



## Gutes Geld

Nachhaltigkeit:  
So verbindet sie heute  
Ökologie & Ökonomie

**Gesundheit:** Ausweg aus der  
Antibiotika-Krise

**Mobilität:** Autonom fahren –  
aber ohne Gefahr

**Sicherheit:** Wie Mikrowellen  
Drohnen bekämpfen

# NACHHALTIGKEIT HAT ZUKUNFT!



WEITERBILDUNG MIT FRAUNHOFER

Erleben Sie Innovationen, qualifizieren Sie sich berufsbegleitend und sichern Sie sich Ihren Wissensvorsprung.  
[www.academy.fraunhofer.de](http://www.academy.fraunhofer.de)

# Innovationskraft erhalten in Zeiten der Krise



Prof. Reimund Neugebauer  
© Fraunhofer/Bernhard Huber

Inmitten des wärmsten Winters seit Beginn der Wetteraufzeichnungen dominierte zu Jahresbeginn ein einziges Thema das Weltwirtschaftsforum: Klima. Aus der Höhenluft von Davos, 1560 Meter hoch in der Schweiz gelegen, erreichte uns ein positives Signal. Die Wirtschaft sei nicht der natürliche Feind der Klimapolitik. Die Wirtschaft sei ganz im Gegenteil die größte Hoffnung im Bemühen, die Klimakrise zu bewältigen.

Nur wenige Wochen später haben wir erleben müssen, wie schnell diese Thematik in der öffentlichen Diskussion aller und im persönlichen Erleben des Einzelnen kaum noch eine Rolle spielt. Sie ist abgelöst durch eine andere Krise. Ein neuartiges Virus, dem die Weltgesundheitsorganisation WHO den Namen »Severe Acute Respiratory Syndrom«-Coronavirus-2 gegeben hat, erschüttert alle und alles. Wieder stellen wir fest: Es ist ein einziges Thema, das den Diskurs dominiert.

**Lassen Sie uns in diesen aufgeregten Zeiten nicht Strömungen hinterherlaufen, sondern Flussrichtungen vordenken.** Das ist der Beitrag, wie ihn Deutschland und Europa von der Fraunhofer-Gesellschaft als weltweit führende Organisation für angewandte Forschung erwarten können. Wie wichtig und wie wohltuend das Fachwissen der Forschenden wird, wenn die Welt in Aufgeregtheiten versinkt, haben wir gerade erfahren. Fachleute sind es, die beruhigen, wenn die Panik hochkocht; sie sind es, die auf reale Gefahren hinweisen, wo sie die Gesundheit und das Leben bedrohen; sie werden es sein, die in hoffentlich naher Zukunft Impfschutz und Heilung bereitstellen können.

Nie war Forschung so wichtig wie heute. Ob Klimakrise, ob Gesundheitskrise, ob Wirtschaftskrise: Wo immer eine Gesellschaft sich neu definiert und definieren muss, sie wird

Veränderungen nur erfolgreich in der Verbindung mit Wertschöpfung verwirklichen können. Ökonomie und Ökologie sind keine Gegensätze. Sie werden sich immer vereinen in dem Ziel, dem Menschen und der Menschheit eine gute Zukunft zu bereiten.

Im Bloomberg Innovation Index 2020, der die Innovationskraft von Volkswirtschaften bewertet, ist Deutschland gerade auf Platz eins vorgerückt und hat Südkorea, immerhin sechs Jahre lang Spitzenreiter, auf den zweiten Rang verdrängt. Die USA sind auf Platz neun zurückgefallen. Wir haben die Kraft, Zukunft zu gestalten. Lassen Sie uns weiterhin Leidenschaft und Energie in unsere Forschung investieren. Sie wird entscheiden über unsere Wirtschaft, unseren Wohlstand und unser Wohlergehen.

Bleiben Sie gesund!

Ihr

Reimund Neugebauer  
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft

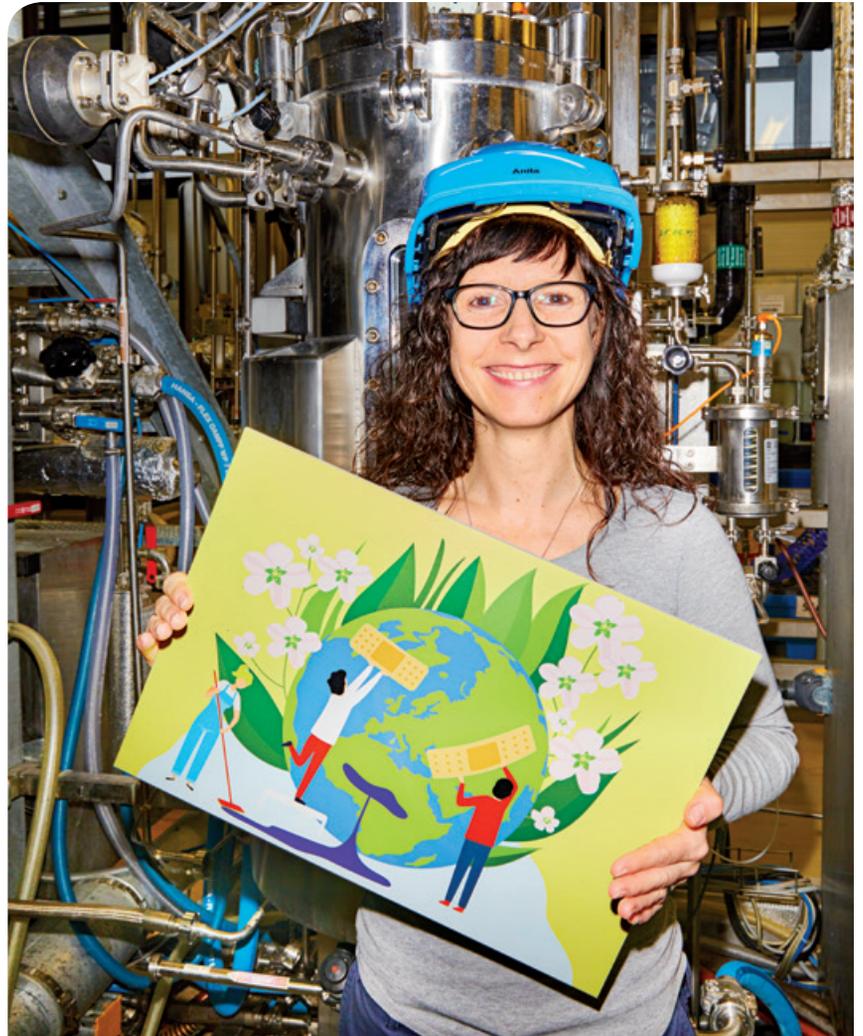
# Inhalt

## 10 Gutes Geld

Nachhaltigkeit schafft zahlreiche neue Geschäftsmodelle. Anita May arbeitet daran, Plattform-chemikalien auf Basis von Bioorganismen herzustellen – und damit in der Kunststoffherstellung den Verbrauch fossiler Rohstoffe zu verringern.

## 36 Roboter räumen auf

263 950 Altlasten-Flächen gibt es in Deutschland. Technik hilft, wo es für Menschen zu gefährlich wird.



03 Editorial

06 Kurz gemeldet, Impressum

10 **Titelgeschichte: Gutes Geld – wie Nachhaltigkeit Ökologie und Ökonomie verbindet**  
Wirtschaft und Umweltschutz sind keine Gegensätze. Aktuell entsteht eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle.

24 **»Das spart richtig Geld!«**  
Prof. Julia Arlinghaus im Interview: Wer Fabriken effizienter macht, schont auch die Ressourcen.

26 **Schätze aus dem Smartphone**  
Recycling: So hilft Lasertechnik, die wertvollen Rohstoffe aus dem Handy zu bergen.

28 **»Tue Gutes – und verdiene Geld damit!«**  
460 000 Arbeitsplätze bietet die Chemie-Industrie: Verteidigung einer oft angefeindeten Branche.

30 **So hilft Mathematik, den Nahverkehr intelligent zu steuern**  
Um Sekunden optimierte Abfahrtszeiten haben das Potenzial, Städten Millionenbeträge zu sparen.

32 **Pack den Biosprit in den Tank**  
Synthetische Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen reduzieren Treibhausgas-Emissionen um bis zu 30 Prozent.

34 **Stimme aus der Wirtschaft**  
Dr.-Ing. Peter Leibinger, Trumpf GmbH & Co.KG

36 **Autonomes Aufräumkommando**  
In Deutschland geht man von 263 950 Flächen mit gefährlichen Altlasten aus. Roboter helfen.

38 **Wofür wird das Darknet eigentlich genutzt?**  
Drogen, Waffen, Pornographie – und sehr viel mehr: Prof. Martin Steinebach sorgt für Klarheit.



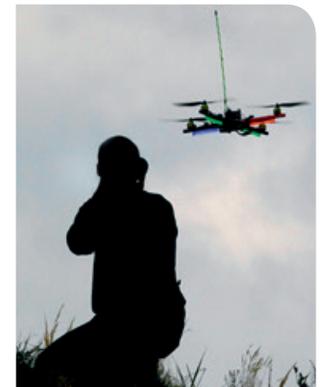
**34 Stimme aus der Wirtschaft**  
 Dr.-Ing. Peter Leibinger, Trumpf GmbH + Co.KG, fordert mehr Einsatz für Quanten-Technik in Deutschland.

**61 Antibiotika-Krise: Wie Phagentherapie helfen kann**  
 Im Kampf gegen multiresistente Keime bringt eine 100 Jahre alte Idee neue Hoffnung.

**42 Mikrowellen gegen Minihelikopter**  
 Immer öfter werden Drohnen zur Gefahr. Fraunhofer forscht für mehr Sicherheit.



**46 Die Jagd nach der Anti-Icing-Formel**  
 Fliegst du schon oder enteist du noch? Neue Technik spart Zeit, Geld – und Chemikalien.



- 41 Was essen wir morgen?**  
 Das Fraunhofer ISI hat sich mit der Ernährung der Zukunft beschäftigt: die wichtigsten Trends.
- 42 Mikrowellen gegen Minihelikopter**  
 Immer öfter werden Drohnen zur Gefahr – neue Techniken schaffen mehr Sicherheit.
- 44 Fraunhofer weltweit**  
 Entwicklungen und Projekte international.
- 46 Die Jagd nach der Anti-Icing-Formel**  
 Flugzeuge zu enteisen kostet Zeit, Geld und verbraucht sehr viel Chemie. Doch gibt es auch neue Möglichkeiten.
- 48 Film und Musik ganz neu hören**  
 Corona hat es gezeigt: In der Krise wird das eigene Heim zum Lebensmittelpunkt. Das Fraunhofer IIS forscht fürs perfekte Konzert- und Filmelerlebnis daheim.

- 50 Killer im eigenen Körper**  
 Das Fraunhofer ITEM erforscht die Mechanismen der Metastasenbildung.
- 52 Ein Bergwerk heizt ein**  
 So schafft Wasser aus stillgelegten Stollen Wärme im Winter und Kühle im Sommer.
- 57 Kleines Ding, große Chancen**  
 Memristoren: Sie könnten der Künstlichen Intelligenz zusätzlichen Schub geben.
- 61 Multiresistente Keime**  
 Die Therapie ist 100 Jahre alt. Doch jetzt bekommen Phagen ganz neue Bedeutung in der Antibiotika-Krise.
- 67 Prüfstein Sicherheit**  
 Fraunhofer schafft neue Chancen für das intelligente Fahren.

**Windkraft** war 2019 mit einem **Plus von 15,7 Prozent** zum Vorjahr erstmals die **stärkste Energiequelle** in Deutschland. 2020 brachte der Winterorkan Sabine einen **Windstromrekord** nach Deutschland. Zeitweise wurden 43,7 Gigawatt Windstrom ins Netz eingespeist. Insgesamt erhöhte sich der **Anteil der Erneuerbaren Energien** nach einer Auswertung des Fraunhofer ISE im vergangenen Jahr von 40,6 auf

**46%**



Der kreischende Ruf der Schleiereule ist unverkennbar. © AdobeStock



## Bestandsaufnahme: Sensoren erkennen Tierlaute

Wenn ein Windpark oder ein Naturschutzareal geplant wird, informieren sich Fachleute über die Tierwelt vor Ort. Ein neues Sensorsystem soll das in Zukunft leichter machen.

Forscher am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT in Oldenburg arbeiten gemeinsam mit Kollegen aus dem Museum für Naturkunde in Berlin und Partnern aus der Industrie an einem System, mit dem sich Tierlaute automatisch erfassen und auswerten lassen.

»Die technischen Möglichkeiten zum Erfassen von Tierlauten sind heute sehr teuer oder man muss auf selbst gebaute Geräte zurückgreifen. Das ist über einen längeren Zeitraum oder an schwer zugänglichen Stellen fast unmöglich«, erklärt Dr. Karl-Heinz Frommolt, Leiter der Abteilung Biodiversitätsinformatik am Museum für Naturkunde in Berlin. Im Anschluss an das Erheben der Daten müsse man diese aufwendig auswerten. Dabei komme es häufig zu Fehlern.

Manche Geräusche würden vom Aufnahmegerät schlichtweg »überhört« oder Tiere doppelt aufgenommen. Das mache die Verfahren ungenau und zeitintensiv.

**Das geplante Sensorsystem** mit dem Namen DeViSe (Automatische Detektion, Lokalisation und Tracking von Vögeln und lautgebenden Tierarten mittels intelligenter akustischer Sensorik) soll diese Probleme lösen. Es handle sich dabei um ein günstiges, robustes und kleines Aufnahmegerät mit geeigneter Software zum Steuern und Auswerten. »Das intelligente System erfasst die Daten automatisch und bestimmt zum Beispiel die Tierarten oder die Häufigkeit der Tierrufe«, so Frommolt. Außerdem könne DeViSe die lautgebenden Tiere orten und so Muster erstellen.

## Parodontitis heilen

Einen hochspezifischen Wirkstoff gegen Parodontitis hat ein Forscherteam am Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI am Standort Halle gemeinsam mit Wissenschaftlern der Universität Krakau und der Zahnmedizinischen Klinik in Bern innerhalb eines EU-Projekts entwickelt und patentiert.

Endlich wieder strahlend schön lächeln, das wünschen sich Parodontitis-Patienten. © AdobeStock

Parodontitis ist eine weit verbreitete Erkrankung. Mehr als die Hälfte der Erwachsenen in Deutschland leidet unter dieser bakteriell verursachten Entzündung des Zahnfleisches. Eine Heilung ist derzeit nicht möglich und die Gabe von Breitbandantibiotika bietet keine wirkliche Lösung.

»Der neue Wirkstoff wird nur von den krankmachenden Keimen aufgenommen und wirkt auch nur bei diesen. Der Organismus wird durch eine lokale Gabe in die Zahntasche nicht belastet und Resistenzenentwicklungen werden vermindert«, erklärt Dr. Mirko Buchholz vom

Fraunhofer IZI und einer der beiden Geschäftsführer und Gründer von PerioTrap. Für eine optimale Wirkung wurde auch eine erste Formulierungsidee entwickelt: Mit einer Art resorbierbarem Stäbchen, das biegsam ist wie ein Faden, wurde ein Testwirkstoff sehr lange – über 42 Tage – freigesetzt.

