer Halbierung des Durchmessers

üblicher Kohlenstofffasern. Aber auch von der Formenvielfalt der zellulosebasierten Fasern ist Jens Erdmann begeistert: »Rund, elliptisch, nierenförmig, lobuliert, also nahezu blütenförmig – mit unseren speziellen Spinntechniken lassen sich die unterschiedlichsten Geometrien und inneren Strukturen realisieren.«

Und das wiederum, so der Materialwissenschaftler, ermögliche die passgenaue Herstellung von Fasertypen für die unterschiedlichsten Anwendungen: etwa im Leichtbau, in der Luft- und Raumfahrt, Verteidigungstechnik, Robotik, in Windkraftanlagen oder Medizin, bei der Abschirmung sensibler Elektronik oder als Komponente in Batterien und Brennstoffzellen. Erdmann: »Unsere biogenen Carbonfasern besitzen mechanische Eigenschaften auf dem Niveau von PAN-basierten Hochleistungs-Carbonfasern. Zugleich zeigen sie eine elektrische und thermische Performance, wie man sie von pechbasierten Fasern kennt.« Das Interesse an nachhaltigen Materialien wachse, konstatiert Jens Erdmann. »Doch ökologische

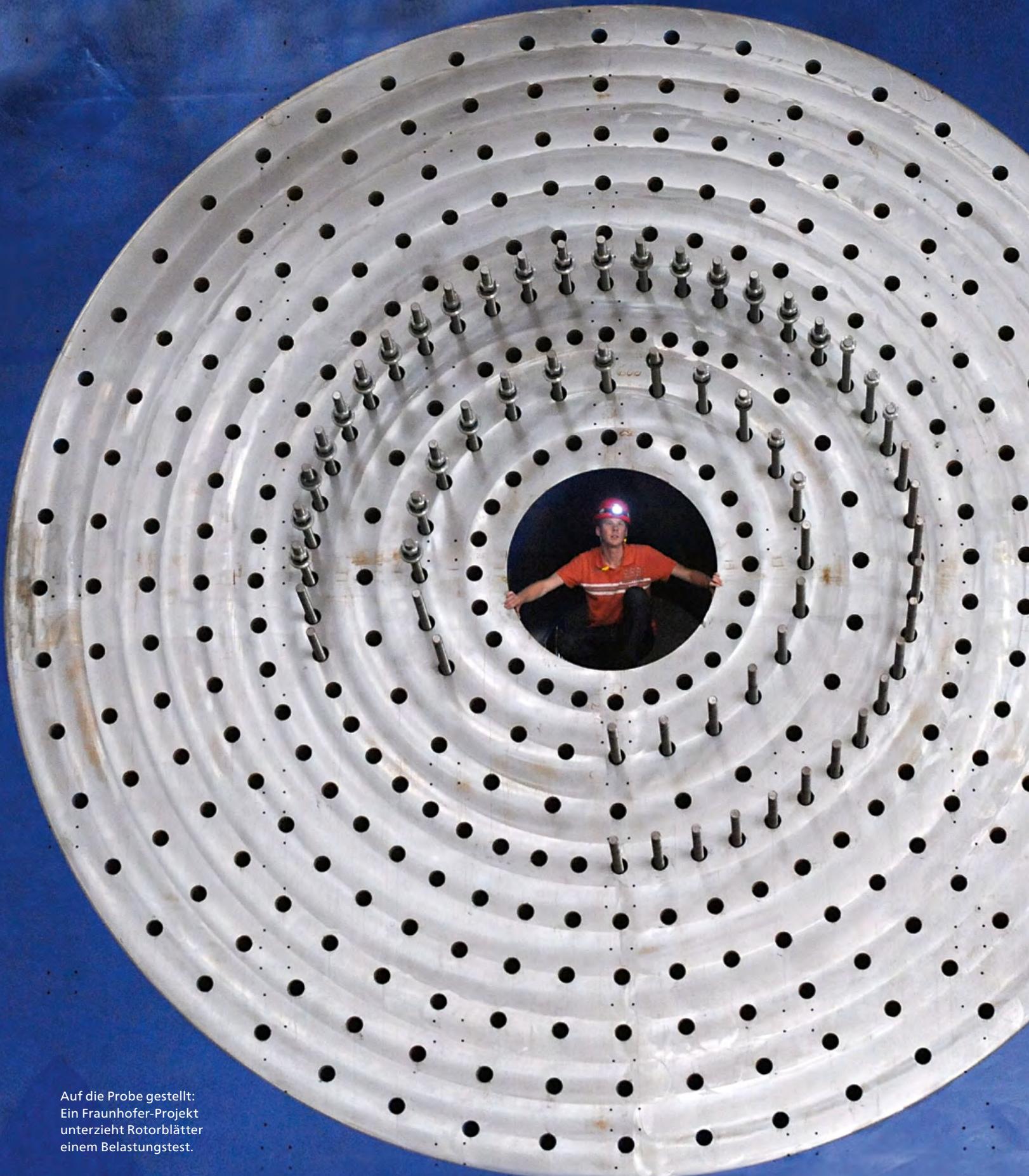
Vorteile allein reichen nicht aus, um sich am Markt zu behaupten – auch die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit muss überzeugen.«

Entsprechend häufen sich beim Fraunhofer IAP nun die Anfragen von Carbonfaser-Anwendern, wann die Zellulose-Fasern denn verfügbar wären. »Doch die verarbeitende Industrie benötigt das neue Fasermaterial mindestens im Kilogramm-Maßstab. Das können wir mit Labortechnologien allein nicht stemmen«, erklärt Jens Erdmann. Die Produktionstechnologie soll deshalb in der »Carbon Lab Factory Lausitz« in Guben sowie Boxberg (Lausitz) in den Pilotmaßstab überführt werden – eine länderübergreifende Initiative von Brandenburg und Sachsen in Kooperation mit der TU Chemnitz und der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Die bis zu 90 Meter langen Anlagen werden den gesamten Wertschöpfungsprozess vom Rohstoff über die Carbonfaser-Produktion bis hin zum Bauteil abbilden – und damit als Brücke zur industriellen Skalierung fungieren. ■

»Ökologische Vorteile allein reichen nicht aus – auch die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit muss überzeugen.«

Dr.-Ing. Jens Erdmann, Fraunhofer IAP

Hauchdünn und leistungsstark:
Die biobasierten Carbonfasern des Fraunhofer IAP können Durchmesser von deutlich unter vier Mikrometern erreichen.



Auf die Probe gestellt:
Ein Fraunhofer-Projekt
unterzieht Rotorblätter
einem Belastungstest.

Flügel mit Feingefühl

Windenergieanlagen zu warten und mögliche Schwachstellen zu erkennen, ist teuer und aufwendig, besonders bei Offshore-Anlagen. Fraunhofer-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler entwickeln eine Lösung, um gefährliche Schäden frühzeitig aus der Ferne zu erlauschen.

Von Yvonne Weiss

Es könnte mit einem Riss beginnen. Würde er im faserverstärkten Kunststoff des Rotorblatts unbemerkt weiterwachsen, könnte er Ausfälle und teure Reparaturen einer Windenergieanlage verursachen. Vor allem Offshore-Windparks sind betroffen, da sie im Meer besonders starken Winden, Regen und Unwettern ausgesetzt sind.

Um solche Schäden rechtzeitig zu identifizieren, werden Windenergieanlagen regelmäßig inspiziert und gewartet. Ist ein Schaden bereits weit fortgeschritten, sind Reparaturen meist umfangreich und nicht immer an Ort und Stelle möglich: Blätter müssen daher mitunter komplett ausgetauscht werden. Je nach Blatt und Schadensfall können sich die Kosten so auf mehrere hunderttausend Euro belaufen.

Nach einer Lösung fahnden Forschende des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS und für Windenergiesysteme IWES: »Mithilfe von Körperschallsensoren möchten wir verborgene Schäden in Rotorblättern frühzeitig zuverlässig erkennen und aus der Ferne überwachen«, sagt Björn Zeugmann, Gruppenleiter am Fraunhofer IIS im Bereich analoges integriertes Schaltungsdesign. »So wollen wir dazu beitragen, die Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit von Windenergieanlagen sicherzustellen.«

Die Sensoren, die von innen auf die einzelnen Rotorblätter geklebt werden, nehmen Schallwellen auf, die durch die Struktur der Blätter wandern. Besonders herausfordernd ist dabei das Material der Rotoren: Anders als etwa bei einem Stahlträger ist es nicht homogen, da Rotorblätter aus unterschiedlichen Schichten bestehen.

Für den Einsatz in den Körperschallsensoren haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer IIS einen neuen Chip entwickelt. Er erfasst sogenannte Oberflächenwellen, die im Falle eines Schadens entstehen. Diese Signale übermittelt das System anschließend via Mobilfunk.

Die Besonderheit an der neuen Entwicklung: Anders als bei herkömmlichen Messverfahren wie Radarsystemen oder Drohnen, die eine Vielzahl von Rohdaten aufnehmen und versenden, überträgt der Chip der Dresdner Forschenden ausschließlich auffällige Informationen: »Wir nutzen ein akustisches System, das Schäden anhand ihrer Geräusche erkennt«, erklärt Björn Zeugmann. »So kann es etwa einen Riss, der gerade im Inneren des Blatts entsteht, von einem Bruch unterscheiden.«

Diese akustische Lösung haben die Forschenden bereits in einem vorherigen Projekt entwickelt. Da ausschließlich relevante Merkmale übertragen werden, lässt sich das Datenaufkommen deutlich reduzieren – was deren Transfer via Mobilfunk überhaupt erst möglich macht. Zeugmann: »Unser Chip lauscht permanent – und kann potenzielle Schäden somit idealerweise noch im Rotorblatt klassifizieren und übermitteln.«

So soll sich künftig nicht nur feststellen lassen, ob überhaupt ein Schaden aufgetreten ist – auch die Beobachtung bestehender Risse über einen längeren Zeitraum hinweg ist denkbar. Deutet das aufgezeichnete Geräusch darauf hin, dass sich der Schaden verschlimmert hat, können Technikerinnen und Techniker ihn gezielt beheben. Teure Servicemissionen werden damit vermieden, Ausfallzeiten minimiert.

Ein Prototyp des neuen Chips ist bereits im Einsatz. Im Nachfolgeprojekt, das seit Juni läuft, möchte das Team das Gesamtsystem ausbauen und künftig auch Blitzschläge und deren mögliche Folgen erkennen können. Das ist bisher nicht machbar, gerade für Windparks im Meer ist diese zusätzliche Information jedoch entscheidend.

Björn Zeugmann freut sich über den bisherigen Erfolg der neuen Technologie: »Mich fasziniert, in einem Zukunftsfeld wie der Energiewende täglich zu sein – und damit einen Mehrwert für die Gesellschaft zu schaffen.« ■



ÖSTERREICH

Holz besser befördern

Um Holztransporte effizienter, flexibler und nachhaltiger zu gestalten, hat Fraunhofer Austria gemeinsam mit Industrie- und Logistikpartnern einen digital vernetzten Container entwickelt. Das standardisierte Abrolltransportsystem (ACTS) befördert erstmals sowohl Rundholz als auch andere Holzprodukte wie Hackgut und lässt sich intermodal zwischen Straße und Schiene einsetzen. Im Gegensatz zu herkömmlichen, zeitaufwendigen Verfahren ermöglicht es das Umladen zwischen Lkw und Güterwagen ohne zusätzlichen Ladekran in wenigen Minuten. Dadurch wird die Beförderung auf der Schiene bereits ab 140 Kilometern wirtschaftlich rentabel, Transporte lassen sich besser kombinieren und Leerfahrten um fast die Hälfte reduzieren. Moderne Sensorik erfasst das Ladege wicht bereits im Wald und vermeidet so Überladungen. Intelligente IoT-Technologie ermöglicht zudem die Echtzeit-Verfolgung der Container-Position. Um zusätzliche praxisnahe Daten zu gewinnen, muss das System weiter getestet werden. Hierfür werden noch interessierte Anwendungspartner gesucht.



Das Umladen von einzelnen Baumstämmen auf die Bahn ist zeitaufwendig. Die Lösung: ein innovativer Container.

Fraunhofer international



SCHWEIZ

Gleitspaß auf Kunststoff

Steigende Energiekosten und der Klimawandel machen klassische Eisbahnen zunehmend unwirtschaftlich. Eine nachhaltige Alternative hat das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg gemeinsam mit der Glice AG aus Luzern entwickelt: synthetisches Eis, dessen Gleiteigenschaften dem von gefrorenem Wasser in nichts nachstehen.

Dazu analysierte das Fraunhofer IWM mit einem eigens konstruierten Eisgleitsimulator die Reibungskräfte zwischen Kufe und Kunsteis und leitete daraus optimale Materialrezepturen

Eisbahnen sind gewaltige Energiefresser – und damit klimaschädlich.



sowie Oberflächenstrukturen ab. Das Ergebnis sind Kunststoffplatten aus veredeltem Polyethylen und einer Oberflächenschicht mit ultraniedrigem Widerstand, auf denen sich Schlittschuhläufer ebenso leicht bewegen wie auf echtem Eis.

Die Platten haben eine Verwendungsdauer von rund zehn Jahren je Seite und benötigen weder Wasser noch Kühlmittel – ein Gewinn für Umwelt und Betreiber. Das innovative, robuste Material könnte künftig auch giftige PFAS im Maschinenbau ersetzen.



SPANIEN

Deutsch-spanische Allianz für biomedizinische Innovation

Das neue Fraunhofer Center for Applied Theranostic (Fraunhofer CAT) in Barcelona will die personalisierte Medizin maßgeblich voranbringen. Ziel der Forschenden ist es, innovative Technologien zu entwickeln, die die Diagnostik, Prognose und Therapiewahl unterstützen und so eine Präzisionsmedizin ermöglichen. Das Fraunhofer CAT fungiert unter dem Dach der Fraunhofer Spain Research Foundation als Schnittstelle zwischen Forschungslabors, Kliniken und der Biotech-Industrie. Die Leitung des Zentrums übernimmt Prof. Josep Samitier. Der renommierte Wissenschaftler ist Direktor des Institute for Bioengineering of Catalonia IBEC

sowie Professor an der Fakultät für Elektronik und Biomedizinische Technik der Universität Barcelona. Zuwendungsgeber sind die Fraunhofer-Gesellschaft, die spanische Regierung, die Regionalregierung von Katalonien und der Stadtrat von Barcelona.



Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft (2. v. r.), mit spanischen und katalanischen Regierungsvertreterinnen und -vertretern in Barcelona.



EUROPA

Mit Verstärkerchips zu präziseren Wetterprognosen

Wettervorhersagen deutlich genauer machen und klimatologische Langzeitdaten verbessern will die MetOp-SG-Mission der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Der erste von sechs Satelliten wurde jetzt in eine erdnahen, polare Umlaufbahn gebracht. Mit an Bord: extrem rauscharme Verstärker-



Die MetOp-SG-Satelliten können sich an ihrem Lebensende selbst zerstören.

chips des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik IAF. Sie sind im Mikrowellenradiometer (MWS) verbaut, das Temperatur- und Feuchteprofile in verschiedenen Atmosphärenschichten misst, und basieren auf metamorphen High-Electron-Mobility-Transistoren (mHEMT). Deren besonders hohe Elektronenbeweglichkeit ermöglicht es, selbst sehr schwache Mikrowellensignale präzise zu verstärken. Die modernen Messtechnologien des Satelliten – darunter Infrarot- und Mikrowellensensoren sowie Instrumente zur chemischen Atmosphärenanalyse – erfassen innerhalb von 24 Stunden den gesamten Globus und liefern hochauflösende Daten zu Temperatur, Niederschlag, Wolkenbildung und Windverhältnissen.