Die Markteinführung der neuen Entwicklung soll durch das Start-up PerioTrap Pharmaceuticals vorangetrieben werden, das im Jahr 2018 gegründet wurde. An dem Unternehmen haben sich Wissenschaftler aus Halle und die Fraunhofer-Gesellschaft als Gründer beteiligt.



# Regenerative Energie intelligent nutzen



Die erzeugte Energiemenge regenerativer Quellen schwankt. Überschüssige Solar- oder Windenergie lässt sich jedoch nur schwer speichern oder über weite Strecken transportieren. Die Lösung: das innovative Energiemanagementsystem des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM.

Die Amsterdamer Wasserhäuser aus Holz-, Glas- und Synthetikelementen sind nicht nur wegen ihrer preisgekrönten Architektur aufsehenerregend, sondern auch wegen ihres innovativen Energiemanagementsystems. © Isabel Nabuurs

Das System ermöglicht es, Photovoltaikanlagen, Batteriespeichersysteme, Wärmepumpen und Elektroautos intelligent zu koppeln – und einzelne Haushalte trotz der Schwankungen weitestgehend mit regenerativer Energie zu versorgen. In einem Pilotprojekt in Amsterdam wurde es in einer Siedlung aus 30 schwimmenden Häusern erfolgreich getestet.

»Wir haben hier unser bereits existierendes Energiemanagement für einzelne Häuser zu einem Energiemanagementsystem für ganze Energiegemeinschaften weiterentwickelt«, erklärt Projektleiter Matthias Klein, stellvertretender Abteilungsleiter »High Performance Computing« am Fraunhofer ITWM. »Das System steuert Photovoltaik-Anlagen ebenso wie Wärmepumpen, füllt die Batteriespeicher, sorgt für geladene Akkus in den Elektroautos und unterstützt somit auch die Sektorenkopplung.« Keine einfache Angelegenheit: Denn auch an wolkenverhangenen Tagen muss jederzeit genug Energie für alle zur Verfügung stehen, ohne dass es zu einer Überlastung des gemeinsamen Netzanschlusses kommt, der dann zusätzlich Strom liefert.

Das Energiemanagement ist modular aufgebaut und dient als eine Art »Drehscheibe für Energie«. Sprich: Es analysiert zu jedem Zeitpunkt, wo die Energie hin soll. Dabei funktionieren die in den einzelnen Häusern installierten Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen und Energiespeicher wie ein einziges großes System. Zum Beispiel: Die Bewohner des Hauses A sind im Urlaub, die Bewohner des Hauses B feiern eine Party und haben einen hohen Energiebedarf. Die Energie der Photovoltaikanlage fließt dann aus Haus A in Haus B. Ist es draußen bereits dunkel und erzeugt die Anlage keinen Strom, greift das System auf die Energiespeicher zu – auch dies erfolgt häuserübergreifend.

**Die Module des Energiemanagementsystems** können auch einzeln verwendet und auf den jeweils gewünschten Anwendungsfall zugeschnitten werden. »Es gibt bereits 60 bis 70 dauerhafte Installationen unseres Systems – vom einzelnen Privathaushalt über Kantinen und ganze Betriebe bis hin zu einer Kläranlage«, sagt Klein. Vertrieben wird das System seit Anfang 2019 über die Wendeware AG, ein Spin-off des Fraunhofer ITWM.

Modulares  
Energiemanagement:  
Energie dorthin steuern,  
wo sie gebraucht wird.

Seitenschalen im digitalen Modell des Demonstratorhelikopters. © Airbus



## Mit Höchstgeschwindigkeit an den Einsatzort

Er ist über 400 Kilometer pro Stunde schnell, kosteneffizient und nachhaltig: der neue Hochgeschwindigkeits-Helikopter RACER («Rapid And Cost-Efficient Rotorcraft»).

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg haben ein nachhaltiges Verfahren entwickelt, das die Fertigung der Helikopter-Seitenschalen in Sandwichbauweise hochautomatisiert ermöglicht. Die Schalenbauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) als Decklagen und Sandwichkernen aus Phenolharzwaben sind besonders leicht und damit treibstoffsparend. Zum Einsatz soll RACER zukünftig überall da kommen, wo eine hohe Geschwindigkeit und Effektivität in Aerodynamik und Verbrauch gefragt sind, beispielsweise in der Notfallmedizin oder Luftrettung. Neben Airbus sind verschiedene internationale Partner an dem Projekt beteiligt.



Der RACER könnte zukünftig auch als Transportmittel im urbanen Luftraum genutzt werden und eine schnelle, stauunabhängige Beförderung möglich machen. © Airbus

**Schalenbauteile in CFK-Sandwichbauweise** müssen bisher meist im aufwendigen Handlegeverfahren gefertigt werden. Dem Projektteam am Fraunhofer IGCV gelang es, die mithilfe einer hochautomatisierten Prozesskette herzustellen, die Material- und Energieeinsparungen durch eine intelligente Produktionsplanung ermöglicht. Neben der Größe und der Komplexität der Bauteile war die zentrale Herausforderung die Integration der Sandwichkerne. Um auch in den Bereichen der Kernrampen eine hohe Laminatqualität zu erzielen, wurde der Legeprozess durch Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen optimiert.

## Verbrecher schnappen dank 3D-Scanner

Um Schuhabdrücke zu sichern, fertigen Kriminaltechniker einen Gipsabguss an – ein langwieriges Verfahren, das zudem die Spur zerstört.



Vor allem bei Kälte oder Nässe braucht der Gips lange, um auszuhärten. © AdobeStock

Ein tragbarer 3D-Scanner ermöglicht jetzt, die Spuren schnell und einfach zu speichern. »Der Scanner erfasst die Spuren in drei Dimensionen«, sagt Roland Ramm, Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für

angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena. »Mit nur 4,3 Kilogramm ist er sehr leicht, batteriebetrieben und robust. Zudem arbeitet er berührungsfrei, die Spur ist also nach dem Scannen noch intakt.« Selbst kleinste Merkmale kann das Gerät zuverlässig erkennen, seine Auflösung liegt unter 200 Mikrometern. Das ist wichtig, um kleine Kratzer im Profil erkennen und eindeutig einem bestimmten Schuh zuordnen zu können.

**Sobald der Kriminaltechniker** den Scanner über den Abdruck hält, sieht er den Bildausschnitt auf einem Display, kann die Bildschärfe nachjustieren und erhält bereits erste Ergebnisse. Die Detailauswertung erfolgt im Labor. Hier werden auch Vergleiche mit Spuren anderer Tatorte und Täter angestellt.

### 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:** Janis Eitner (V.i.S.d.P.),  
Josef Oskar Seitz (Chefredaktion),  
Dr. Sonja Endres, Roman Möhlmann

**Redaktionelle Mitarbeit:** Janine van Ackeren, Mandy Bartel, Christine Broll, Katja Engel, Sirka Henning, Daniela Leitner, Eric Schütz (Zissue), Mehmet Toprak, Eva Rathgeber, Britta Widmann

**Layout + Litho:** Vierthaler & Braun  
**Titelbild:** Norman Konrad für Fraunhofer  
**Druck:** H. HEENEMANN GmbH, Berlin

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V.  
München 2020





Die beiden Booster der Ariane 5 fassen je 238 Tonnen Treibstoff. Nicht nur die Spritkosten machen den Start teuer. Microlauncher sollen Cube Sats in Zukunft billiger transportieren. © John Kraus/ESA

Das Aerospike-Triebwerk verbraucht bis zu **30%** weniger Treibstoff.

## Schneller im All

Kleinsatelliten, wegen ihrer Würfelform auch Cube Sats genannt, erobern den erdnahen Orbit. Sie sind kostengünstig und schnell gebaut, Airbus produziert sie seit letztem Jahr in Florida am Fließband.

Miniraketen, für die Fraunhofer-Forscher ein neues, effizientes Triebwerk konstruiert haben, sollen Cube Sats bald unabhängig von großen Trägerraketen auf die gewünschte Umlaufbahn bringen. Bisher müssen Cube Sats auf den Start von Ariane, Vega und Co. warten und mit der Bahnlage des Hauptpassagiers, meistens ein großer Satellit, vorliebnehmen. Das könnte sich bald ändern: Miniraketen, sogenannte Microlauncher, lassen sich unter den Flügel eines Flugzeugs hängen, von dort aus zünden und so schnell und zielgenau ins All bringen. Einen klassischen Weltraumbahnhof benötigen die flexiblen Microlauncher nicht, nur einen Flughafen, von dem die Spezialflugzeuge aus starten können. Im Gespräch ist bereits der ehemalige Militärflugplatz in Nordholz bei Cuxhaven.

Der Nachteil: Die Nutzlast für Microlauncher ist beschränkt, mehr als 350 Kilogramm können sie nicht transportieren. Umso wichtiger ist es, sie mit Triebwerken auszurüsten, die leicht sind und wenig Treibstoff verbrauchen – ideal sind sogenannte Aerospike-Triebwerke.

»Die technologische Konzeption ist erstmals in den 1960er-Jahren aufgekommen. Aber nur durch die Freiheiten der additiven Fertigung ist es uns gelungen, diese effizienten Triebwerke jetzt auch herzustellen«, sagt Michael Müller, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Additive Manufacturing Center Dresden (AMCD), das gemeinsam vom Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS und von der TU

Dresden betrieben wird. Die Aerospike-Düse passt sich auf dem Weg von der Erde in den Orbit an die Druckverhältnisse in unterschiedlichen Flughöhen an. Dadurch arbeitet sie effizienter und benötigt bis zu 30 Prozent weniger Treibstoff als herkömmliche Triebwerke. Sie besteht aus einem stachelartigen Zentralkörper, über den die Verbrennungsgase beschleunigt werden. Ebenso wie der Treibstoffinjektor und die Brennkammer wird die Düse per Laser Powder Bed Fusion, einem additiven Fertigungsverfahren, Schicht für Schicht hergestellt.

**Das Aerospike-Triebwerk** ist insgesamt kompakter als konventionelle Systeme, die Rakete wird leichter. »In der Raumfahrt ist jedes eingesparte Gramm Gold wert. Je schwerer das Gesamtsystem, desto weniger Nutzlast kann transportiert werden«, erklärt Müller. In der Brennkammer herrschen Temperaturen von mehreren Tausend Grad Celsius – bisher ein großes Problem der Aerospike-Triebwerke. Das additive Fertigungsverfahren ermöglicht jedoch eine effektive Kühlung mittels eines komplexen Systems, das sich konventionell nicht fräsen oder gießen lässt. Es umfasst innen liegende, einen Millimeter schmale Kühlkanäle, die der Kontur der Brennkammer folgen.

Der Prototyp des Aerospike-Triebwerks wurde bereits erfolgreich getestet und erzielte eine Brenndauer von 30 Sekunden. Die Wissenschaftler arbeiten zurzeit daran, die Effizienz des Antriebssystems weiter zu steigern.

# Gutes Geld

Wie Nachhaltigkeit heute  
Ökologie & Ökonomie verbindet

Klimafreundlichkeit gleich Verzicht?  
Kunststoff im Kreislauf spart Kosten und  
ist gut für das Klima. Nachhaltigkeit  
schafft zahlreiche neue Geschäftsmodelle.



Forschen für eine heilere Welt: »Die Menschheit sollte wieder lernen, mit der Natur zu leben«, sagt Anita May. Sie selbst arbeitet als Gruppenleiterin am Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP.

400 Millionen Tonnen Plastik sollen weltweit pro Jahr hergestellt werden. Die Recyclingquote liegt knapp über zehn Prozent, hat die Unternehmensberatung McKinsey ermittelt.

**D**eutschland ist Spitze. 25 Prozent des Kunststoffs in Europa werden in Deutschland verbraucht. Nun will Deutschland auch die Spitzenposition im Kampf gegen den Plastikmüll einnehmen. 28 Konsumgüter- und Chemiekonzerne kündigten Anfang 2019 an, sich dem Problem stellen zu wollen. Die Dringlichkeit haben Fotos und Filmaufnahmen unübersehbar gemacht – sie zeigen qualvoll verendete Fische und Meeresvögel, verstorben am Plastik in den Meeren. Mehr als 8,3 Milliarden Tonnen Kunststoffe wurden von 1950 bis 2015 produziert – das ist mehr als eine Tonne Plastik pro Mensch, der derzeit auf der Erde lebt. Nie waren diese Fragen so akut wie heute: Welche Technologien sind verfügbar, um die Probleme zu lösen? Wie steht es um die Wirtschaftlichkeit? Und: Welche neuen Geschäftsmodelle ergeben sich aus der aktuellen Nachhaltigkeitsdiskussion?

## # Ersetzen



Porsche verbaut bereits naturfaserverstärkte Kunststoffe in einer Kleinserie mit ein paar hundert Fahrzeugen. Der Porsche Cayman GT4 Clubsport ist seit Anfang 2019 zu kaufen. An neuen Verfahren, um fossil erzeugte Fasern zu ersetzen, arbeitet das Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI. »Bei Leichtbauteilen für Flugzeuge und teurere Automodelle kommen vielfach carbonfaserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz. Die Carbonfasern sind leicht und verleihen den Bauteilen die nötige Stabilität, sind allerdings teuer und verschlingen bei der Produktion extrem viel Energie«, erläutert Ole Hansen, Wissenschaftler am Fraunhofer WKI. »Wir setzen daher stattdessen auf Naturfasern, etwa aus Holz, Hanf, Flachs oder Jute, die die an die Tür gestellten Anforderungen ebenfalls erreichen.« Bei Porsches Cayman macht das nicht nur ökologisch Sinn. Der ökonomische Vorteil der Ökologie: Naturfasern benötigen weniger Energie bei der Herstellung und der späteren thermischen Verwertung; sobald sie in Masse produziert werden, dürften sie deutlich kostengünstiger sein als Carbonfasern.

Kunststoffe, die komplett aus biobasierten Materialien hergestellt sind – etwa aus Milchsäure –, sind im Preis heute noch nicht mit den Kunststoffen auf fossiler Basis konkurrenzfähig. Zudem müssen die biobasierten Kunststoffe mit bestehenden Verarbeitungstechnologien verarbeitet werden können und mit bekannten Polymeren und Materialien kompatibel sein.

Dennoch eröffnen sich bereits jetzt lukrative Geschäftsfelder: Und zwar überall dort, wo ökologisch orientierte Endkunden angesprochen werden – etwa bei Kinderspielzeug, Butterbrotdosen und Co. »Politische Rahmenbedingungen wie CO<sub>2</sub>-Abgaben und Emissionshandel können die Bedingungen weiter zugunsten der biobasierten Kunststoffe ändern und so eine breite, wirtschaftliche Anwendung erlauben. Schließlich haben diese Materialien einen deutlich kleineren CO<sub>2</sub>-Footprint«, erwartet Dr. Stephan Kabasci, Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Das Institut widmet sich daher unter anderem der Aufgabe, entsprechende Kunststoffe zu entwickeln: Die Forschenden setzen zum Beispiel aus biobasierten Molekülen größere Polymere zusammen, die als Additive in Klebstoffen oder biobasierten Schmierstoffen verwendet werden können.