USA

Antibiotikaresistenzen schnell nachweisen

An einem neuartigen Schnelltestverfahren, das Antibiotikaresistenzen innerhalb weniger Minuten statt nach mehreren Stunden nachweist, arbeiten Forschende des Fraunhofer USA Center for Manufacturing Innovation CMI in Boston in Zusammenarbeit mit den Fraunhofer-Instituten für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB sowie für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS. Die Plattform μ FLOWDx analysiert, ob Bakterien aus Patientenproben auf Antibiotika ansprechen. Dazu werden die Erreger auf speziellen Oberflächen in einer mikrofluidischen Zelle fixiert und mit Wirkstoffen in Kontakt gebracht. Hochempfindliche optische Sensoren auf Basis fluoreszierender Kohlenstoffnanoröhrchen messen in Echtzeit, wie die Bakterien reagieren. Anhand ihrer metabolischen Stressreaktionen – messbarer Veränderungen im Stoffwechsel infolge der Antibiotikawirkung – identifiziert das System rasch, welche Substanzen wirksam sind. Ziel ist, Fehldiagnosen zu vermeiden, gezielter zu therapieren und so Todesfälle, Komplikationen sowie lange Krankenhausaufenthalte zu reduzieren.



Sehen hübsch aus, sind aber im Blut lebensgefährlich: MRSA-Bakterien.

Ein Helm für den schlanken Fußabdruck

Fraunhofer-Forschende haben einen Fahrradhelm aus recycelbarem Biokunststoff entwickelt. Doch ihr wahres Ziel ist sehr viel größer.

Von Beate Strobel

Die Geschichte des Fahrradhelms, wie wir ihn heute kennen, beginnt in den 1960er-Jahren im Keller der Familie Trott in der nordrhein-westfälischen Stadt Radevormwald. Dort entwickelt der Polizist Karl-Heinz Trott aus Sorge um die Unversehrtheit seiner Söhne – allesamt Amateur-Radrennfahrer – den sogenannten »Trott-Helm«. Angelehnt an das Prinzip Bauhelms, bestand dessen Schale aus Kunststoff, geliefert vom örtlichen Spielwarenhersteller. Innen gewährleistete eine spinnennetzartige Konstruktion zumindest einen Minimal-Abstand zwischen Helmschale und Kopf und damit eine winzige Knautschzone im Fall eines Sturzes. Wer es luftiger wollte, bohrte kleine Löcher in die harte Außenhülle.

Während der »Trott-Helm« den Look einer ausgehärteten Badekappe besaß und vielleicht auch deshalb irgendwann vom Markt verschwand, hat der Fahrradfahrer heute die Qual der Wahl zwischen einer Vielzahl von Modellen. Ähnlich vielfältig sind allerdings auch die verwendeten Materialien: Polycarbonat für die äußere Schale, Polystyrolschaum für den Kern, Polypropylen für Anbauteile wie den Schirm und Nylon für die Gurte. »All diese unterschiedlichen, fossil basierten Kunststoffe werden in der Helmherstellung untrennbar miteinander verbunden und lassen sich am Ende der Nutzungszeit nicht mehr separieren«, erklärt Chemie-Ingenieur Janne-

Constantin Albrecht vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT in Pfinztal bei Karlsruhe. Der Materialmix macht ein Recycling des Produkts nahezu unmöglich. In der Regel landen ausgediente Helme deswegen in der Müllverbrennungsanlage – und vergrößern so den ökologischen Fußabdruck einer Sportart, die eigentlich als sehr umweltfreundlich gilt.

Material mit großem Gestaltungspotenzial

Im Projekt PIMMS hat sich Albrecht mit seinem Team und gefördert von der Fraunhofer-Zukunftsstiftung zum Ziel gesetzt, einen Fahrradhelm aus einem einzigen Material zu entwickeln und so die Kreislauffähigkeit des Produkts zu gewährleisten. Im Zentrum der Helm-Innovation steht ein Kunststoff, der schon per se umweltfreundlich ist, da er aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird: Polylactid (PLA), auch bekannt als Polymilchsäure, wird in der Regel aus Maisstärke oder Zuckerrohr gewonnen und zählt damit zu den biobasierten Kunststoffen. Dank des Verzichts auf fossile Quellen wie Erdöl und der hohen Kreislauffähigkeit besitzt PLA einen deutlich kleineren Materialfußabdruck als klassische Kunststoffe – und das bei vergleichbaren technischen Eigenschaften. »Für PLA spricht außerdem, dass seine Verfügbarkeit sehr gut ist«, betont Janne-Constantin Albrecht: »Ideale Aus-



gangsvoraussetzungen für den Transfer in die Wirtschaft!«

In der anderthalbjährigen Projektzeitweiteten die Fraunhofer-Forschenden in Kooperation mit mehreren Industrieunternehmen das Formen-Portfolio von PLA drastisch aus und entwickelten Partikelschäume, Tiefziehfolien, Fasern und Verbundwerkstoffe weiter, die ausschließlich aus PLA bestehen. Eine erhebliche Leistung, denn wenn beispielsweise die Außenhülle und der schützende Innenschaum aus demselben Biopolyester bestehen, werden diese Teile auch bei den gleichen Temperaturen weich, was die Verarbeitung sehr viel komplizierter macht. Albrecht: »In die Lösung, wie wir alle Komponenten miteinander verbinden, ohne dass sie ihre



Runde Sache: 3000 Menschen formten 2023 im chilenischen Santiago ein Fahrrad, um so ins »Guinness-Buch der Rekorde« zu kommen. Helme trugen sie dabei nicht – nur Kappen ...

Form verlieren, ist einiges an Prozess-Know-how eingeflossen.«

Der so entstandene PLA-Helm hat bereits die ersten Materialtests hinsichtlich Dämpfung und Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen bravurös bestanden. Auch den noch ausstehenden Crashtests in einem externen Prüflabor blickt Janne Constantin Albrecht gelassen entgegen: »Vorversuche haben bereits gezeigt, dass unsere Variante den klassischen Fahrradhelmen hinsichtlich Schutz und Sicherheit in nichts nachsteht.« Besonders erfreulich sind aber die Ergebnisse der Lebenszyklus-Analyse des PLA-Kopfschutzes: »Unser Monomaterial-Helm besitzt einen um 66 Prozent kleineren ökologischen Fußabdruck«, freut sich Albrecht.

Denn der Helm aus Biokunststoff kann am Ende seiner Nutzungszeit einfach geschreddert, das PLA zu Granulat verarbeitet und erneut verwendet werden.

Vom Helm über das Surfboard zum Auto

Während nun erste Verhandlungen mit potenziellen Herstellern laufen, denkt Albrecht bereits einen Schritt weiter. »Der Helm dient vor allem als Beleg dafür, dass viele andere Multimaterialprodukte auch als kreislauffähige Monomaterial-Variante denkbar wären«, erklärt der Fraunhofer-Ingenieur – und das ohne großen Investitionsaufwand seitens der Industrie, da für das Material die gleichen Maschinen und

»Der ökologische Fußabdruck unseres Monomaterial-Helms ist um 66 Prozent kleiner.«

Janne Constantin Albrecht,
Fraunhofer ICT

Werkzeuge verwendet werden können wie für herkömmlichen Kunststoff.

Als nächstes Produkt hält Albrecht beispielsweise ein Surfboard aus PLA für spannend. Aber auch Autositze ließen sich komplett aus dem Biokunststoff herstellen: »Denkt man etwa an die Altfahrzeugrichtlinie der EU, die eine deutliche Erhöhung der Wiederverwertungsrate von Kraftfahrzeugen anmahnt, werden solche Innovationen dringend benötigt.« Vor allem für die im Fraunhofer ICT entwickelte Schaum-Variante aus PLA sieht Albrecht große Chancen: »Ob Dämmstoffe, Transportboxen oder Verpackungsmaterial: Eigentlich alle Produkte, bei denen aktuell das klassische Styropor verwendet wird, ließen sich auch aus PLA herstellen.« ■



Sattes Grün:

Gerade im Sommer
sind Bäume wertvolle
Schattenspender.

Im grünen Bereich

Umgestürzte Bäume verursachen nicht nur bei der Bahn Jahr für Jahr zahlreiche Störungen. Mit ihrem intelligenten Laserscanner machen Fraunhofer-Forschende Verkehrswege sicherer.

Von Yvonne Weiß

Der Asphalt? Heiß. Die Luft? Staubig. Das Sonnenlicht? Gleißend. Der Sommer zeigt es überdeutlich: Ohne Bäume würde die Lebensqualität besonders in Städten rapide sinken. Sie produzieren Sauerstoff, filtern Schadstoffe aus der Luft, dämpfen Straßenlärm und bieten Lebensraum für Insekten, Vögel, Eichhörnchen. Außerdem spenden sie Schatten – und tragen natürlich zur Kühlung von Gehwegen und Gebäuden bei.

Trockenheit allerdings gefährdet Bäume – und macht sie gefährlich. Umgekippte Bäume und herabfallende Äste verursachten, zusammen mit Böschungsbränden und Hochwassereignissen, im Jahr 2022 mehr als 8000 Störungen bei der Deutschen Bahn – Tendenz steigend.

Forschende des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik IPM und der Universität Freiburg arbeiten im Projekt TreeVitaScan daran, geschwächte Bäume zuverlässig zu erkennen und Verkehrswege sicherer zu machen. »Wir haben einen multispektralen Laserscanner entwickelt, in dem nicht nur eine, sondern zwei Wellenlängen zum Einsatz kommen«, erklärt Prof. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter am Fraunhofer IPM. »So können wir neben Abstandsmessungen auch die Trockenheit eines Baums ermitteln – und damit einen wichtigen Parameter für die Abschätzung der möglichen Umsturzgefahr bestimmen.«

Bisher ist Verkehrssicherheit Handarbeit: Zuständige der jeweiligen Gemeinde spannen ein Seil um den betreffenden Stamm und ziehen mit einer vorgegebenen Kraft daran. Die Neigung des Baums soll Aufschluss über seinen Gesundheitszustand geben – und damit über die mögliche Gefahr eines Sturzes. Mit einem GPS-Empfänger werden die getesteten Exemplare anschließend manuell kartiert und in bestehende Baumkataster integriert.

Die intelligente Lasertechnologie von Alexander Reiterer und seinem Team soll dieses Prüfverfahren nun ersetzen: »Der multispektrale Laserscanner ist Teil einer Dachbox, die auf Testfahrzeugen angebracht ist und im Vorbeifahren jeden Baum am Straßenrand automatisch erfasst, dessen Feuchtegehalt misst und so Aufschluss über seine Gesundheit gibt«, so Reiterer. »Unser langfristiges Ziel ist ein kompletter Vegetationskataster: Eine Art Google-Maps-Karte also, die für jeden Baum das Risiko eines potenziellen Sturzes anzeigt.«

Dafür wird, wie auch bei einer herkömmlichen Laser-Abstandsmessung, von der Laserquelle zunächst ein Lichtstrahl auf einen rotierenden Spiegel und anschließend aus der Dachbox nach außen gesendet. Die Kombination aus kreisendem Laserstrahl und fahrendem Fahrzeug erzeugt anschließend eine Licht-Helix, die die Umgebung entlang des Autos abtastet.

Die beiden unterschiedlichen Wellenlängen, die im neuen Scanner zum Einsatz kommen, liefern die entscheidenden Informationen: »Je nach Wellenlänge wird Laserlicht von Wasser absorbiert, reflektiert oder gestreut«, erklärt Reiterer. »Beleuchten wir eine feuchte Oberfläche etwa mit zwei unterschiedlichen roten Wellenlängen, von denen eine von Wasser reflektiert und die andere absorbiert wird, können wir messen, wie viel des jeweiligen Lichts zurückkommt – aus dem Verhältnis schließen wir, wie feucht eine Tunnelwand, eine Fassade, ein Baum ist.«

Da sich sowohl Spiegel als auch Fahrzeug bei der Messfahrt bewegen, müssen sich beide Wellenlängen perfekt überlagern; nur so lässt sich selbst aus 100 Metern Entfernung noch exakt derselbe Punkt auf dem Objekt treffen. Daran feilen die Forschenden aktuell. Ein Messsystem ist bereits gebaut, erste Testfahrten in Freiburg laufen.

Langfristig planen Reiterer und sein Team zudem, den Feuchtescanner in ein Sensorsystem zu integrieren, das vom Fraunhofer IPM in einem separaten Projekt entwickelt wird und die Größe von nur zwei Schuhkartons hat. Mithilfe von Künstlicher Intelligenz ermöglicht dieses System eine vollständige Echtzeit-Auswertung von Laserscanner-, Kamera- und GPS-Daten innerhalb der Messbox. Damit könnte künftig nicht nur der Zustand von Bäumen in Sekundenschnelle automatisiert analysiert werden. Es ließen sich auch feuchte Stellen in Tunneln, Brücken oder Asphalt noch effizienter detektieren – und gefährliche Risse rechtzeitig entdecken. Und die Infrastrukturüberwachung? Die wäre deutlich einfacher.

Die Anwendungsbereiche sind laut Alexander Reiterer vielfältig, das Potenzial groß: »Mich begeistert, dass wir mit unserem neuen Verfahren pro Sekunde etwa zwei Millionen Messpunkte ermitteln und dabei nicht nur Geometrie, sondern andere Parameter bestimmen können – damit erreichen wir im Bereich der bisherigen Laserscanner-Technologie einen gewaltigen Fortschritt.« ■



EEG ohne »Badekappe« und Kabelsalat:
Mit innovativen Klebe-Elektroden kann
die Hirnaktivität auch über längere Zeit
im Alltag gemessen werden.

Unter Strom

Seit gut 100 Jahren erlaubt das EEG
erstaunliche Einblicke in unser Gehirn.
Jetzt wird das Elektroenzephalogramm
mobil – und ermöglicht die Diagnostik
von Schlafstörungen und neurologischen
Erkrankungen auf einem neuen Level.

Von Dr. Sonja Endres

Auf der Suche nach einem Zusammenhang zwischen Gefühl und Gehirnaktivität gelang es dem Jenaer Psychiater Hans Berger 1924 erstmals, elektrische Ströme in der Hirnrinde zu messen. 100 Jahre später macht es Fraunhofer-Technik möglich, das sogenannte Elektroenzephalogramm, kurz EEG, auch bequem unter Alltagsbedingungen einzusetzen – und damit ganz neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Die elektrischen Signale im Gehirn entstehen, wenn zerebrale Nervenzellen Reize weitergeben. Mit Elektroden lassen sie sich von der Kopfhaut ableiten und als Kurve darstellen. Form, Frequenz und die Höhe der Wellen zeigen charakteristische Muster, zum Beispiel bei geschlossenen Augen oder bei Denkaufgaben.

Das EEG ermöglicht uns zu verstehen, wie wir lernen, denken oder unsere Umwelt wahrnehmen. Auch für die Diagnostik und Therapie von neurologischen Erkrankungen oder Schlafstörungen ist es unverzichtbar – ein Forschungsschwerpunkt von Dr.-Ing. Karen Insa Wolf. Die Gruppenleiterin Mobile Neurotechnologien am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT erklärt: »Was das EEG auszeichnet, ist, dass wir damit dem Gehirn live beim Arbeiten zusehen können.« Mithilfe moderner bildgebender Verfahren wie Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT) lässt sich zwar besser erkennen, wo genau etwas im Gehirn passiert. »Aber es gibt immer eine Verzögerung – und die haben wir beim EEG nicht.«

Darüber hinaus sind EEG-Systeme nicht nur wesentlich günstiger als CT-Scanner oder MRT-Geräte, die je nach Ausführung das Zwei- bis Dreihundertfache kosten können, sondern haben auch einen weiteren und entscheidenden Vorteil: Sie lassen sich zunehmend mobil einsetzen – vor allem dank miniaturisierter Elektronik und innovativen, flexiblen Klebe-Elektroden, die auch bei Bewegung zuverlässig funktionieren. Wolf: »Jeder denkt bei EEG an diese typischen Badekappen, aus denen wild Kabel wachsen. Obwohl

solche Apparate nach wie vor in Kliniken für bestimmte Anwendungen notwendig sind, gibt es inzwischen Alternativen, die sich für die Langzeitbeobachtung im Alltag oder im Schlaf eignen.«

Wolf und ihr Team haben unauffällige EEG-Systeme entwickelt, die mit nur wenigen kleinen Klebe-Elektroden hinterm Ohr und im Gesicht auskommen, guten Tragekomfort bieten und trotzdem eine hohe Datenqualität erzielen. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung gegenüber den helmarti-

parameter kontaktlos erfassen, ließe sich auf oft wenig erholsame Aufenthalte im Schlaflabor, Verkabelungen oder störende Technik am Körper verzichten. »Unsere Systeme bieten nicht nur Bewegungsfreiheit und mehr Komfort, sondern sorgen auch für eine bessere Datenqualität, denn sie erfassen den natürlichen Schlaf in der vertrauten Umgebung«, betont Wolf. Die Aussagekraft der im Schlaflabor gemessenen Daten ist diesbezüglich eingeschränkt, weil wegen der vielen Kontakt-sensoren nur wenige Menschen dort so gut schlafen können wie im eigenen Bett.