### Das Problem des höheren Preises von Biokunststoffen

löst sich, wenn Abfallstoffe in Kombination mit kostengünstigen Aufbereitungsverfahren genutzt werden können – wie beim EU-Projekt HyperBioCoat der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS. Die Forschenden nutzen Apfeltrester als Ausgangsmaterial für einen biobasierten und biologisch abbaubaren Polymergrundstoff. Diese Trester stehen nicht in Konkurrenz zur Lebensmittelindustrie, sind in ausreichender Menge vorhanden und als Abfallprodukt kostengünstig zu beziehen. Das entstehende Hemicellulose-Produkt erlaubt verschiedene Anwendungen, angefangen von Beschichtungen, die Sauerstoff und Wasserdampf abschirmen, über Folien, Schalen und Flaschen aus Kunststoffen bis hin zu Naturwachsen, Papieradditiven und Kosmetikartikeln. ▶

Naturfaser statt Carbon: Ole Hansen, Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI, arbeitet daran, mit Holz, oder Hanf, Flachs oder Jute Kunststoffe zu verstärken – und Energie zu sparen.



SCHERER

&R

DUNLOP

DUNLOP

Ein Polymer mit völlig neuen Eigenschaften? »Wir haben damit eine echte Alternative zum bisherigen Stand der Technik geschaffen«,

sagt Dr. Michael Richter, Fraunhofer IGB

► Ebenfalls auf Abfälle als Grundmaterial für Kunststoffe setzt das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB. Der Ansatz hier lautet: Verleiht man den biobasierten Kunststoffen besondere Eigenschaften, indem man Moleküle aus der Natur nutzt, deren strukturelle Motive nicht leicht aus petrochemischen Quellen zugänglich sind, können sie sich potenziell aufgrund neuer Eigenschaften trotz eines höheren Preises gegenüber Erdölprodukten durchsetzen. Dieser Strategie folgen Forscher des Fraunhofer IGB gemeinsam mit der Technischen Universität München. Sie entwickelten eine neue biobasierte Polyamid-Familie ausgehend von Terpen-Naturstoffen durch eine industriell kompatible chemische Transformation. Die resultierenden Polyamide tragen nun Strukturmerkmale der chemischen Ausgangsverbindungen. Anstelle einer linearen Polymerkette entsteht eine Kette, die viele kleine Ringe und weitere Seitengruppen beinhaltet – was dem Polymer völlig neue Eigenschaften verleiht. »Wir haben damit eine echte Alternative mit deutlichen Unterscheidungsmerkmalen zum bisherigen Stand der Technik geschaffen«, versichert Dr. Michael Richter, Innovationsfeldleiter am Straubinger Institutsteil des Fraunhofer IGB.

**Auch aus industrieller Sicht** punktet das Verfahren.

Denn die moderne Synthese der Monomere findet in einem einzigen Reaktionsbehälter statt, was die Kosten erheblich reduziert. Auch lässt sich der Prozess leicht für große Mengen umsetzen und ist damit effizient. Dazu kommt: Der Ausgangsstoff – Terpentinöl – fällt bei der Zelluloseindustrie als Nebenprodukt in industriell relevanten Mengen an. Sinn macht der Ersatz fossil basierter Kunststoffe vor allem in volumenstarken Anwendungen – sprich dort, wo viel Kunststoff benötigt wird. »Wir schauen mit unserer Entwicklung beispielhaft auf Gemüseboxen, die mit etwa zwei Kilogramm Gewicht sehr materialintensiv sind – und hoffen auf Nachahmer in anderen Branchen«, sagt Christoph Habermann, Wissenschaftler am Fraunhofer WKI. Bis zu 30 Prozent des Kunststoffs ersetzen die Forschenden durch Holzfasern. Das Ergebnis: Das Material wird nicht nur umweltverträglicher, sondern die Rohstoffe sind auch um etwa 20 Prozent günstiger. Zu Testzwecken wurden bereits tausend Gemüseboxen produziert.



Nicht in allen Anwendungen jedoch lässt sich der Kunststoff als solcher ersetzen – sei es nun durch Biokunststoffe oder andere Materialien. In einer Pilotanlage des Fraunhofer-Zentrums für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP in Leuna werden daher viel verwendete Plattformchemikalien, die bis dato aus Erdöl produziert werden, auf Basis von Bioorganismen nachhaltig hergestellt.

Denn: Momentan werden Kunststoffe zu 99 Prozent aus fossilen Rohstoffen gefertigt, etwa sechs Prozent des globalen Erdölverbrauchs gehen somit auf das Konto der Kunststoffproduktion. Das Fraunhofer CBP bietet das Gesamtpaket: In der Holzabteilung stellen die Forscherinnen und Forscher aus

geschreddertem Holz Zucker her, mit denen sie Bioorganismen füttern können. In der biotechnologischen Abteilung produzieren sie über Bioorganismen die gewünschten Plattformchemikalien, und in der chemischen Abteilung können diese Plattformchemikalien wiederum den Kundenwünschen entsprechend angepasst werden. In dem Projekt »fermentative Herstellung von Isobuten«, welches hier beispielhaft vorgestellt wird, betreibt ein Team aus 15 Personen im vollkontinuierlichen Schichtbetrieb eine Pilotanlage für den Industriepartner Global Bioenergies (GBE). In diesem Prozess wird über Escherichia-Coli-Bakterien die Plattformchemikalie Isobuten hergestellt. Langfristig plant GBE, auf Basis der wissenschaftlichen Ergebnisse und dem gewonnenen Know-how aus den Prozesskampagnen der Pilotanlage eine Produktionsanlage im Industriemaßstab aufzubauen.

## # RecycleIn

In Deutschland wird emsig Plastik gesammelt. Mehr als die Hälfte dieser Kunststoffabfälle, 61 Prozent, landete im Jahr 2017 allerdings in den Müllverbrennungsanlagen. Nur 39 Prozent wurden stofflich verwertet. Echtes Recycling ist die absolute Ausnahme. Neue Kunststoffe entstanden nur aus 15,6 Prozent, der Rest ging in sogenannte »niederwertige« Anwendungen. Ein Positiv-Beispiel für Recycling sind auch heute schon PET-Flaschen: Mit einer Quote von 98 Prozent ist es eines der erfolgreichsten Recyclingsysteme – so erfolgreich, dass verschiedene Handelsketten überlegen, ein eigenes System auch für andere Plastikverpackungen einzuführen. So ließen sich beispielsweise Biokunststoffe wie Polymilchsäure trennen und stofflich gleichwertig wiederverwerten.

Produktdesign verbessern und die Recyclingquote zu erhöhen, also die Kunststoffproduktion zirkulärer werden zu lassen, hat sich der Fraunhofer Cluster Circular Plastics Economy CCPE® zum Ziel gesetzt. Sechs Fraunhofer-Institute bündeln darin ihre Kompetenzen. »Ein wesentlicher Aspekt liegt darin, die unterschiedlichen Akteure in der Wertschöpfungskette miteinander ins Gespräch zu bringen. Nur gemeinsam können wir diese Aufgabe stemmen«, sagt Dr. Hartmut Pflaum, Leiter der Cluster-Geschäftsstelle am Fraunhofer UMSICHT. ►



Das Auto als Feindbild? Die Ökobilanz von Haustieren hat das Schweizer Beratungsunternehmen ESU-services untersucht. Vielleicht sagt der Klima-Killer auch leise »Miau«.

Die Haltung eines Pferdes verbraucht pro Jahr 3,1 Tonnen CO<sub>2</sub> – das entspricht laut ESU-services einer Fahrtstrecke von 9170 Kilometern mit dem Auto. Alle Umweltbelastungen eingerechnet, kommen die Schweizer sogar auf 21 500 Kilometer. Zum Vergleich: Ein Auto in Deutschland fährt pro Jahr durchschnittlich gut 13 000 Kilometer.  
© Grafik: Daniela Leitner

► Zwei der sechs Research Departments arbeiten an der Herstellung nachhaltiger Kunststoffe. Sie wollen etwa Additive entwickeln, die den Kunststoff zersetzen, sobald er mit Umwelteinflüssen wie Meerwasser in Kontakt kommt.



Andere beschäftigen sich mit dem Recycling. So entwickeln die Forschenden unter anderem Antworten auf die Frage, wie sich Kunststoffströme markieren und digital abbilden lassen, wie also ein »digitaler Zwilling« erzeugt werden kann. Bei einem Computergehäuse beispielsweise hieße das: Bei seiner Produktion wird zeitgleich eine Datei erzeugt, die über den gesamten Lebenszyklus des Produkts hinweg gespeichert und mitgegeben wird. Eine Multicycle-Anlage soll im Cluster zudem die Möglichkeiten ausloten, unterschiedliche Kunststoffe wiederzuverwerten. Hier werden die lohnendsten Geschäftsmodelle identifiziert und anschließend aufskaliert. Ein weiterer Forschungsansatz: Wie lässt sich bewerten, ob eine zirkuläre Lösung unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten besser ist als eine einmalige Nutzung? Ist ein werkstoffliches oder ein chemisches Recycling effektiver? In diesem Themenfeld der Materialien für eine zirkuläre Wirtschaft wird sich auch das Fraunhofer IGB mit dem Aufbau des Labors für Technische Biopolymere in Straubing intensiv befassen. Dort soll speziell der Fokus auf die Entwicklung von biobasierten Polymeren für die Zukunft und deren Anwendungen gelegt werden.

Bis zu  
14 Millionen  
Pakete pro Tag  
werden in  
Deutschland  
zugestellt.  
Muss der  
Karton wick-  
lich immer  
ins Altpapier?

Auch für ein echtes Massenproblem sucht der Fraunhofer Cluster CCPE® Lösungen. Mehrere Millionen Pakete werden in Deutschland zugestellt – am Tag! »Im Online-Handel geht es um Systemfragen«, erklärt Pflaum. »Üblicherweise werden bestellte Waren in einem Karton geliefert, der in den allermeisten Fällen anschließend im Altpapier landet. Könnte man hier auf ein Mehrwegsystem umstellen? Welche Anforderungen müsste das System erfüllen?« Im Bereich »Business und Transformation« vermarkten die Forschenden solche Entwicklungen und kommunizieren Innovationen entlang der Wertschöpfungskette – bei den Industriebetrieben, aber auch bei den Verbrauchern. Wie sehr das zirkuläre Wirtschaften den Nerv der Zeit trifft, zeigen Rückmeldungen aus der Industrie: »Zahlreiche Unternehmen aus der gesamten Wertschöpfungskette sind bereits auf uns zugekommen, sowohl Polymer- und Verpackungshersteller als auch Produktvertreiber und Handelsketten«, berichtet Pflaum.

**Es ist der Großteil der Kunststoffe**, 40 Prozent, der als Verpackung verwendet wird. Schließlich kommen 80 bis 90 Prozent aller Lebensmittel verpackt in die Haushalte. Da Lebensmittelverpackungen hohen Anforderungen gerecht werden müssen, bestehen sie oft aus Mehrschichtlaminatfolien. Für dieses komplexe System verschiedener Materialien gab es bisher kein geeignetes Recyclingverfahren. Hierfür gibt es zahlreiche Recyclingansätze auf Basis des CreaSolv®-

Verfahrens aus dem Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV. »Wir verwenden Lösungsmittelgemische, die jeweils für die verschiedenen Kunststoffgemische maßgeschneidert werden«, erläutert Dr. Andreas Mäurer das Prinzip. »Durch eine anschließende Filtration lösen wir zusätzlich Fremdstoffe und unerwünschte Additive heraus.« Dabei haben die Forschenden vor allem den Closed-Loop-Einsatz im Blick, das recycelte Material soll also die gleichen Aufgaben übernehmen können wie vorher. »Mit unseren Businessplänen sind wir mittlerweile in einem Maßstab angelangt, in dem wir wirtschaftlich recyceln können.« Die Erfolgsbeispiele sprechen für sich: Multilayer-Verpackungen wie bei Chipstüten oder Wurstfolien, die bisher nicht in die Wiederverwertung gebracht werden konnten, werden erstmalig in einer vom Fraunhofer IVV aufgebauten Drei-Tonnen-pro-Tag-Demo-Anlage in Indonesien wiederverwertet. Das CreaSolv®-Verfahren eignet sich durch seine hohe Reinigungsleistung auch für stark belastete Kunststoffabfälle. Beispiele hierfür sind mit Flammschutzmitteln belasteter Elektronikschrott oder Styropor® aus der Gebäudedämmung. In einem EU-Projekt baut das Fraunhofer IVV eine Recyclinganlage für Styropor®, die Kapazität liegt bei dreitausend Tonnen pro Jahr. Und in Bayern werden die Abfälle aus dem gelben Sack in einer Pilotanlage recycelt: Die erste Ausbaustufe geht aktuell in Betrieb, hier sollen einige Lkw-Ladungen täglich wiederverwertet werden.

## # Lange nutzen

Nicht nur beim Kunststoff wird Kreislaufwirtschaft stets interessanter. Immer öfter gilt die Devise: »Abfälle sind Rohstoffe am falschen Ort«. Schließlich sind geschlossene Stoffkreisläufe für ein nachhaltiges Wirtschaften unerlässlich. Und noch viel mehr: »Wir betrachten nicht nur die Materialströme, sondern vor allem die Dreifaltigkeit aus Ökologie, Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit«, betont Dr. Andreas Stegmüller, Wissenschaftler an der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS. Die Aufgabe ist komplex. Ein Auto beispielsweise besteht aus Tausenden von Einzelteilen, die alle für sich in ihrer Funktion optimiert wurden. »Betrachten wir diese aus Sicht der Circular Economy, müssen jedoch alle Teile auch nachhaltig produziert sein, sollten keine toxischen Materialien enthalten et cetera. ►

Zwischen zwei Stühlen?  
Dr.-Ing. Hartmut Pflaum,  
Leiter der Cluster-Geschäfts-  
stelle am Fraunhofer-  
UMSICHT, beschäftigt  
sich auch mit Kindersitzen  
als zirkuläres Produkt.