Ergänzt werden die innovativen Klebe-EEG-Systeme durch Künstliche Intelligenz. Die Forscherinnen und Forscher trainieren KI-Algorithmen, die charakteristische Muster identifizieren und Schlafphasen bestimmen können. Für die Analyse der großen Datenmengen, wie sie beim mobilen Langzeitmonitoring entstehen, ist KI unverzichtbar – insbesondere dann, wenn die Interpretation der Signale anspruchsvoller ist als beim Schlaf-EEG, wo äußere Einflüsse begrenzt sind und Interpretationsregeln bekannt.

Profitieren könnten davon unter anderem Epilepsie-Patientinnen und -Patienten. Das Anfallsgeschehen als entscheidendes Kriterium für die individuelle Therapieplanung ließe sich mithilfe von mobiler Sensorik am Ohr im Alltag erfassen. Zur automatisierten Anfallserkennung trainieren Wolf und ihr Team KI-basierte Algorithmen. Die exakt aufgezeichneten Signale zum Zeitpunkt der Attacke helfen dabei, die Epilepsie-Erkrankung besser zu verstehen und die medikamentöse Behandlung individuell abzustimmen. Das Ziel ist, die Anfälle zu verhindern oder zumindest ihre Häufigkeit zu reduzieren und die Nebenwirkungen der Medikamente gleichzeitig zu beschränken. Auch Frühwarnsysteme könnte man auf Grundlage der gemessenen Daten entwickeln und die Betroffenen so beispielsweise vor Sturzverletzungen bewahren. Für die weitere Entwicklung solcher Systeme ist Wolf aktuell noch auf der Suche nach Partnern aus der Industrie. Sie ist überzeugt: »Wir werden durch das mobile EEG noch sehr viel lernen.« ■

»Was das EEG auszeichnet, ist, dass wir damit dem Gehirn live beim Arbeiten zusehen können.«

Dr.-Ing. Karen Insa Wolf

gen Trockenelektrodensystemen: Man muss keinen Druck ausüben, um die oft bürstenartigen Elektroden durch die Haare hindurch auf die Kopfhaut zu pressen, weil sich nur so eine ausreichend hohe Signalqualität erzeugen lässt. Häufig verursacht dies nach einer gewissen Zeit Kopfschmerzen. Ein 24-Stunden-EEG-Monitoring ist mit solchen Geräten kaum möglich – abgesehen davon, dass der Badekappen- bzw. Helm-Look wenig alltagstauglich ist.

Die neuen flexiblen EEG-Klebe-Elektroden aus dem Fraunhofer IDMT schränken den Träger oder die Trägerin kaum ein. Das ist unter anderem vorteilhaft für die Erstellung von EEGs zur Diagnostik von Schlafstörungen. Ziel ist es, Patientinnen und Patienten ein Schlaf-Monitoring zu Hause zu ermöglichen, mit Elektroden-Patches, die selbst aufgeklebt werden können. Ergänzt durch weitere Technologien aus dem Fraunhofer IDMT, die Vital-

Foto & Fraunhofer

Weggefischt

Fisch ist nicht nur für diese beiden Jäger überlebensnotwendig. Die schnell getaktete Nahrungs-kette brachte dem Fotografen Qingrong Yang eine Auszeichnung als »Wildlife Photographer 2025« ein. Weltweit gelten rund 800 Millionen Menschen als abhängig von Fischfang, -produktion und -verkauf. Neben Überfischung bedroht auch die Verschmutzung der Ozeane den Bestand. Zu den Hauptverursachern von Meeresmüll zählt die Fischereiindustrie: Etwa 29 Prozent aller Leinen sowie bis zu 40 Prozent der verwendeten Netze gehen Schätzungen zufolge im Meer verloren. Durch Abrieb und Verschleiß der Utensilien gelangen zudem große Mengen Mikroplastik in die Ozeane.

Um die Umweltbelastung im Meer zu reduzieren, entwickelt das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT gemeinsam mit Partnern im Projekt SEARULAR neue Materialien für Fischfanggeräte. Kreislauffähige Lösungen wie recyceltes Polyamid für Seile sowie biologisch abbaubare Grundschleppleinen und Lockbojen sollen helfen, das Mikroplastik im Meer zu verringern. Ein Managementsystem unterstützt zudem dabei, ausgediente Fischereiausrüstung fachgerecht zu recyceln. Mit dem Projekt wollen die Forschenden zu einer nachhaltigen Fischerei und einem gesunden Meeresökosystem beitragen.





Auf der Jagd:
Reiher schlagen
meist in den frühen
Morgenstunden zu.

Natürlich süß: Bei der Ernte enthalten Zuckerrüben bis zu 20 Prozent Saccharose.

Auf die Rübe gekommen

Einweg-Plastikgeschirr ist seit Juli 2021 in der EU verboten. Für Veranstaltungen wie Messen sind umweltfreundlichere Mehrweglösungen allerdings nicht immer geeignet. Fraunhofer-Forschende entwickeln kompostierbare Alternativen.

Von Yvonne Weiß



Plastikmüll verschmutzt die Weltmeere. Um die Menge zu reduzieren, hat die EU schon 2021 Kunststoffgeschirr, -besteck und -trinkhalme verboten. Das Problem: Umweltfreundlichere Mehrweglösungen eignen sich bei Veranstaltungen nur bedingt; Pappsteller sind oft nicht ausreichend stabil, außerdem bauen sie sich nur langsam wieder ab. An einer Alternative arbeiten Forschende des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI. Dr. Arne Schirp, Wissenschaftler am Fraunhofer WKI, beschreibt das Ziel so: »Wir entwickeln kompostierbares Einweggeschirr, das auf regional verfügbaren, pflanzlichen Reststoffen aus der Zuckerproduktion basiert.«

Aktuell befinden sich etwa 150 Millionen Tonnen Plastik in den Weltmeeren und bilden Müllstrudel wie den Great Pacific Garbage Patch im Nordpazifik, der etwa viermal so groß wie Deutschland ist. Ein weiterer Anstieg ließe sich dank des neuen Materials vermeiden, da es sich sowohl im Meerwasser als auch an Land vollständig abbaut.

Grundlage der neuen kompostierbaren Teller, Messer und Gabeln sind Rübenschitzel aus der heimischen Zuckerindustrie, die der Projektpartner Pfeifer und Langen bereitstellt.

Mehr als eine Million Tonnen des Reststoffs fallen bei der Rübenernte in Deutschland Jahr für Jahr an.

Bisher wird das Nebenprodukt nur eingeschränkt wiederverwendet, etwa für Tierfuttermittel. Arne Schirp sieht hier deutlich mehr Potenzial: »Gemeinsam mit natürlichen Polymeren wie Maisstärke oder Pektin aus Zuckerrüben bieten Rübenschitzel eine ideale Basis für kompostierbare, umweltfreundliche Einwegsteller und Besteck.«

Zusammen mit Weichmachern wie Wasser und Glycerin geben die Forschenden die Mischung aus Rübenschitzeln und natürlichen Polymeren in einen Compounder: In der Maschine lassen sich unterschiedliche Rohstoffe mischen und zu Granulat weiterverarbeiten. Nach dem Aufschmelzen werden die Stoffe zunächst zu Pellets zerkleinert. Anschließend werden diese zu Folien verpresst. Im letzten Schritt beschich-

ten die Forschenden die Folien – und formen sie um in Teller. Auch Messer und Gabeln sollen so zukünftig entstehen. Die aktuellen Entwicklungen finden im Rahmen des Projekts »Entwicklung von Einwegprodukten mit biobasierten Beschichtungen aus regionalen Agrarrestströmen der Lebensmittelindustrie« (EBRA) statt.

»**Natürliche Polymere haben den Vorteil**, dass sie keinen hohen, beziehungsweise teilweise gar keinen Schmelzpunkt haben«, so Schirp. »Aus ihnen können also wunderbar neue Werkstoffe entstehen – mit nur geringem Energieaufwand.«

Die Nutzung heimischer Reststoffe hält zudem Transportwege kurz, spart CO₂ ein und stärkt regionale Märkte. Die neuen Teller sollen in bestehenden Anlagen entstehen.

Auch das Material spricht für die Alternative: »In einem zwölfwöchigen Test konnten wir feststellen, dass sich die neuen Produkte stärker abbauen und somit höhere Masseverluste aufweisen als zum Beispiel konventionelle Pappsteller«, so Arne Schirp. Die Stoffe lassen sich also problemlos im hauseigenen Kompost entsorgen, gesundheitlich sind sie unbedenklich.

Aktuell feilen die Projektpartner an der optimalen Qualität des neuen Geschirrs: Grillgut wie Fleisch erfordert etwa eine ausreichende mechanische Stabilität der neuen Teller, fettige Lebensmittel wie Bratwürste sowie ölige Speisen wie Salate mit Dressing ein wasser- und fettresistentes Material. Eine biobasierte Beschichtung, die die RWTH Aachen als Projektpartner derzeit entwickelt, soll hier helfen.

Erste Prototypen der umweltfreundlichen Einwegsteller, die im Rahmen des Kompetenzzentrums zur Biologischen Transformation von Materialwissenschaft und Produktionstechnik (Bio4MatPro) entstehen, existieren bereits; gefördert wird das Projekt vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). Im nächsten Schritt wollen die Projektpartner die Produktion in den Industriemaßstab überführen und anschließend auf den Markt bringen. ■

»Wir entwickeln kompostierbares Einweggeschirr, das auf regional verfügbaren, pflanzlichen Reststoffen aus der Zuckerproduktion basiert.«

Dr. Arne Schirp,
Fraunhofer WKI

Alle Mann von Bord

Die EU will den Güterverkehr auf Binnenwasserstraßen bis 2030 um 25 Prozent steigern, um Straßen, Schienen und Umwelt zu entlasten. Kleine, autonom fahrende und emissionsfreie Schiffe könnten dafür die Lösung sein.

Von Laura Rottensteiner-Wick

Kleines Schiff mit großer Wirkung: Im EU-Projekt AUTOFLEX will Jonathan Weisheit gemeinsam mit einem internationalen Team derzeit ungenutzte alte Binnenwasserwege wiederbeleben und so die Binnenschifffahrt stärken. »Durch die Nutzung von kleineren Schiffen ließe sich das bestehende Wasserwege-Netz in unserem Untersuchungsgebiet in den Niederlanden zum Beispiel um etwa 45 Prozent erweitern«, erklärt der wissenschaftliche Mitarbeiter am Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML. Dass Weisheit ein guter Name ist für einen Wissenschaftler, hört er nicht zum ersten Mal. »Die Leute haben aber schnell hohe Erwartungen, wenn sie meinen Nachnamen erfahren«, scherzt der Küsten-Ingenieur, der außerdem noch gelernter Schiffsbauer ist. Die Mitentwicklung eines autonomen und emissionsfreien Binnenschiffs ist mit Sicherheit ein guter Schritt, um diesen Erwartungen gerecht zu werden.

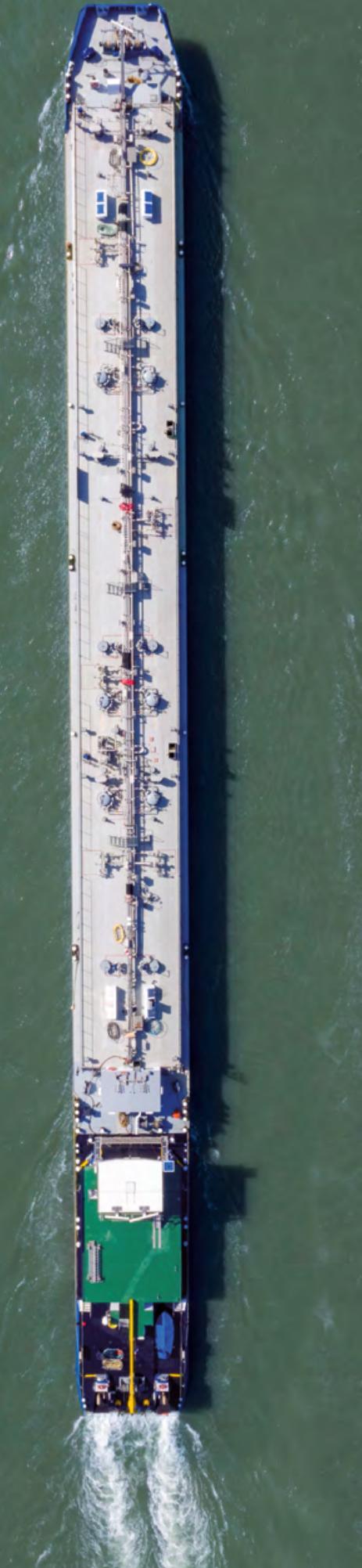
Ungenutzte Wasserstraßen wiederbeleben

»Vor allem im nordeuropäischen Binnenland gibt es viele historisch gewachsene Kanäle, die für die herkömmliche großvolumige Binnenfrachtschifffahrt wegen geringer Schleusenbreiten oder anderer Hürden nicht nutzbar sind«, so Weisheit. »Deshalb entwickeln wir ein modernes unbe-

Die EU will den Güterverkehr auf Binnenwasserstraßen bis 2030 um **25 %** steigern.

Wasser statt Straße: Vor allem die Niederlande, Frankreich und Belgien setzen auf die Binnenschifffahrt.



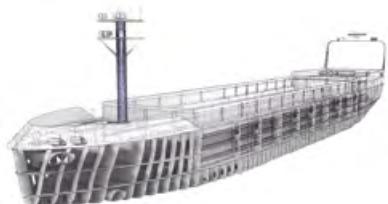


mannes Binnengüterschiff, das auch in kleinen Wasserstraßen, engen Gewässern und bei Niedrigwasserständen zuverlässige Transportleistungen erbringen kann und dabei die Umwelt weniger belastet als ein Lkw.« Bei Bedarf bietet das autonome Nullemissions-Schiff auch die Möglichkeit, kleinere Transportmengen zu befördern, während die traditionelle Frachtschifffahrt aus Emissions- und Kostengründen hauptsächlich auf sehr großes Transportvolumen ausgelegt ist. Der Lkw-Verkehr ließe sich so um circa zehn Prozent reduzieren. Als Schnittstellen zum Straßenverkehr werden dabei auch neue Verteilerknotenpunkte konzipiert.

Die Besonderheit der Schiffe: Sie sind mit 6,6 Metern Breite und 53 Metern Länge nicht nur erheblich kleiner und wendiger als gewöhnliche Binnenschiffe, sie fahren auch autonom – also unbemannt, was eine weitere Kostenersparnis bedeutet – und dabei elektrisch. Zwei der 24 Stellplätze für 20-Fuß-Standardcontainer, über die das Schiff insgesamt verfügt, sind daher für Batteriecontainer reserviert. »Theoretisch kann das Schiff also auch als mobiler Energiespeicher dienen«, beschreibt Weisheit eine mögliche Nebennutzung. Zusammen haben die Batterien eine Kapazität von 5,8 MWh.

Schiffsdesign veröffentlicht – Beginn der Testphase

Gestartet ist das Projekt Anfang 2024 mit einer Fördersumme von 4,5 Millionen Euro und einer Laufzeit von drei Jahren. »Wir befinden uns also aktuell etwa in der Halbzeit. Anfang Mai haben wir das Design des Schifffahrt, und auch die digitale Kartierung der verfügbaren Kanalnetze mit allen beeinträchtigenden Nadelöhlen wie Brückenquerungen, Schleusendurchfahrten, Tiefgang und Höchstgeschwindigkeiten ist weit fortgeschritten«, so Weisheit. Anstehende Herausforderungen liegen nun in der Weiterentwicklung der Geschäftsmodelle, der Gewährleistung der Cybersicherheit und der Testung des Entwurfs im Modellversuch in den Niederlanden und Belgien. »Für Ende 2026 planen wir in den Niederlanden die Demonstration einer autonomen Schleusendurchfahrt«, stellt Weisheit in Aussicht. In Deutschland nimmt die Binnenschifffahrt laut Statista mit rund sieben Prozent Anteil am Güterverkehrsaufwand bislang eine untergeordnete Rolle ein. Weisheit: »Höchste Zeit, das zu ändern.« ■



Das Modell für eine emissionsfreie und autonome Binnenschifffahrt steht bereit.