»Hydromechanisch können wir alle Komponenten materialspezifisch separieren – und zwar mit einer Reinheit von nahezu 100 Prozent.«

Dr. Jörg Zimmermann

► Auch beim Recycling haben wir einen bunten Blumenstrauß an technischen Anforderungen«, konkretisiert Stegmüller. Was die laufende Produktion von Autos angeht, so dürfte dies schwer umzusetzen sein. Eine große Chance bietet jedoch der Umstieg auf die Elektromobilität. Besonderes Interesse zeigt die Industrie an modularem Design, bei dem die einzelnen Bauteile zwar miteinander verbunden sind, aber sich leicht austauschen lassen. »Wir fassen dabei Materialien, Prozesse – sowohl Produktions- als auch Recyclingprozesse – und Geschäftsmodelle in einem einheitlichen Modell zusammen«, betont Stegmüller. Was eine solche Analyse bringen kann, zeigt ein Industriefaustauftragsbeispiel aus dem Recycling von Elektrofahrzeug-Batterien: Was sind die ertragreichsten Nutzungsalternativen für Batterien, wenn ihre Leistung nicht mehr ausreicht? Das Forscherteam hat ein entsprechendes Modell erstellt und verschiedene Möglichkeiten analysiert. Das Ergebnis: Zwar führt ein herkömmliches – also stoffliches – Recycling der Batterien zu soliden Erträgen, allerdings sind bis zu zehnmal höhere Erträge zu erwarten, wenn die Batterien vor einem Recycling zunächst als dezentrale Netzspeicher für regenerative Energiequellen genutzt werden. Denn hier ist die Batterieleistung auch dann noch ausreichend, wenn sie für den Fahrzeugbetrieb nicht mehr reicht. Doch müsste dazu die passende Infrastruktur aufgebaut werden. Sprich: Es braucht die entsprechenden Anbieter, die die ausgedienten Batterien aufkaufen und weiter vertreiben, damit sie dann beispielsweise in Privathäusern die überschüssige Energie von Photovoltaikanlagen zwischenspeichern können, bis sie benötigt wird. Die entsprechenden Geschäftsmodelle haben die Fraunhofer-Experten klar benannt. Die Antwort hier lautet: Etwas Neues wagen!

## # Lebenszyklus

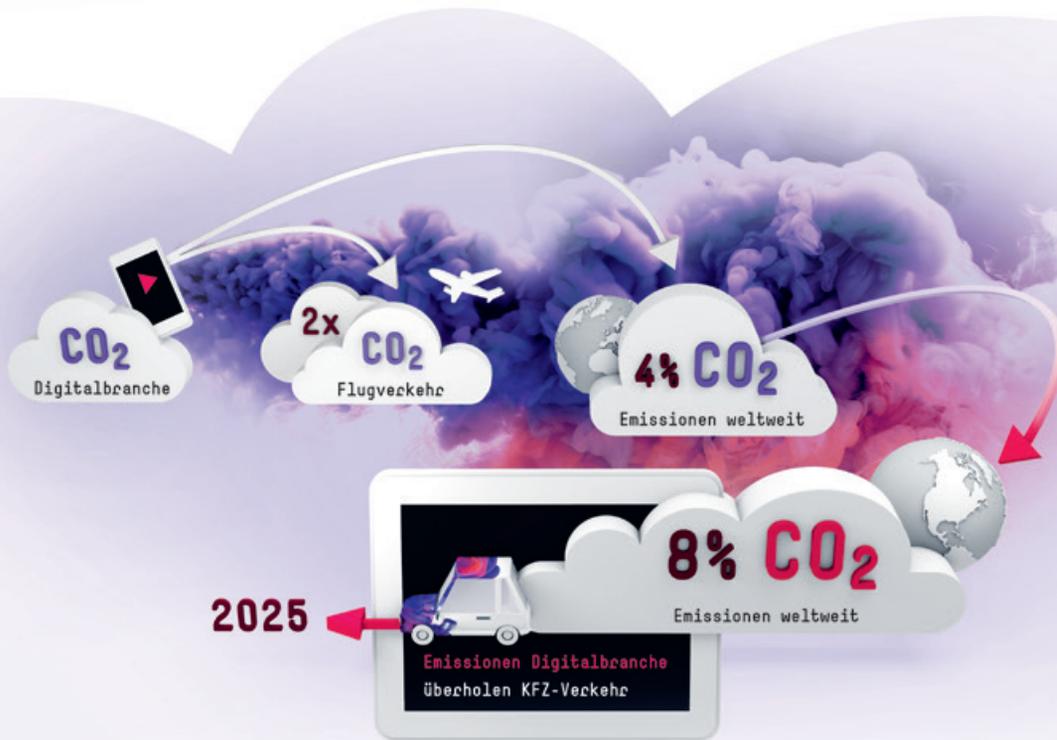
Unternehmen stehen vielfach vor großen Herausforderungen, wenn es darum geht, einen effektiven Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit zu leisten – schließlich werden in den Produktionsprozessen und der Nutzung von Hightech-Produkten häufig bereits hohe Effizienzraten für den Material- und Energieeinsatz erzielt. Doch der Schein trügt: »Durch eine veränderte Interpretation können wir neue Potenziale für die Optimierung identifizieren«, sagt Michael Dieterle, Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT. Möglich macht es der »life cycle gap«, also die Lücke zwischen der Energie und den Rohstoffen, die man bei der Produktion in ein Produkt hineinsteckt, und dem, was man durch das Recycling wieder herausholen kann. Beispiel Lithium-Ionen-Batterie, wie sie in Elektroautos zum Einsatz

kommt. »Im Fall der Lithium-Ionen-Batterie liegt das Potenzial hier bei einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von 45 Prozent«, sagt Dieterle. Allein durch eine Wiederverwendung des Batteriegehäuses lässt sich dieser Gap auf 35 Prozent senken. Auf den gesamten Lebenszyklus der Batterie gesehen sänke die CO<sub>2</sub>-Bilanz um acht Prozent, trotz zusätzlicher Recyclingaufwände für die Gehäusedemontage.

**Durchaus lohnenswert** also, insbesondere vor dem Hintergrund, dass Expertenmeinungen zufolge der Bestand an Elektroautos bis 2025 auf eine Zahl von zwei bis drei Millionen ansteigen wird. Auch für das »Innere« der Batterien gibt es vielversprechende Lösungsansätze: Denn darin stecken wertvolle und teilweise auch versorgungskritische Ressourcen wie Kobalt, Lithium, Nickel und Kupfer, die zumeist aus Ländern außerhalb der EU importiert werden müssen. Ebenso wie Stoffe, die Umwelt und Gesundheit bei unsachgemäßer Entsorgung gefährden würden. Ein effektives Batterierecycling ist somit sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten von großer Relevanz. Das Problem: Es handelt sich um einen komplexen Verbund aus Materialien. Bislang werden die Batterien entweder mechanisch zerkleinert, also geschreddert – die Materialreinheit liegt bei etwa 70 bis 80 Prozent. Schließlich werden die Verbünde beim Schreddern einfach zerkleinert, die Schnipsel können jedoch durchaus noch aus zwei oder mehreren Materialien bestehen und müssen danach aufwendig behandelt werden. Oder die Batterien werden pyrometallurgisch aufgeschmolzen – die Materialreinheit ist hoch, jedoch können nicht alle Wertstoffe zurückgewonnen werden und das Verfahren ist recht energieintensiv. Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer IWKS haben nun einen dritten Weg entwickelt. »Hydromechanisch können wir alle Komponenten materialspezifisch separieren – und zwar mit einer Reinheit von über 99 Prozent bei den Kathoden- und Anodenmaterialien und nahezu 100 Prozent bei Materialien wie Alufolie, Kupferfolie und Edelstahl«, fasst Dr. Jörg Zimmermann zusammen. »Wir nutzen dafür einen hydromechanischen Prozess, der deutlich selektiver ist als ein rein mechanischer Prozess.« ►



Klima-Killer Digitalisierung? Wer abends eine Stunde Video-Streaming genießt, könnte auch 3,5 Kilometer Auto fahren.



Der CO<sub>2</sub>-Verbrauch der Digitalbranche beträgt laut Schätzungen das Doppelte des gesamten Flugverkehrs weltweit – und macht damit vier Prozent der weltweiten Emissionen aus. Schon 2025 könnte die Digitalbranche mehr Treibhausgase erzeugen als der gesamte Kfz-Verkehr.

© Grafik: Daniela Leitner

► Das Prinzip: Die Experten geben die Zellen der Batterie in ein Wasserbad und erzeugen mit einem hohen Spannungspuls einen Durchschlag im Wasser. Auf diese Weise erzeugen sie eine Druckänderung, die das Material an den Schwachstellen angreift – also an den Materialübergängen. Sprich: Die Batteriezellen werden nicht einfach kleingehackt, sondern in sortenreine Einzelteile zerlegt. Im Technikumsmaßstab funktioniert das Verfahren bereits, bis Ende 2020 soll die Pilotanlage zu einer kontinuierlich laufenden Anlage umgebaut werden.

## # Leihmodelle



Muss man wirklich alles selbst besitzen, was man hin und wieder braucht? Diese Frage stellen sich im Zuge der Nachhaltigkeit immer mehr Menschen. Was die Mobilität angeht, so sind Leihmodelle schon recht gut bekannt, sei es das Car Sharing, seien es Verleihsysteme

für Elektroroller oder Fahrräder – auch für Elektroautobatterien werden solche Modelle in Erwägung gezogen. Recht neu dagegen sind solche Leihansätze, wenn es um Kleidung geht. Sinn machen sie in diesem Bereich allemal: Studien von Greenpeace zufolge werden rund 30 Prozent der gekauften Kleidung nicht oder nur äußerst selten genutzt. Könnte man solche Fehlkäufe vermeiden, wäre schon viel gewonnen. Dieser Gedanke ruft neue Geschäftsmodelle auf den Plan. So bietet Tchibo etwa an, die von ihnen produzierten Kleidungsstücke unter Tchibo Share zu leihen statt zu kaufen. Hinter dem Verleihsystem steht die Relenda GmbH. Doch wie nachhaltig und wirtschaftlich ist ein solches Verleihmodell, wenn man Aspekte wie den großen Logistikaufwand und die kleine Zielgruppe berücksichtigt? Dies untersuchte das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI anhand von zwei bestehenden Geschäftsmodellen der Relenda GmbH in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF geförderten Projekt Wear2Share. »Was wir bereits sagen können, ist, dass diese Leihmodelle ökonomisch tragfähig sind, auch wenn die Kosten für Logistik und Reinigung hoch sind«, sagt Dr. Johannes Schuler, Projektleiter am Fraunhofer ISI. Was die Nachhaltigkeit angeht, so lässt sich die Frage bisher noch nicht eindeutig beantworten – es kommt hier auf die Rahmenbedingungen an.

## # Intelligent produzieren

Die richtigen Rahmenbedingungen spielen auch bei Produktionssystemen eine große Rolle – etwa in deutschen Gießereien. Dort werden jährlich über fünf Millionen Bauteile und Komponenten produziert, etwa 25 Prozent der Bruttowertschöpfung fallen an Energiekosten an. Das geht mit einem hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß einher, allein im Bereich der Alu- und Leichtmetallteile sind es etwa eine Million Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Das geht besser: »Über einen mobilen Tiegel und den Umstieg von Strom auf Gas können wir 60 Prozent der Energie einsparen – was einer Einsparung von bis zu 80 Prozent CO<sub>2</sub> gleichkommen könnte«, sagt Marc Kujath, Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. Entwickelt wurde der Ansatz gemeinsam mit Partnern im Projekt ETAL. Die Forscherinnen und Forscher vom Fraunhofer IFF erfassten die Prozesse und bildeten die Fabrik in Modellen ab. Anhand dieser Modelle können sie nun auch für andere Gießerei-Betriebe bewerten, welcher Ansatz sich für sie lohnt.

**Hinsichtlich der »grünen« Energie** gibt es ebenfalls viel Einsparpotenzial zu heben. So untersuchen die Forschenden des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF im Projekt RELflex, wie Unternehmen ihre über Photovoltaik und Co. erzeugte Energie für ihre eigenen Produktionsprozesse nutzen können – und somit ihre Effizienz, Wettbewerbsfähigkeit und Autarkie erhöhen. Dies wirkt sich auch auf die Geschäftsmodelle aus: So können sie etwa die Latte bei »grünen« Produkten höher legen und diese nicht nur mit biologisch erzeugten Materialien herstellen, sondern auch mit grüner Energie. Am effizientesten wäre es, die Produktion anzupassen und Pufferspeicher einzubauen – also auf Vorrat zu produzieren, wenn gerade viel Energie zur Verfügung steht.

Nachhaltigkeit fordern viele Kunden nicht nur bei industriell erzeugten Produkten ein, sondern gerade auch bei Lebensmitteln – wie der Trend zu Bioprodukten und regional hergestellten Lebensmitteln zeigt. Doch nicht nur aus diesem Grund stehen Landwirte vor der Aufgabe, ihre Prozesse anzupassen: Nach den trockenen Sommern der letzten Jahre fürchten sie darüber hinaus, dass sie ihr jetziges Bewässerungssystem nicht mehr aufrechterhalten können: Es fehlt schlichtweg an Wasser. ►

Wir mieten Autos.  
Wir leihen E-Scooter.  
Lohnen sich Leihmodelle auch für Kleidung?



Kleidung leihen statt kaufen?  
»Die untersuchten Modelle sind  
ökonomisch tragfähig«, sagt  
Dr. Johannes Schuler, Projektleiter  
am Fraunhofer ISI.

► **Einen Ausweg bietet** die hydroponische Pflanzenproduktion, bei der die Pflanzen ähnlich wie Hydrokulturen bei Zimmerpflanzen auf Steinwolle wachsen und mit deutlich weniger Wasser auskommen. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IGB gingen im Projekt HypoWave gemeinsam mit Partnern nun noch einen Schritt weiter Richtung Nachhaltigkeit: »Wir haben untersucht, in welcher Form man Wasser aus Kläranlagen für diesen Anbau nutzen kann und welche Aufbereitung des Wassers nötig wäre«, sagt Dr. Marius Mohr, Leiter Innovationsfeld Wasser am Fraunhofer IGB. Verschiedene Fallstudien zeigten: Sinn macht das vor allem dort, wo aufgrund der sich immer wieder ändernden Vorschriften eine Erweiterung für das Klärwerk nötig wäre. Denn während die Nährstoffe aus den Abwässern entfernt werden müssen, wenn man sie in die Flüsse einleiten möchte, sind sie für die Pflanzenproduktion gewünscht. »Zudem können wir auf diese Weise kleinere und nachhaltigere Wasserkreisläufe realisieren«, sagt Mohr.

Vor allem in trockenen Gebieten stellt die Wasserversorgung für Pflanze, Tier und Mensch eine Herausforderung dar – etwa in Afrika südlich der Sahara. Zunehmend setzt man dort auf die Entsalzung von Meer- und Brackwasser. Die Umkehrosmose hat dabei zwar einen Marktanteil von 65 Prozent, sie hat jedoch gravierende Nachteile: »Es wird viel Energie verbraucht, was bei konventioneller Energieerzeugung zu hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Zum anderen sind aufwendige Anti-Fouling-Prozesse nötig, bei denen die eingesetzten Chemikalien vielfach ins Meer oder Grundwasser gelangen«, erklärt der Koordinator des Projekts ICON WASTEC Dr. Lothar Schäfer vom Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST. In dem Projekt arbeiten verschiedene Fraunhofer-Institute mit der Universität Stellenbosch in Südafrika daran, die Effizienz bei der Entsalzung zu steigern und nachhaltige Reinigungsprozesse zu entwickeln, damit Meer- und Grundwasser chemikalienfrei bleiben. Weitere Ansätze sind, die Anlagen zu dezentralisieren und mikrobiell belastetes Wasser für die Nahrungsmittelproduktion aufzubereiten.

Wasser ist jedoch nicht nur für die herkömmliche Landwirtschaft ein bedeutender Faktor, sondern auch für die Nahrungsmittelproduktion in Form von Aquakulturen. Diese gewinnen für die Nahrungsmittelversorgung immer mehr an Bedeutung. Dafür gibt es zweierlei Gründe: Zum einen sind die Meere weitgehend überfischt und die Fischbestände müssen durch Fangquoten geschützt werden. Zum anderen wird die pro Kopf verfügbare Ackerfläche knapp. Zudem ist Fisch ein ausgezeichnete Futterverwerter: Ein Kilo Futter ergibt ein Kilo Fleisch – bei Schweinen benötigt man dafür etwa drei Kilo Futter, bei Rindern gar bis zu zehn. Dieser Faktor wird immer bedeutender, weil die Weltbevölkerung weiter wächst. Die UNO geht aktuell von einem Wachstum von derzeit 7,7 auf 9,7 Milliarden 2050 aus.

Ein Kilo  
Futter ergibt  
ein Kilo  
essbaren  
Fisch. Ein  
Kilo Schweine-  
fleisch braucht  
drei Kilo,  
ein Kilo Rind-  
fleisch bis zu  
zehn Kilogramm  
Futter.



### Etwa die Hälfte aller Fische im Handel

stammt mittlerweile aus großen Farmen.

Doch eine ökologisch sinnvolle Alternative zum Wildfang sind sie häufig nicht. Nah-

rungsreste und Fischkot erhöhen den Nährstoffeintrag in die Gewässer. Prof. Charli Kruse, Leiter der Fraunhofer-Einrichtung für Marine Biotechnologie und Zelltechnik EMB in Lübeck, und sein Team arbeiten an einer Lösung: »Wir entwickeln nachhaltige Anlagen für die Fischzucht, in denen das Wasser in einem geschlossenen Kreislauf an Land geführt wird. Zudem leiten wir das nährstoffhaltige Abwasser der Fische nicht einfach in die Kanalisation, sondern nutzen es für die Aufzucht anderer Organismen wie Muscheln oder Makroalgen. Wir recyceln also die Abfallprodukte einer Art, indem sie von einer anderen Art aufgenommen werden.« Das Abwasser der Fischzucht wird auf diese Weise nicht nur gefiltert – es entstehen auch zusätzliche Produkte, mit denen sich weitere Einnahmen erzielen lassen. Die offenen Fischfarmen im Meer mit ihren hohen Erträgen können Kreislaufanlagen zwar noch nicht ersetzen. »Man könnte die Massenfischhaltung aber für die Umwelt weniger belastend gestalten, indem man verschiedene Organismen, die die Nährstofflast senken, dort ausbringt«, überlegt Kruse. Und auf diese Weise einen weiteren Schritt in Richtung der nachhaltigen Lebensweise machen, für die die Jugendlichen in ihren Freitagsdemonstrationen auf die Straße gehen. ■



### Chaos? Ordnung? Konrad!

Fotograf für die Titelgeschichte dieses **Fraunhofer-Magazins weiter.vorn** ist **Norman Konrad**: 1976 in Gotha geboren, Ausbildung zum Fahrzeugbauer, Studium Fotografie und Design in Bielefeld und Prag, für seine Arbeiten ausgezeichnet mit dem »**Silbernen Löwen**« in Cannes, dem »**European Design Award**« in Gold und dem »**Silver Cube**« des Art Directors Club New York.

Der **Wahl-Berliner** ist bekannt für seinen besonderen Umgang mit Farben – und für die höchste Sorgfalt, mit der er das vordergründige Chaos anordnet. »Ich habe eine sehr genaue Vorstellung, wo was stehen oder liegen soll«, sagt Konrad. »So genau, dass Außenstehende schon mal den Kopf schütteln.« Für das **Motiv rechts** nutzte der Fotograf ein noch **unbefülltes Großaquarium**. Der Arm am oberen Bildrand gehört zum Hausmeister. Nach Zeugenaussagen hat er die Fotoaktion unbeschadet überstanden.



Prof. Charli Kruse leitet die Fraunhofer-Einrichtung für Marine Biotechnologie und Zelltechnik EMB.

# »Das spart richtig Geld!«

Nachhaltigkeit mit dem Blick der Wirtschaft betrachten: Das empfiehlt Prof. Julia Arlinghaus, Leiterin des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg.

Interview: Josef Seitz

## **Frau Prof. Arlinghaus, schließen sich Ökologie und Ökonomie aus?**

**Arlinghaus:** Ganz im Gegenteil. Wir leben doch in der spannendsten Zeit überhaupt, in der sich die Unternehmen wechselseitig überholen im Wettlauf um Klimaneutralität. Es gibt heute Fonds, die auf grüne Technologien setzen, es gibt Fonds, die auf Nachhaltigkeit setzen. Ökologie ist zu einem Kriterium für die Investoren geworden.

## **Werden wir als Verbraucher Verzicht üben müssen?**

Das Schöne ist, dass jeder die Freiheit hat, sein Konsumverhalten selber zu bestimmen. Was ich dabei beobachte: Gerade viele Jüngere entscheiden sich aktiv und sehr bewusst für eine neue Art von Produkten. Als Hochschullehrerin erlebe ich intensive Diskussionen mit meinen Studierenden, ob wir nun – heute noch ressourcenintensive – Angebote wie Same Day Delivery und Same Hour Delivery wirklich brauchen. Und ob Unternehmer nicht mehr Verantwortung zeigen sollten.

## **Wie kriegen wir also die Gegensätze zu neuer Nachhaltigkeit zusammen?**

Mit dem Blick der Wirtschaft. Unsere Unternehmen bewegen sich doch in weitgehend gesättigten Märkten. Gleichzeitig haben wir auf der ganzen Welt Bevölkerungsgruppen, mehrere Milliarden stark, die wirklich in Armut leben. Wenn es gelingt, an deren Bedingungen angepasste Produkte herzustellen und zu vermarkten, dann kann daraus durchaus eine klassische Win-win-Situation entstehen. Auf der einen Seite bekämpfen wir die Armut. Und auf der anderen Seite erschließen wir immer attraktivere Märkte für unsere Unternehmen. Damit das aber nachhaltig sein kann, auch im Sinn einer sozialen Nachhaltigkeit, darf man nicht einfach unsere Geschäftsmodelle kopieren und exportieren. Wir müssen

Lösungen finden, um Menschen vor Ort in Produktions- und Lieferketten zu integrieren. Dann entstehen Arbeitsplätze. Dann entsteht Bildung. Dann entsteht Wohlstand.

## **Zurück nach Europa und Deutschland. Wie lassen sich Geldbeutel und Umwelt gleichzeitig schonen?**

Neue Technologien – sei es Sensortechnik, sei es Künstliche Intelligenz, sei es Robotik – helfen uns natürlich, Prozesse effizienter zu machen. Wir minimieren Transportstrecken. Das spart Energie. Wir können aber auch die Qualität unserer Produktionsprozesse verbessern. Gerade erst konnten wir bei einem Unternehmen mit dem Einsatz Künstlicher Intelligenz und einer integrierten Qualitätsprüfung im Produktionsprozess den Ausschuss um 30 Prozent reduzieren. Das spart richtig Geld und Ressourcen! In einem anderen Projekt ging es gerade um die Energieoptimierung in einer Gießerei. Da haben wir neue Technologien entwickelt, aber auch die Produktionsplanung und Produktionssteuerung verändert. Damit reduzieren wir die Kohlendioxidemissionen um bis zu 80 Prozent und die Energiekosten um bis zu 60 Prozent. Das heißt, wir optimieren nicht mehr nur daraufhin, möglichst schnell zu sein. Wir führen eine weitere Dimension ein, um zum Beispiel mit dem Energieangebot aus erneuerbaren Energien eine Produktion optimal gestalten zu können. Dafür nutzen wir übrigens dieselben Techniken, die uns auch helfen, Fabriken effizienter zu machen.

## **Frau Prof. Arlinghaus, Sie klingen bemerkenswert optimistisch!**

Das bin ich tatsächlich. Mein persönlicher Wunsch ist allerdings, dass wir immer, wenn wir über Nachhaltigkeit sprechen, die soziale Komponente nicht aus den Augen verlieren. Gerade mit Blick auf die Digitalisierung ist es wichtig, auch zu bedenken, dass wir überall mit Menschen zu tun haben. Und die müssen wir mitnehmen.

»Wir müssen auch Traditionen, historische Abläufe und gewachsene Strukturen berücksichtigen. Nur so erreichen wir den deutschen Mittelstand.«

Prof. Julia Arlinghaus



Prof. Julia Arlinghaus leitet seit Oktober das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg.  
© Viktoria Kühne

**Sie machen sich zur Fürsprecherin für den – entschuldigen Sie das Unwort – Faktor Mensch. Wie schaffen Sie es, gegenüber Wirtschaftsunternehmen in härter werdenden Zeiten zugunsten dieses weichen Faktors zu plädieren?**

Ehrlich gesagt muss ich da gar kein Unternehmen überreden. Im Gegenteil erlebe ich, dass die Wirtschaft mit diesen Fragen zu uns kommt. In unserem Institut haben wir in allen Abteilungen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die sich auf Lernprozesse und Anpassungsprozesse spezialisiert haben. Meine Erfahrung: Die Wirtschaft nimmt das Angebot, dass wir das neben der Technologie zusätzlich leisten, dankend an.

**Für die Zukunft forschen, dabei aber die Gegenwart nicht vergessen?**

Klar müssen wir bei Fraunhofer fünf, zehn, vielleicht auch noch mehr Jahre vorausdenken. Aber wir dürfen nicht vergessen: Die Lebenswirklichkeit der Menschen entwickelt sich langsamer. Und auch eine Fabrik steht schon 80, manchmal 100 Jahre. Da reicht es nicht, über visionäre Ideen zu sprechen. Da müssen wir auch Traditionen, historische Abläufe und gewachsene Strukturen berücksichtigen. Nur so erreichen wir den deutschen Mittelstand. Wir müssen die Menschen und wir müssen die Unternehmen dort abholen, wo sie wirklich stehen.

**Wo sehen Sie künftig die großen Herausforderungen?**

Dieser Spagat zwischen dem Heute und einem Übermorgen ist die eine. In meiner Forschung beschäftige ich mich seit vielen Jahren schon mit Supply-Chain-Risiko-Management. Wir müssen flexibler und resilienter gegenüber Störungen und Schwankungen werden. Wir müssen unsere Energie- und unsere Produktionssysteme gemeinsam denken – das ist ein ökologischer und ökonomischer Weg in die Zukunft. ■

»Wir haben die Kohlendioxidemissionen um bis zu 80 Prozent und die Energiekosten um bis zu 60 Prozent reduziert.«

Prof. Julia Arlinghaus

Seit 2015 schon arbeiten neun Projektpartner aus vier Ländern daran, die Wertstoffe aus Handys möglichst vollständig zurückzugewinnen. © AdobeStock

## Hightech-Metalle und Seltene Erden

### Tantal

Elastisches, aber sehr widerstandsfähiges und stabiles Schwermetall mit sehr hohem Schmelzpunkt. Wird hauptsächlich für kleine Kondensatoren verwendet. Wird in Konfliktregionen wie Kongo abgebaut.

### Gallium

Weiches, silberfarbenes Metall mit diamagnetischen Eigenschaften. Einsatz in der Halbleitertechnik etwa bei Transistoren und Schaltkreisen. Aber auch in Solarzellen.

### Wolfram

Sehr hartes, widerstandsfähiges und hitzebeständiges Metall. Wird genutzt als Spezialstahl für Raketen oder in der Militärtechnik aber auch als Glühdraht bei Lampen. Als Legierung zum Härten von Stählen verwendet. Wird unter anderem in China abgebaut.

### Kobalt

Ein magnetisches und vielseitig verwendbares Schwermetall, das unter anderem die Widerstandsfestigkeit von Stahllegierungen verbessert. Wird auch in Batterien verwendet. Abbau in Konfliktregionen wie Kongo.



# Schätze aus dem Smartphone

Rohstoffe, wie sie in nahezu jedem Elektrogerät oder Smartphone stecken, sind wertvoll. Und sie werden immer kostbarer – denn die Preise steigen!

Autoren: Mehmet Toprak

**E**in Kilo Gallium: 270 US-Dollar. Ein Kilo Tantal: 260 US-Dollar. Das Kilo Kobalt: 24 US-Dollar. Recycling wird nicht nur wichtiger, weil die Rohstoffe selten sind. Es wird auch immer mehr zum Geschäftsmodell. Allerdings gibt es ein Problem: Die Rohstoffe aus alten Smartphones oder Notebooks zu extrahieren ist schwierig. Gerade, wenn sie wie Tantal in winzigen Kondensatoren versteckt sind, ist es bisher kaum möglich, sie zurückzugewinnen. Am Ende werden viele Komponenten eingeschmolzen und die wertvollen Metalle und Seltenen Erden gehen unwiederbringlich in der Schlacke verloren. Prof. Reinhard Noll und Cord Fricke-Begemann wollen das ändern. Beide arbeiten am Aachener Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und haben mit ihren Mitarbeitern Konzepte entwickelt, die einen völligen neuen Ansatz beim Recycling ermöglichen.

Prof. Noll ist Koordinator des EU-Projekts ADIR. Seit 2015 erforschen neun Projektpartner aus vier Ländern, wie sich Elektronikprodukte halbautomatisch zerlegen und die darin enthaltenen Wertstoffe möglichst vollständig zurückgewinnen lassen. Dr. Cord Fricke-Begemann leitet am ILT die Gruppe Materialanalytik und die Projektarbeiten des ILT in ADIR. An den FuE-Arbeiten zur Robotik ist das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg beteiligt. Bisher hatte man beim Recycling Geräte erst mal demontiert und dann versucht, die Wertstoffe herauszuholen. Der besondere Ansatz von ADIR: Die Elektronikkomponenten werden schon vor dem Zerlegen analysiert, um die begehrten Stoffe zu lokalisieren.

**Die Technologien sind eine clevere Kombination** von Bewährtem: intelligente Prozessführung, flexible Robotik, hochauflösende Kameras inklusive Bildauswertung, mindestens drei verschiedene Lasertechniken. Nicht umsonst ist das ILT eine der führenden Forschungsstätten für Lasertechnologie in Europa. Die Recycling-Anlage besteht aus mehreren Stationen. An jeder Station steht zunächst einmal die Erkennung des Produkts oder des Bauteils im Fokus. Handys werden zuerst nach Typ und Modell sortiert.

Eine Datenbank hilft bei der Erkennung. Nun wird das Gehäuse des Handys aufgefräst und geöffnet. Besondere Vorsicht gilt dem Akku, den der Roboter unbeschädigt entnimmt und einer gesonderten Verwertung zuführt. Die jetzt offen

liegenden Platinen werden im nächsten Schritt mit hochauflösenden Kameras aufgenommen und die Bilder werden von einer Analysesoftware im Zusammenspiel mit einer internen Datenbank ausgewertet. Diese erkennt in der Regel schon, welcher Platinentyp vorliegt, und lokalisiert Bauteile, die wertvolle Rohstoffe wie Metalle oder Seltene Erden enthalten.