»Deshalb entwickeln wir ein modernes unbemanntes Binnengüterschiff, das auch in kleinen Wasserstraßen, engen Gewässern und bei Niedrigwasserständen zuverlässige Transportleistungen erbringen kann und dabei die Umwelt weniger belastet als ein Lkw.«

Jonathan Weisheit,
Fraunhofer-Center CML



Verteidigungsfähigkeit nachhaltig stärken

Die Bundeswehr will bei der Energieversorgung zunehmend auf erneuerbare Energien und Batterien setzen. Nachhaltigkeit und grüne Visionen sind dabei nur ein Nebeneffekt: Hauptziel ist die sichere, autarke und krisenfeste Energieversorgung.

Von Mehmet Toprak

Er verwandelt chemische in elektrische Energie und leistet seit mehr als 100 Jahren gute Dienste in der Industrie, im Bau- gewerbe, in Hotels, Rechenzentren oder Krankenhäusern: der Dieselgenerator, das nimmermüde Arbeitspferd des elektrischen Zeitalters.

Auch bei der Bundeswehr ist er unverzichtbar. Im Einsatz, etwa im Feldlager, liefert er Strom für Küche, Sanitäranlagen, Flutlicht, Kommunikations- und Fernmeldeanlagen. Jetzt aber gibt es Bestrebungen, dem Strom-Oldie moderne Helfer zur Seite zu stellen und ihn irgendwann sogar in Rente zu schicken.

Forschende des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT am Standort Pfintal arbeiten

an Stromspeichern auf Basis der Eisen/Eisen-Redox-Flow-Technik, die eine flexible Anpassung von Speicher- und Leistungsvermögen erlauben. Die Akkus entlasten die Generatoren bei Verbrauchsspitzen und senken den Dieselverbrauch. Aufgeladen werden die Batteriespeicher – so weit verfügbar – mit erneuerbaren Energien aus Photovoltaik und Windkraft.

Doch die Energiewende bei der Bundeswehr steht nicht nur im Zeichen der Nachhaltigkeit, sie dient in erster Linie einem Ziel: der Stärkung der Verteidigungsfähigkeit. Die Speichersysteme sollen die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen beenden, die Resilienz der Energieversorgung stärken und für mehr Flexibilität bei der Stromversorgung der Bundeswehr sorgen.

Suppe fassen:
Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier auf dem Truppenübungsplatz Weiden-Frauenricht. Essenszeiten sind klassische Verbrauchsspitzen, die die Stromversorgung im Einsatz herausfordern.

Laut und ineffizient

Dieselgeneratoren müssen gerade im Einsatz auf Verbrauchsspitzen ausgelegt sein. Sobald die Küche Hunderte Soldaten mit Essen versorgt hat, wird weniger Leistung benötigt. Dann sind die großen Generatoren überdimensioniert. »In einem Bundeswehr-Lager mit mehreren Tausend Soldatinnen und Soldaten, wie dies zum Beispiel in Afghanistan der Fall war, verbrauchen die Generatoren pro Tag bis zu 50 000 Liter Diesel. Die Effizienz liegt dabei nur um rund 30 Prozent«, erläutert Prof. Karsten Pinkwart, stellvertretender Bereichsleiter am Fraunhofer ICT.

Ein weiteres Problem: Einsatzgebiete liegen häufig abseits großer Straßen, der Diesel für die Generatoren muss oft über weite Strecken und durch unwegsames Gelände herbeigeschafft werden. Zudem müssen Tanklastwagen und Dieseltanks vor Angriffen geschützt werden. Nüchternes Fazit von Prof. Pinkwart: »Die Stromversorgung mittels Generatoren ist essenziell, birgt aber ein vielfältiges unkalkulierbares Risiko.«

Dicht gepackt und leistungsfähig

Der Fachmann berät die Bundeswehr seit vielen Jahren in Sachen Energieversorgung. Mit den Expertinnen und Experten am Fraunhofer ICT erforscht er das Potenzial innovativer Energiespeicher wie der Redox-Flow-Batterie, aber auch von Lithium-Ionen-Batterien, die Generatoren entlasten und so die Stromversorgung resilenter machen.

Auf dem Institutsgelände in Pfinztal ist kürzlich Europas größte Redox-Flow-Batterie in den Forschungsbetrieb gestartet. Deren Elektrolyte bestehen aus nicht brennbaren Vanadiumsalzen. Die modulare Batterie wurde vollständig mit in Deutschland entwickelten Komponenten und Know-how realisiert. Sie zeichnet sich nicht nur durch eine hohe Betriebssicherheit und Skalierbarkeit aus, sondern auch durch eine deutlich längere Lebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen Batterietechnologien.

Leistung und Energie lassen sich unabhängig von einander skalieren, für den Einsatz in Feldlagern ganz unterschiedlicher Größe ein enormer Pluspunkt. Dr.-Ing. Jens Noack, Teamleiter Flow Batteries am Fraunhofer ICT: »Die Redox-Flow-Testplattform ist ein Schritt hin zu einem stabilen, flexiblen und resilienten Stromsystem.«

Für den Einsatz bei der Bundeswehr genügen diese Qualitäten aber noch nicht. »Die Stromversorgung

muss zusätzlich extrem robust und zuverlässig sein, dazu Kälte, Hitze und Sand aushalten«, sagt Fritz Bruch, Batterieexperte und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ICT. Der Schwerpunkt seiner Arbeiten liegt auf Lithium-Ionen-Batterien und möglichen Folgetechnologien wie zum Beispiel Natrium-basierten Systemen. Kein leichtes Unterfangen, denn das Innengehäuse der Batteriezellen mit den nur wenige Millimeter dicken Elektrodenblättern, die präzise gestapelt werden müssen, ist hochkomplex und dementsprechend empfindlich. Auch darum kümmern sich die Fraunhofer-Forschenden.

Das Fraunhofer-Institut ist nicht als Solist unterwegs, sondern Teil des EU-Projekts »Nomad« mit 18 Partnern aus 9 EU-Staaten sowie Norwegen. Ziel des knapp 22 Millionen schweren Vorhabens ist es, vorhandene Energiespeichersysteme auf Tauglichkeit für die Verteidigung zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Gesucht werden beispielsweise Standardformate für die Batteriezellen. Damit wären Batterien in ihrer jeweiligen Leistungsklasse untereinander austauschbar und kompatibel.

Leise und effizient

Auch die Antriebstechnik von Fahrzeugen könnte in Zukunft von Akkutechnik profitieren. Die Vision dahinter: »Patrouillenfahrzeuge, die sich einem Einsatzort nähern, legen die letzte Meile mit E-Antrieb zurück. Am Einsatzort versorgt der Akku alle Funktionen des Fahrzeugs wie Funk, Klimaanlage, Navigation oder Aufklärungssensorik. Da die Batterietechnik lautlos arbeitet, keine Abgase ausstößt und keine Hitze abstrahlt, sind die Fahrzeuge schwer zu entdecken«, sagt Bruch.

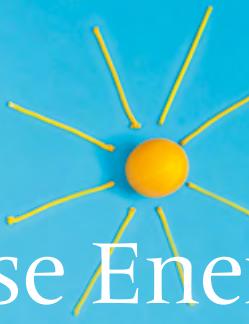
Prof. Pinkwart möchte auch dem Wasserstoff eine Chance geben. Eine damit betriebene Brennstoffzelle könnte in Anwendungen wie zum Beispiel Drohnen oder anderen autonomen Systemen, die der Aufklärung dienen, den Antrieb ergänzen oder vielleicht sogar ganz ersetzen. Dass Brennstoffzellen dies können, beweisen sie seit mehr als zwei Jahrzehnten in den U-Booten der Bundeswehr. Diese lautlosen und nur schwer aufklärbaren Unterwassergiganten werden von vielen befreundeten Nationen gerade deswegen geschützt. Auch für schweres Gerät an Land hat der Fraunhofer-Forschende eine Vision: Die Kombination aus Brennstoffzelle und Lithium-Akku könnte eines Tages hier diskret ihren Dienst tun – ohne Motorlärm, ohne Abgase und ohne Hitzeentwicklung. ■

»Die Stromversorgung mittels Generatoren ist essenziell, birgt aber ein vielfältiges unkalkulierbares Risiko.«

Prof. Karsten Pinkwart, Fraunhofer ICT



Solarzellen wie Ziegelsteine in einer Mauer anzuordnen, erhöht die Energieausbeute.