Hinzu kommt die Technologie, bei der das ILT über besondere Kompetenz verfügt: Laser. Damit lassen sich drei verschiedene Aufgaben ausführen. Die 3D-Vermessung erstellt ein Höhenprofil der Platine, das weitere Rückschlüsse auf Struktur und Aufbau ermöglicht. Die Laserspektroskopie dringt sogar in die Oberfläche der elektronischen Bauteile ein und kann darin enthaltene Wertstoffe identifizieren. Sind Platine und Komponenten analysiert und identifiziert, tritt Laser Nummer drei in Aktion, um einzelne Komponenten zu entlöten oder herauszuschneiden. Mit der Kombination dieser Techniken lassen sich winzige Kondensatoren, die das wertvolle Tantal enthalten, herauspicken und einer Sortierfraktion zuführen. »Wir können Tantal in einer Fraktion mit einem Gehalt von über 30 Prozent anreichern«, erklärt Projektleiter Fricke-Begemann. »Das ist deutlich mehr als im Tantalerz-Konzentrat, das die Hersteller von ihren Zulieferern bekommen.«

**Manchmal sind einzelne Module** mit einer Platine oder dem Gehäuse verklebt, beispielsweise der Vibrationsalarm von Handys. Der besteht in der Hauptsache aus einem winzigen Motor und einer Unwuchtmasse. Diese besteht nahezu zu 100 Prozent aus Wolfram. Die verklebten Motoren werden von den Fraunhofer-Experten mit elektromagnetisch erzeugten Stoßwellen vom Gehäuse gelöst.

Mensch, Software, Kameratechnik, die verschiedenen Laser-Verfahren zum Messen, Entlöten, Schneiden und Roboter mit ihren Greifarmen, sie alle bilden damit das perfekte Recycling-Team. Es ist in der Lage, auch komplexe und hoch integrierte Elektronikprodukte sauber zu zerlegen und die darin enthaltenen Stoffe in größtmöglicher Reinheit zurückzugewinnen. Mit der Grundidee beschäftigt sich Fricke-Begemann schon seit fünf Jahren. Inzwischen steht das Projekt vor dem Abschluss. Die Machbarkeit des Konzepts ist bewiesen, und es kann mit höheren Durchsätzen auch wirtschaftlich funktionieren. Dafür sind vom ILT und seinen Partnern noch die erkannten Verbesserungsmöglichkeiten umzusetzen. Der Feinschliff ist an einigen Stellen noch nötig, bevor die Lösung dann tatsächlich an die Industrie übergeben werden kann. ■

Mensch,  
Software,  
Laser –  
alles bildet  
zusammen  
das perfekte  
Recycling-  
Team.

# »Tue Gutes – und verdiene Geld damit!«

Vom Chemielaboranten zum Bioökonom: Diplomchemiker Gerd Unkelbach leitet das Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP. Chemie ist für den 40-Jährigen nicht das Problem – sie ist die Chance, die Probleme zu lösen.

Interview: Josef Seitz

**»Chemie« hören wir in der öffentlichen Diskussion heute häufig als zusammengesetztes Wort: »Chemiebelastung«. Herr Unkelbach, sind Sie eine Gefahr für unsere Welt?**

**Unkelbach:** Ohne chemische Stoffwandlungsprozesse gäbe es das Leben nicht, das wir heute führen. 98 Prozent unserer Produkte des alltäglichen Gebrauchs sind einmal durch einen chemischen Umwandlungsprozess gelaufen. Ohne Chemie gibt es nichts – zugegeben, auch ein paar Gefahren gäbe es weniger. Aber eben auch das sehr, sehr viele Gute.

**Ich sehe schon: Sie glauben an den Nutzen für die Menschheit, nicht an eine Gefahr für die Welt.**

Ganz besonders, wenn man auf Themen wie nachwachsende Rohstoffe zurückgreifen kann, wie bei uns im Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP. Wobei: Man kann auch mit nachhaltigen Produktionsprozessen sehr viel Unheil anrichten und trotzdem ein grünes Label draufkleben. Deswegen gehört für mich bei der Verfahrensentwicklung immer der Gedanke dazu: Ist es wirklich ökologisch? Und: Ist der Prozess sicher?

**Was beurteilen Sie als vordergründig ökologisch?**

Jeder, den es in die Natur zieht, will heute wasserabweisende Funktionskleidung tragen. Für die Oberflächenbehandlung werden perfluorierte Chemikalien genutzt – superschlecht fürs Ozonloch, sobald sie in die Umwelt gelangen. Solche wasserabweisenden Eigenschaften kann ich aber auch mittels Biokatalyse herstellen. Das sind auch Arbeiten, die gerade bei

uns im Hause laufen. Unser Ziel ist also, immer mehr gefährliche Stoffe gegen ungefährliche auszutauschen und harsche Reaktionsbedingungen durch Katalyseprozesse, chemisch oder biotechnologisch, die weniger Energie verbrauchen, zu ersetzen.

**Sie verstehen die chemische Industrie nicht als Problem, sondern sehr viel eher als die Lösung.**

Unseren Lebensstandard – und letztlich auch unsere Möglichkeiten, die Probleme der Menschheit zu lösen! –, hätten wir ohne Chemie niemals erreichen können.

**Und schon wieder sind wir beim Thema Nachhaltigkeit. Wird Nachhaltigkeit heißen müssen, dass wir verzichten, uns in Zukunft beschränken und weniger Geld verdienen?**

An dem Punkt bin ich durchaus extremerer Meinung: Wenn wir mit dem, was wir machen, kein Geld verdienen können, werden wir es niemals in die industrielle Umsetzung überführen können. Damit hat es überhaupt keine Zugkraft. Wenn irgendwo sehr viel Idealismus drinsteckt, dann ist das meistens ein Projekt, das einzigartig ist, das man nicht skalieren kann – und wo letztlich nur irgendein Multimillionär viel Geld ausgibt, um sein Gewissen zu beruhigen. Wenn aber etwas laufen soll ohne politischen Support – und damit letztlich auch, ohne am Tropf von Politikern zu hängen –, dann muss das schnell alleine lebensfähig sein. Natürlich brauchen wir Risikominimierungsgelder, um Dinge anzuschieben. Aber das eigentliche Geschäftsmodell muss alleine tragfähig sein – und Geld verdienen.

»Chemie ist für unser Land ähnlich wichtig wie das Automobil, auch wenn man weniger darüber spricht.«



Gerd Unkelbach leitet das Fraunhofer-Institut CBP. Seine ganz persönliche Leidenschaft gilt dem Stoff, der Bäume stehen lässt: Lignin. © Norman Konrad

### So ist die chemische Industrie ja auch zu einem nicht ganz kleinen Arbeitgeber geworden ...

... mit 460 000 Arbeitsplätzen in unserem Land. Deutschland ist der größte Chemieproduzent in Europa. Der volkswirtschaftliche Mehrwert gerade der deutschen Chemie ist riesengroß. Chemie ist für unser Land ähnlich wichtig wie das Automobil, auch wenn man darüber weniger spricht. Nur: Das wollen die meisten Leute nicht wahrhaben. Der Endkunde fährt mit dem Auto, der stellt sich aber nicht die Frage, wo das Polyamid herkommt oder das Polyurethan fürs Armaturenbrett.

### Was beschäftigt Sie aktuell am meisten?

Mein persönliches Steckenpferd ist der nachwachsende Rohstoff Lignin. Diesen Stoff, der die Zellulosefaser umrundet und vor bakteriellem Abbau schützt, finden wir im Holz oder im Stroh, eigentlich in allen verholzenden Pflanzen. Lignin ist der Klebstoff, der es ermöglicht, dass der Baum nach oben wächst, damit seine Blätter genügend Sonne einfangen können. Das Lignin wird aber von jeder Pflanze individuell aufgebaut. Das bringt die Chemie an ihre Grenzen, wenn sie das Molekül nutzen will. Diese Schwierigkeit in den Griff

zu bekommen und auf eine Basis zu stellen, mit der sich neue Produkte herstellen lassen, das ist für mich wirklich spannend. Irgendjemand hat mal gestöhnt, man könne alles aus Lignin machen, außer Geld. Und das ist natürlich der Anreiz für mich, genau dieses Problem zu lösen und auch hochindividuelles Lignin in die Industrie zu bringen – zum Geldverdienen.

### Ihr Institut arbeitet ja sehr intensiv an nachwachsenden Rohstoffen. Wo sehen Sie da die größte Perspektive?

Wir wollen Produkte entwickeln, die existierende fossil basierte Produkte ersetzen. Oder, und das ist die eigentliche Kunst, Produkte, die bessere Eigenschaften haben als fossil basierte. Nehmen Sie zum Beispiel eine Kunststofffolie, die nicht nur biobasiert und bioabbaubar ist, sondern auch noch reißfester als die erdölbasierte.

### Sie schaffen die Möglichkeit zum Geldverdienen, indem Sie geringeren Schaden für die Umwelt mit mehr Nutzen für den Verbraucher verbinden?

Ja. Wenn ein Produkt mehr bietet, dann ist es dem Endverbraucher auch mehr Geld wert. Dann kommt es zuerst in den hochpreisigen Markt, später in den Massenmarkt. Und damit kann man dann wirklich etwas bewegen – auch für die Umwelt.

### Wenn Sie junge Menschen für Chemie begeistern wollen, wie erreichen Sie das?

Die Botschaft ist wirklich ganz einfach: Mit Chemie kann man Gutes tun – und damit auch noch Geld verdienen. ■

»Wir müssen mit dem, was wir machen, Geld verdienen können. Sonst hat es keine Zugkraft.«

»Wir wollen Produkte entwickeln, die bessere Eigenschaften haben als fossil basierte. Das ist die Herausforderung.«

Gerd Unkelbach

# In nur drei Sekunden Hunderttausende Euro sparen

Der Schienenverkehr ist der größte Stromverbraucher in Deutschland. In Nürnberg arbeiten Wissenschaftler daran, Züge energiesparender fahren zu lassen.

Text: Thomas Röhl

**E**s kommt auf die Sekunde an in Nürnberg, genauer gesagt: auf maximal drei Sekunden. Um diesen winzigen Zeitraum müssten sich die Fahrzeiten der U-Bahnen in der fränkischen Großstadt zwischen zwei Stationen verlängern, damit sie deutlich energie- und kostengünstiger unterwegs sind.

»Verschiebungen, die der Fahrgast nicht bemerkt, haben einen signifikanten Einfluss auf den Stromverbrauch«, sagt Dr. Andreas Bärmann. Der Mathematiker leitet das Projekt »Fahrassistenzsysteme im Schienenverkehr« am ADA Lovelace Center for Analytics, Data and Applications in Nürnberg.

Das Zentrum ist eine Gemeinschaftseinrichtung des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS, der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg FAU und der Ludwig-Maximilians-Universität München. Offiziell eröffnet wurde das Kompetenzzentrum für Datenanalyse und KI in der Industrie im Dezember 2019, die Arbeit aufgenommen hat es bereits im Jahr zuvor. Im Auftrag der Verkehrs-Aktiengesellschaft Nürnberg (VAG) untersucht Bärmann, der als Postdoktorand an der FAU forscht, gemeinsam mit seinen Mitarbeitern Patrick Gemander und Lukas Hager, wie sich der Betrieb der U-Bahn energieeffizienter organisieren lässt.

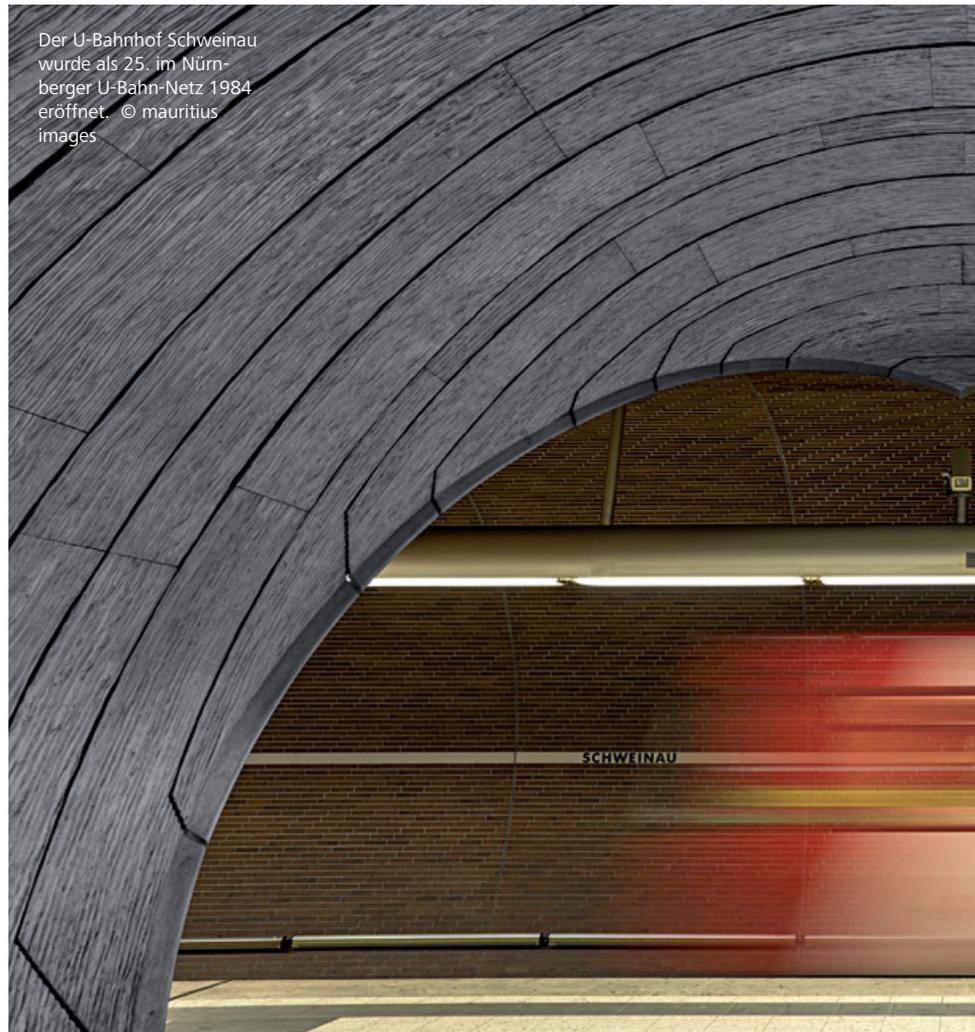
## An- und Abfahrten synchronisieren

Die Antriebsenergie sei ein bedeutender Kostenfaktor bei einem Schienenverkehrsunternehmen, erklärt Bärmann die Motivation des Unternehmens. Um Strom und damit auch Geld zu sparen, haben die ADA-Experten verschiedene Faktoren in ihre Berechnungen einbezogen. Ein Ansatzpunkt ist es, den Fahrplan zu optimieren. Gelingt es, die Zahl gleichzeitiger Abfahrten zu reduzieren, senkt das die Spitzenlast im Bahnstromnetz. Diese Lastspitzen haben maßgeblichen Einfluss auf die Höhe des Strompreises, den das Unternehmen bezahlen muss.