Diese Energie schickt der Himmel

Flächen besser nutzen: Die innovative Matrix-Schindel-Technologie des Fraunhofer ISE integriert Solarzellen ganz einfach in die Gebäudehülle – ob auf dem Dach, an der Hauswand oder an Balkon und Zaun.

Von Laura Rottensteiner-Wick



Kostenlos, unerschöpflich und völlig emissionsfrei: »Gerade in einem ressourcenarmen Land wie Deutschland schickt die Solarenergie im wahrsten Sinne der Himmel«, scherzt Dr. Achim Kraft, Leiter der Gruppe Verbindungstechnologie am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Sein Berufsweg war dem Ingenieur für Energietechnik und regenerativen Energien schon früh klar. »Mein Ziel war von Anfang an die Forschung und Entwicklung von Erneuerbarer-Energie-Technik, vor allem wollte ich industrienah arbeiten«, sagt er. »Deswegen bin ich bei Fraunhofer genau richtig.«

Der Markt für Solartechnologie wird aktuell dominiert von chinesischen Produkten, deren Preise für europäische Anbieter wirtschaftlich nicht zu unterbieten sind. In einem Marktumfeld mit Billigangeboten ist die Innovation der Ausweg. »Für spezialisierte hoch innovative PV-Anwendungen und deren Industrialisierung gibt es weiterhin sehr gute Verwertungschancen«, führt Kraft aus.

Mit der Matrix-Schindel-Technologie hat das Fraunhofer ISE nun eines dieser spezialisierten Angebote im Rahmen des EU-Projekts SPHINX gemeinsam mit mehreren Partnern bis zur Industriereife entwickelt. Die Technologie bietet vor allem für die relevante gebäudeintegrierte Photovoltaik entscheidende Vorteile. »Wir haben die Verschaltung der Solarzellen revolutioniert«, begeistert sich Kraft. In

gewöhnlichen PV-Modulen werden einzelne Solarzellen in Strängen, also Reihen verschaltet, nur entlang dieser Stränge kann der Strom fließen. Wird eine Zelle verschaltet, schaltet die ganze Reihe ab und produziert keinen Strom mehr – so der Stand der Technik bisher.

Die Matrix-Verschaltung kombiniert eine Reihen- und Parallelverschaltung der Zellen über die komplette Modulfläche. So kann der Strom nicht nur entlang der Stränge fließen, sondern auch in laterale Richtungen. Den Vorteil erklärt Kraft: »Kleine Teilverschattungen können einfach umflossen und Energieverlust so sehr gering gehalten werden.« Da die Solarzellen vor der Verschaltung zu kleineren Streifen geschnitten werden, lässt sich außerdem die Flächenausnutzung optimieren. Wie Schindeln werden die Zellen mit einem leichten Überlapp von etwa einem Millimeter verschaltet und durch elektrisch leitfähigen, bleifreien Klebstoff verbunden. Da so keine Zellverbinder mehr genutzt werden, entsteht eine einheitliche schwarze Fläche. Die sieht sehr hochwertig aus und kann zudem auch farblich angepasst oder teiltransparent gestaltet werden.

Pilotlinie für industrielle Fertigung

In seinem Technikum »Module-TEC« in Freiburg hat das Fraunhofer ISE nun eine Pilotlinie für die neu entwickelte Matrix-Schindel-Dachziegel implementiert. Die flexibel automatisierte Produktion erlaubt

dem Schweizer Projektpartner Freesuns eine Fertigung im Pilotmaßstab, bevor das neu entwickelte Produkt in die Massenfertigung übergeht.

»Insgesamt hat unsere sehr industriennahe Fertigungsanlage über 4000 Dachziegel in einer Größe von 450 mal 510 Millimeter mit Matrix-Schindel-Technologie hergestellt, die jetzt auch auf mehreren Demonstrator-Dächern zum Einsatz kommt«, erläutert Kraft. Durch den Austausch der herkömmlichen, älteren Technologie durch die neuen Matrix-Dachziegel-Module konnte nominell bereits eine erhebliche Leistungssteigerung von 60 Prozent erzielt werden. Das ist erst der Anfang, erklärt Kraft: »Es wird auf jeden Fall Folgeprojekte geben. Wir haben schon mehrere Anfragen aus der Industrie.«

Die Matrix-Schindel-Technologie ist sehr flexibel: Prinzipiell sind alle Solarzellentypen auf dem Markt nutzbar und die Technologie kann in der integrierten Photovoltaik überall eingesetzt werden. Egal, ob Dach, Hauswand, Lärmschutzwände, Zäune, Balkonbrüstungen, teiltransparente Modelle, Leichtbau, Glas-Glas-Module – alles ist möglich. Kraft: »Durch unsere Pilotfertigung sind wir jetzt in der Lage, die deutsche und europäische PV-Industrie beim oft entscheidenden Schritt von der Entwicklung in die Fertigung solcher Produkte sehr gut zu unterstützen. Wir zeigen damit einen Weg zu Verwertungschancen für Solarmodule in Deutschland auf – trotz schier übermächtiger Konkurrenz aus Asien.«

Fraunhofer-Köpfe

Innovations-Transfer für Deutschland



Prof. Dr.-Ing. Hanselka (1. Reihe, 2. v.l.) und Kanzler Merz mit dem neuen Strategiekreis.



Prof.
Constantin
Häfner

Stimme der Technikwissenschaften

Prof. Constantin Häfner, Vorstand für Forschung und Transfer der Fraunhofer-Gesellschaft, ist in die acatech – die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften – aufgenommen worden. Als nationale Akademie wird die acatec von Bund und Ländern gefördert und fungiert als Stimme der Technikwissenschaften im In- und Ausland. Schirmherr ist der Bundespräsident.

Fraunhofer-Vorstand Constantin Häfner hat als Direktor des »Advanced Photon Technologies Program« unter anderem die Entwicklung der leistungsstärksten Lasersysteme der Welt verantwortet sowie Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich bahnbrechender Lasertechnologien geleitet – insbesondere mit Anwendungen in der Hochenergiedichtephysik und Kernfusion. ■

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, ist Teil des Strategiekreises für Technologie und Innovation, dem technologie- und innovationspolitischen Beratungsgremium der Bundesregierung. Es setzt sich aus Mitgliedern der Bundesregierung sowie hochrangigen Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammen.

Der Strategiekreis hat die Aufgabe, Trends und neue Entwicklungen im Innovationskreislauf zu analysieren und konkrete Vorschläge zur Stärkung des Forschungs- und Innovationssystems, der Resilienz und der technologischen Souveränität zu erarbeiten. Ziel ist es, die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland zu fördern und die technologischen Potenziale in verschiedenen Sektoren zu heben. Im Zentrum der Auftaktsitzung im November stand die Stärkung von Innovation und Wettbewerbsfähigkeit in der Sicherheits- und Verteidigungsindustrie sowie bei Künstlicher Intelligenz. ■

Fraunhofer-Magazin

Das Magazin für Menschen, die Zukunft gestalten

Wollen Sie das Fraunhofer-Magazin sofort bei Erscheinen in Ihrem Briefkasten – kostenlos? Bestellen Sie direkt online unter <http://s.fhg.de/bestellen>



So profitieren Wirtschaft und Umwelt

Bei der Kreislaufwirtschaft ergänzen sich die Interessen von Ökonomie und Ökologie perfekt. Bis 2030 können europäische Unternehmen durch zirkuläre Prinzipien 600 Milliarden Euro Materialkosten einsparen – jährlich. Fraunhofer-Forschende präsentieren neue Lösungen.



»Wir fangen
mit Stroh an und
enden bei Produkten
des alltäglichen Lebens –
das ist wie aus Stroh
Gold machen.«

Dr. Antje Lieske,
Fraunhofer IAP