**Ein weiteres Ziel ist es**, die An- und Abfahrten der Züge besser aufeinander abzustimmen. Eine U-Bahn, die bremst, erzeugt dabei Strom, der wieder ins System eingespeist wird.

Diese zurückgewonnene Energie kann ein anderer Zug zum Beschleunigen nutzen – allerdings nur, wenn die Abfahrt zeitgleich zum Bremsvorgang erfolgt. »Ansonsten bleibt die Energie ungenutzt«, sagt Bärmann.

Der U-Bahnhof Schweinau wurde als 25. im Nürnberger U-Bahn-Netz 1984 eröffnet. © mauritius images



**Gigantisches Potenzial: Elf Milliarden Kilowattstunden verbrauchen Personen- und Güterzüge im Jahr.**

Und noch ein dritter Faktor beeinflusst den Energieverbrauch: die Fahrweise der Züge. Beschleunigen sie stets bis zur Höchstgeschwindigkeit und bremsen erst bei der Einfahrt in die Station? Oder fahren sie mit leicht reduziertem Tempo und rollen über eine längere Strecke hinweg aus? Unter Ausnutzung aller Möglichkeiten und unter optimalen Bedingungen ließen sich bei der Nürnberger VAG bis zu zehn Prozent der verbrauchten Energie sparen, haben die Forscher vom ADA Lovelace Center errechnet. Für das Unternehmen bedeutet das bis zu 500 000 Euro geringere Stromkosten im Jahr. Für die Fahrgäste würde sich spürbar nichts ändern, sagt Bärmann. Im Fahrplan käme es durch die geringfügig verlängerten Fahrtzeiten zu Verschiebungen um lediglich plus oder minus 15 Sekunden.

Wie gewaltig das Einsparpotenzial im Schienenverkehr durch die Optimierung der Fahrpläne ist, haben die ADA-Experten in einem früheren Projekt errechnet. Dazu muss man wissen: Der Zugverkehr ist der größte Stromkonsument in Deutschland. Elf Milliarden Kilowattstunden, so viel wie die Stadt

Berlin, verbrauchen Personen- und Güterzüge im Jahr. Bei der Deutschen Bahn, so das Ergebnis einer ADA-Lovelace-Studie, ließe sich im Personenverkehr allein durch die Optimierung der Fahrpläne die Spitzenlast im Bahnstromnetz um 38 Megawatt im Jahr reduzieren. Der Konzern müsste so fünf Millionen Euro jährlich weniger für Energie ausgeben – bares Geld und gut für die Umwelt.

## **Zwei Jahre arbeiten die Forscher schon an der Aufgabe**

Doch einen Fahrplan möglichst energieeffizient zu gestalten, ist eine gewaltige Aufgabe, wie Andreas Bärmann an einem Beispiel erklärt. Bereits bei vier Zügen mit jeweils drei Haltepunkten und sieben wählbaren Zeiten je Abfahrt gibt es 14 Milliarden mögliche Fahrpläne. Dank Bärmanns Fachgebiet, der mathematischen Optimierung, lässt sich die extrem große Zahl der theoretischen Möglichkeiten auf die tatsächlich sinnvollen reduzieren. Dazu, so erläutert Bärmann, sei es allerdings notwendig gewesen, einen speziellen Algorithmus zu programmieren. Zwei Jahre arbeiteten die Nürnberger Forscher daran, diese Aufgabe zu lösen.

**In einem nächsten Schritt** wollen das Team um Bärmann und das Verkehrsunternehmen VAG den Einsatzbereich des Modells erweitern. Dazu sollen Algorithmen für Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden, um die Zugfahrten in Echtzeit zu steuern. »Wir brauchen KI-Methoden, die in der Lage sind, auf Störungen zu reagieren«, beschreibt Bärmann die Herausforderung. Nur dann ließen sich auch im täglichen Betrieb die Einsparpotenziale verwirklichen. In Nürnberg, wo bereits computergesteuerte, fahrerlose U-Bahnen im Einsatz sind, sieht er dazu die besten Möglichkeiten.

Die am ADA Lovelace Center entwickelten Algorithmen ließen sich auch in anderen Bereichen nutzen, sagt Prof. Alexander Martin, Institutsleiter des Fraunhofer IIS und Chef des ADA Lovelace Center. »Viele Unternehmen wissen oft nicht, welche Daten bei ihnen in welcher Qualität und Menge vorliegen, welche Daten sie für die Lösung einer spezifischen Frage bräuchten, oder umgekehrt: welche Anwendungen sie mit ihren Daten überhaupt optimieren können.« Dabei könne sie die Forschung am ADA Lovelace Center unterstützen.

Eine mögliche Anwendung sieht er im Platooning von Lastwagen. Dabei fahren vernetzte Lkw in einem Konvoi und werden vom ersten Fahrzeug aus funkgesteuert – wie ein Zug auf der Straße. Aber auch Produktionsverfahren oder der energiesparende Einsatz von Maschinen ließen sich mithilfe von KI verbessern.

Das sei das Besondere am ADA Lovelace Center, sagt Prof. Martin: »Wir entwickeln die Kompetenzen, Methoden und Verfahren am Beispiel der Anwendungen weiter. Das heißt, wir arbeiten an Use Cases, die aus der industriellen Praxis kommen.«



# Pack den Biosprit in den Tank

Synthetische Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen reduzieren die Treibhausgas-Emissionen um bis zu 30 Prozent im Vergleich zu fossilem Sprit.

Text: Katja Engel

**W**er eine Kreuzfahrt macht, möchte am liebsten entspannt in seiner Koje schlafen, den Tag an der frischen Meeresluft genießen und den Alltag hinter sich lassen. Stören können da nur Gedanken an die Klimabelastung durch den verbrannten Schiffsdiesel.

Das kann sich mit einer neuen Technologie des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Oberhausen ändern. Hier stellt Dr. Andreas Menne, Abteilungsleiter für Bioraffinerie und Biokraftstoffe, mit seinem Team synthetischen Diesel und Benzin aus nachwachsenden Rohstoffen her.

Nicht nur Kreuzfahrt-, auch Containerschiffe, Flugzeuge und der Verkehr auf der Straße brauchen noch Jahrzehnte flüssigen Sprit, der am besten nicht aus Erdöl stammt. In Summe ist das eine ganze Menge, selbst wenn im Jahr 2030 bis zu 30 Prozent E-Mobile durch die Städte kurven. Jeden Tag werden für jeden erwachsenen Menschen in Deutschland 3,5 Liter Kraftstoff allein für Verkehr und Transport verbraucht. Da kommen für 365 Tage im Jahr rund 87 Milliarden Liter zusammen, die rund ein Fünftel der Treibhausgase ausmachen.

**Diese Klimalast signifikant verringern** wollen Maschinenbauingenieur Menne und sein Team. Und so verwandelt er Bioethanol in Diesel, Benzin oder Jetfuel, die nahezu die gleichen Eigenschaften haben wie fossile Kraftstoffe. Nachwachsende Rohstoffe helfen, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Transportsektors erheblich zu reduzieren. »Ob Stroh, Laub, Sägemehl oder Restholz – als Ausgangsrohstoff für das Bioethanol können wir fast alles verwenden«, erklärt Menne. Der neue



Für den neuen Treibstoff nutzen die Forscher Bioethanol aus Weizenstroh.  
© Adobe Stock

klimafreundliche Biosprit setzt deutlich weniger Treibhausgase frei und soll den Tank komplett füllen können. Bei E10 wird das Bioethanol nur zu fünf bis zehn Prozent dem fossilen Benzin beigemischt. »Da merke ich den Klimaeffekt kaum«, so Menne. »Allein E-Autos, Hybrid und Brennstoffzellen werden es nicht schaffen, die Treibhausgas-Emissionen ausreichend schnell zu reduzieren. Wir brauchen einen ganzheitlichen Ansatz und viele Lösungen für die Kraftstoffe der Zukunft.« Die Neufassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) hat den Handlungsdruck erhöht. Fortschrittliche Kraftstoffe sollen bis 2030 einen Anteil von 3,5 Prozent haben.

Die UMSICHT-Forscher produzieren in einer Testanlage bis zu 20 Liter des neuen Biosprits pro Woche. Unter vielen Röhren, Kesseln und Isolierungen stehen am Boden zwei Waagen. Auf einer befindet sich ein kleines Metallfässchen mit Ethanol, auf der anderen ein bauchiges Glasgefäß, in das der fertige Kraftstoff fließt. So können die Forscher schon während der Produktion einfach überprüfen, wie viel in die Anlage fließt und wie viel wieder herauskommt.

Sie verwenden Bioethanol, das aus Weizenstroh hergestellt wird. »Aber eigentlich kann ich auch jeden anderen Alkohol nehmen«, sagt Menne. Der Alkohol aus Stroh fließt aus dem Metallfass zuerst noch flüssig durch die Rohrleitungen der Testanlage in einen Verdampfer. Erst nachdem er 350 Grad heiß ist und unter einem Druck von 20 bar steht, strömt der gasförmige Alkohol in das Herzstück der Anlage, den röhrenförmigen Reaktor. Er ist gefüllt mit Stücken aus Aktivkohle, die mit einem neu entwickelten Katalysatormaterial beschichtet sind. Sie treiben die Kondensation des Gases voran, bei der die einzelnen Kohlenstoffverbindungen gekoppelt werden. Je nachdem wie viele Kohlenstoffe sich verbinden, entsteht Benzin, Kerosin oder Diesel.

## Mit Alkohol zu Kraftstoffen

Entdeckt hatte Menne den Reaktionsbeschleuniger schon während seiner Promotion 2008. »Oft wird ein Katalysator im Labor entwickelt, und es ist dann schwer, ihn in großen Mengen zu produzieren. Aber für diesen können wir die Materialien preiswert kaufen, denn er besteht nicht aus Edelmetallen oder Seltenen Erden. Und vor allem: Er ist langzeitstabil«, so Menne, der darauf 2012 ein Patent angemeldet hat.

Genug Power hat der Biotreibstoff. Das haben ihm die Forscher des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT im badischen Pfinztal bestätigt. Sie haben den neuen Kraftstoff auf einem Prüfstand mit kommerziell üblichen Motoren getestet.

Einhundert Liter hatte Menne den Gutachtern dafür zur Verfügung gestellt. Und wie bei einem Menschen, der auf einem Ergometer strampelt und mit Messtechnik verkabelt

ist, um die Stärke seines Herzens zu messen, wurden hier präzise die Motorleistung und die Abgaswerte ermittelt. Alles bei unterschiedlicher Leistung im Betrieb, beim Kaltstart und unter verschiedenen Lasten und Drehzahlen.

## Viel Power, niedrige Abgaswerte

Das Ergebnis: Der Biosprit hat eine etwas höhere Energiedichte als herkömmliche Kraftstoffe. Ein Fahrzeug mit dem neuen Treibstoff im Tank hätte also in einem echten Rennen die Nase leicht vorn. Auch die Abgaswerte überzeugten beim synthetischen Kraftstoff. Weniger Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe und wesentlich weniger Ruß kamen aus dem Auspuff. Der Biosprit ist außerdem nah an den physikalischen Eigenschaften von fossilem Diesel und daher normgerecht realisierbar.

Um die Ökobilanz zu erstellen, zählt Venkat Aryan, Chemingenieur am Fraunhofer UMSICHT, jedes Molekül der Klimagase in jedem Prozessschritt zusammen. Die »Well-to-Wheel«-Analyse berücksichtigt alle Treibhausgase von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Umwandlung des Treibstoffs in Bewegungsenergie – die Förderung des Erdöls aus der Erde, den Anbau von Pflanzen für den Biosprit, die Abgase. Je nach Ethanolquelle stehen im Ergebnis dem erdölbasierten Dieseldieselkraftstoff mit 94 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Megajoule 64,3 bis 91,6 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente für synthetischen Diesel aus Weizenstroh gegenüber. Das sind bis zu 32 Prozent weniger. Und Aryan hat bereits einige Ideen, die leicht weitere Einsparungen möglich machen.

»Unser Kraftstoff kann zu Benzin, Diesel oder sogar Kerosin für Flugzeuge werden. Aber Letzteres ist am aufwendigsten«, so Menne.

**Einfacher geht es beim Schiffsdiesel.** Er braucht keine Veredlung durch eine Raffinerie. »Man könnte unsere Anlage einfach so in einen Hafen stellen. Unser Verfahren ist so unkompliziert, dass die Reedereien ihren Diesel selbst produzieren könnten. Dann wäre die Zeit der großen Stinker schnell vorbei«, sagt Menne.

Auch wenn in Oberhausen nur eine Testanlage steht – die Technologie ist bereits marktreif. Jetzt suchen die Forscher Partner, die im industriellen Maßstab produzieren. Erste Gespräche mit Raffinerien haben die Fraunhofer-Experten schon geführt. Zwar ist der synthetische Diesel bisher teurer als Diesel aus Erdöl. Menne ist aber zuversichtlich, dass sich das bald ändern könnte. Denn mit den neuen gesetzlichen Regelungen werden die fossilen Stoffe nicht mehr so billig herzustellen sein. »Auch die Ansprüche der Verbraucher ändern sich. Die wollen vielleicht nicht nur eine Kreuzfahrt richtig genießen, sondern auch wissen, wie klimafreundlich die Banane aus Kolumbien nach Europa verschifft wurde.« ■

»Ob Stroh, Laub oder Sägemehl – als Ausgangsstoff für das Bioethanol können wir fast alles verwenden«, erklärt Dr. Andreas Menne.

# Mehr Quanten für Europa

Die Quantentechnologie hat die Labore verlassen. Hochsensible Magnetfeld-Sensoren könnte es schon in fünf Jahren im Baumarkt geben. Damit jedoch solche echten Produkte und damit Arbeitsplätze am Industriestandort Europa entstehen, müssen Wissenschaft und Industrie enger zusammenarbeiten – und zwar jetzt.

Ein Appell von Dr.-Ing. Peter Leibinger

»In nicht mehr als fünf Jahren könnte es quantenbasierte Magnetfeld-Sensoren für 50 Euro im Baumarkt geben.«

Zwei »Naturgesetze« gelten bei der Industrialisierung einer neuen Technologie. Erstens: Es kostet Zeit, bis sie sich am Markt durchsetzt. Ab der Formulierung des ersten Konzepts zieht meist eine Dekade und mehr ins Land, bis ein Produkt daraus entsteht, das Kunden kaufen können. Das erleben wir immer wieder, beispielsweise bei der Einführung der EUV-Microlithographie. Am Laserverfahren zur Erzeugung von EUV-Strahlung arbeiten wir bei Trumpf seit mehr als 15 Jahren. Seit Kurzem ermöglicht diese Technologie nun die nächste Generation Mikrochips und damit die neuesten Smartphones, autonomes Fahren und Hochleistungsrechner.

Zweitens: Es bedarf des Zusammenspiels aus wissenschaftlicher Exzellenz auf der einen und industrieller Kompetenz auf der anderen Seite, sonst werden neue Technologien nicht marktreif. Es gibt viele Wissenschaftler, die es nicht gewohnt sind, bereits in frühen Phasen der Forschung mit der Industrie zusammenzuarbeiten. In der Wirtschaft wiederum arbeiten viele Menschen, die mit Forschung wenig anfangen können, sie sehen sich als reine Produktentwickler. Quantentechnologie in den Markt zu bringen, gelingt jedoch nur im Schulterschluss von Forschung und Industrie – und zwar von Beginn an.

Quantentechnologie besteht aus ganz unterschiedlichen Anwendungsfeldern. Neben Quantensensorik sind das Quanten-

Die **Fraunhofer-Gesellschaft** bringt den ersten Quantencomputer nach Europa. **Den Vertrag dazu** haben Fraunhofer und der Computerkonzern **IBM am 13. März** unterschrieben. Der IBM-Quantencomputer der Serie »Q« wird im Rechenzentrum des Konzerns in **Ehningen bei Stuttgart** stationiert werden. Von 2021 an entwickelt Fraunhofer mit Partnern aus Forschung und Industrie Technologien, Anwendungsszenarien und Algorithmen, um in Wirtschaft und Wissenschaft **für Deutschland Kompetenz** aufzubauen und international Wettbewerbsvorteile herzustellen.



© IBM



Es gebe zwei »Naturgesetze« bei der Industrialisierung einer neuen Technologie, erläutert Peter Leibinger, Spitzenmanager des Marktführers Trumpf. © dpa

## Dr.-Ing. Peter Leibinger

...wurde am 23. April 1967 in Stuttgart geboren. In Aachen studierte er Maschinenbau.

...ist stellvertretender Vorsitzender des Hightechunternehmens Trumpf GmbH + Co.KG, des weltweiten Marktführers bei Werkzeugmaschinen und Lasern für die industrielle Fertigung mit 14 490 Mitarbeitenden.

...ist für das Bundesministerium für Bildung und Forschung Sprecher des Programmausschusses »Photonik bzw. Quantensysteme«.

kommunikation, Quantenkryptographie, Quantum-Imaging und Quantencomputer, zu dem auch die Anwendung von Quantencomputern zählt. Jedes dieser Felder steht für sich, es ist jeweils ein in sich abgegrenztes Gebiet und ist unterschiedlich weit entwickelt. Wo also sollten wir am Industriestandort Europa unseren Schwerpunkt setzen? Die Quantensensorik ist vermutlich das erste Teilgebiet der Quantentechnologie, das für einen Massenmarkt verfügbar sein wird. Mit ihr lassen sich schon bald Magnet- und Gravitationsfelder wesentlich genauer messen als heute. In nicht mehr als fünf Jahren könnte es hochsensible, quantenbasierte Magnetfeld-Sensoren für 50 Euro im Baumarkt geben, mit denen Heimwerker Kunststoff-Wasserleitungen in der Wand zuverlässig finden können. Wenn wir noch weiter in die Zukunft blicken, sehen wir hochsensible Sensoren, die kontaktlos Hirnströme messen. Das wird die Hirnforschung weiterbringen und könnte irgendwann sogar die Steuerung unseres Smartphones durch die Kraft unserer Gedanken ermöglichen.

**Wie greifbar** dieses erste Gebiet der Quantentechnologie schon heute ist, zeigt unsere Start-up-Ausgründung Q.ant. Das Unternehmen macht mit 15 Mitarbeitern bereits Umsatz. Es produziert spezielle Laser, mit denen sich Quantensensoren betreiben lassen, und arbeitet an kompletten Sensorsystemen, die auf sogenannten NV-Zentren beruhen. Ebenso wird

an Sensoren gearbeitet, die auf nichtlinearen Konvertern beruhen. Dies könnte in Zukunft beispielsweise neue Mikroskope ermöglichen, mit denen sich dann Zellen in der Medizin zigfach besser analysieren lassen.

**Mit unserem Engagement in der Quantentechnologie** stehen wir in der Industrie aber nicht allein. Das gilt insbesondere für Industriebereiche, in denen Deutschland und Europa auf alten Stärken aufbauen können: bei Automatisierungslösungen, die durch Unterstützung von Quantentechnologie eine neue Stufe erreichen können; bei industriellen Verfahren, die sich durch Quantentechnologie ganz neu führen lassen; und bei klassischen Industrieprodukten – Stichwort: Auto – die durch Quantentechnologie um ein Vielfaches besser werden können als jemals zuvor. Kurz: Es geht um »Technik made in Europe«.

Bewährte Technologien und Verfahren lassen sich mit der Quantentechnologie also neu denken. Hier sollten wir ansetzen – anwendungsorientiert in der Wissenschaft und forschungsnah in der Industrie. Dann entstehen Produkte, die echte Kunden erreichen und den Wirtschaftsstandort Europa stärken. Das Thema Quantentechnologie bietet uns einen neuen Ansatz, Herausforderungen anzugehen – und wir sollten heute damit anfangen. ■

»Anwendungsorientiert in der Wissenschaft und forschungsnah in der Industrie: Dann entstehen Produkte, die echte Kunden erreichen und den Wirtschaftsstandort Europa stärken.«

# Autonomes Aufräumkommando

Wo es für Menschen gefährlich wird, können Roboter die Arbeit übernehmen: bei der Sanierung alter Deponien, der Müllsortierung. Oder auch beim Rückbau von Kernkraftwerken.

Text: Mandy Bartel

Altlasten?  
263 950  
verdächtige  
Flächen gab  
es 2019 in  
Deutschland.

**W**ALL-E – Der Letzte räumt die Erde auf: Die Menschen haben ihren unbewohnbar gewordenen Planeten verlassen, um in einem riesigen Raumschiff zu leben. Den hinterlassenen Müll räumen Roboter auf. WALL-E ist der letzte von ihnen. An diesen Science-Fiction-Film aus dem Jahr 2008 erinnert es, wenn Dr. Janko Petereit von seiner Arbeit erzählt. Der Wissenschaftler leitet die Forschungsgruppe Multisensorsysteme am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB in Karlsruhe und entwickelt im Rahmen des Kompetenzzentrums »Robdekon« zusammen mit sieben Partnern »Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen«.

263 950 altlastenverdächtige Flächen gab es 2019 deutschlandweit, darunter viele Deponien, die zum Teil schon jahrzehntelang bestehen und von denen kaum einer weiß, was dort genau gelagert ist. Laut Altlastenstatistik des Bundesumweltamtes liegt für nicht einmal die Hälfte davon überhaupt eine Gefährdungsabschätzung vor. Saniert wurden bislang gerade einmal 36 000 Flächen. Ein mühsames Geschäft mit

Aus sicherer Entfernung kann der Bediener dank VR-Brille die Räumung beobachten und steuern. © KIT



vielen Unwägbarkeiten. Gefährliche Chemikalien können das Grundwasser verseuchen, miteinander reagieren und in Brand geraten oder giftige Dämpfe bilden.

**Die Sanierung solcher Deponien** ist einer von drei Anwendungsschwerpunkten in »Robdekon«. In diesem Bereich forscht Janko Petereit mit seinem Team. Um Menschen nicht zu gefährden oder zu belasten, sollen künftig autonome oder teilautonome Maschinen Proben nehmen, Fässer und Abfälle wegräumen und verseuchten Boden ausbaggern. Der Forscher erzählt, wie das aussehen könnte: »Spinnenartige Schreitroboter entnehmen zunächst automatisiert Proben von der Deponie. Damit wird die Schadstoffverteilung geschätzt. Dies bildet die Grundlage für den Aushub- und Sanierungsplan, nach dem ein führerloser Bagger selbstständig die Erdschichten abträgt und auf autonome Transportfahrzeuge lädt. Recycelbare Stoffe werden wiederverwertet und giftige Materialien in neue, sicherere Behälter verpackt und in moderne Sondermülldeponien umgelagert.«

Petereits Institut, das Fraunhofer IOSB, entwickelt die Software und Algorithmen für die komplette Verarbeitungskette – von der Verarbeitung der Sensordaten über die Berechnung von Strategien für den Aushub bis hin zur Fernsteuerung. Noch arbeiten die smarten Bagger »strikt nach vorgegebenem Plan«, doch »langfristig soll die Maschine selbst erkennen, ob noch Gefahrstoffreste wie etwa Teerlinsen vorhanden sind, und entsprechend tiefer baggern«, so der Ingenieur.

## Von AKW-Rückbau bis Müllsortierung

Ein weiteres Einsatzfeld für die im Kompetenzzentrum entwickelten Roboter ist der Rückbau kerntechnischer Anlagen – seit dem Ausstieg Deutschlands aus der Atomenergie auch das ein dringliches Thema. Zurzeit sind noch sechs Atomkraftwerke in Deutschland in Betrieb. Alle sollen bis 2022 abgeschaltet sein – dann beginnt eine Sisyphusarbeit. Denn beim Rückbau muss nicht nur jedes Gebäude der kontaminierten Zone vollständig entkernt werden. Zudem ist es notwendig, alle Betonflächen vom Boden bis zur Decke einige Millimeter abzufräsen – pro AKW sind das mehrere 100 000 Quadratmeter Beton. Dies zu großen Teilen zu automatisieren, daran wird in »Robdekon« gearbeitet. So soll ein Fräsroboter bald



selbstständig die größten Flächen bearbeiten, Menschen müssten nur noch in kniffligen Bereichen Hand anlegen. Zudem können Vermessungsroboter Strahlungskarten erzeugen, um zu verdeutlichen, wo noch radioaktive Bereiche liegen.

Der dritte Forschungsbereich, in dem künftig intelligente Maschinen den Menschen belastende Tätigkeiten abnehmen sollen, ist die Mülltrennung. Laut dem Statistischen Bundesamt produziert jeder Deutsche jährlich etwa 220 Kilogramm Abfall. Insgesamt sind das über 18,1 Millionen Tonnen Restmüll, Sperrmüll und Papiermüll pro Jahr. Etwa zwei Drittel davon werden recycelt. Zwar sind deutsche Verbraucher Weltmeister im Mülltrennen, doch wird der Abfall in Müllanlagen immer noch größtenteils händisch sortiert. Mit zahlreichen Sensoren ausgestattete Müllsortierroboter sollen diese Fließbandarbeit bald übernehmen.

### Fokus auf praxistaugliche Systeme

Am Kompetenzzentrum »Robdekon« sind neben dem federführenden Fraunhofer IOSB das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), das Forschungszentrum Informatik (FZI) sowie vier mittelständische Industriepartner beteiligt. Vom Bundesforschungsministerium gefördert, soll es als nationale Anlaufstelle und Informationshub für das Thema Dekontaminationsrobotik fungieren. In sieben bei den einzelnen Partnern verorteten Living Labs sind bisher eine Reihe von spezialisierten Technologiedemonstratoren entstanden.

»Höchste Priorität hat die Praxisrelevanz«, betont Peterreit. Deshalb ist der Grad der Automatisierung bei den Robotern auch ganz unterschiedlich. »Ein komplett autonomer Betrieb in solchen hochkomplexen Umgebungen ist nach heutigem Stand in der Praxis oft gar nicht nötig. Gefragt sind vielmehr schlaue Assistenzsysteme, die den Bediener entlasten oder mehr hilfreiche Informationen zur Verfügung stellen. Der Mensch will hier immer noch entscheiden und eingreifen können«, so der Forscher. Das zeigen auch die jährlichen Partizipationsveranstaltungen, die das Kompetenzzentrum durchführt, um sich mit Anwendern auszutauschen. Interessierte können die Systeme ausprobieren und die Forschenden holen Feedback von den Nutzern ein, was wiederum in die weitere Entwicklung einfließt.

**Ein technologischer Schwerpunkt von »Robdekon«** ist dementsprechend die Mensch-Maschine-Interaktion. Derzeit werden übergreifend drei verschiedene Telepräsenzkonzepte erprobt, mit denen alle Demonstratoren bedienbar sein sollen: Der Mensch kann sich wahlweise in einer Virtual-Reality-Umgebung gleich einem Holodeck frei bewegen und per Gestensteuerung eingreifen, sich von Exoskeletten bei bestimmten Tätigkeiten unterstützen lassen oder in einem Leitstand mit Joysticks und digitalen Schnittstellen agieren.

Ob solche Telepräsenzmethoden auch vom Weltall aus funktionieren, sollten wir eines fernen Tages wirklich unseren Planeten verlassen und das große Aufräumen Robotern überlassen müssen, ist derzeit noch nicht erforscht. ■

Für schwierige Einsatzorte konzipiert: Dieser Schreit-Fahr-Roboter wurde vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz entwickelt und dank »Robdekon« weiterentwickelt. © DFKI/Florian Cordes

**18,1**  
Millionen  
Tonnen Müll  
fallen in  
Deutschland  
an – pro Jahr.

# Darknet: Es werde Licht!

Das Darknet gilt als Hort der Kinderschänder, Drogen- und Waffenhändler. Tatsächlich ist es mehr. Prof. Martin Steinebach forscht für Klarheit.

Text: Sonja Endres



Prof. Martin Steinebach vom Fraunhofer SIT geht den Gerüchten rund um das »dunkle Netz« auf den Grund. © Josef Seitz

**F**akt ist: Das »dunkle Netz« wird für kriminelle Machenschaften genutzt – in welchem Ausmaß, darüber gibt es bisher keine wissenschaftlich belastbaren Daten. Prof. Martin Steinebach und sein Team vom Fraunhofer-Institut für Sicherheit in der Informationstechnologie SIT in Darmstadt wollen Licht ins Dunkel bringen. Sie untersuchen, welche Dienste überwiegend nachgefragt werden. Dafür stellen sie im Darknet Server zur Verfügung, über die Nutzer Verbindung zu anderen Darknet-Servern herstellen – und schreiben mit, welche Adressen sie ansteuern.

»**Wir fanden Marktplätze**, auf denen man Waffen, Drogen oder Malware kaufen kann. Unter den Top Ten waren aber genauso soziale und politische Foren und Informationsseiten«, sagt Steinebach, der mit seinem Team das Darknet seit Jahren erforscht, insbesondere das verbreitete Tor-Netzwerk.

Tor erlaubt Nutzern durch einen speziellen Verschlüsselungsmechanismus, anonym zu bleiben. Seit seinen Anfängen in den 2000er-Jahren hat sich das Netzwerk deutlich verändert und weiterentwickelt. »Inzwischen sind wesentlich mehr Menschen hier unterwegs. Sicher sind darunter viele Kriminelle, die im Schutz der Anonymität ihren Geschäften nachgehen – aber eben auch Whistleblower, Menschenrechtler und zunehmend Bürger, die der umfassenden Überwachung durch Amazon, Google und Co. entgehen wollen«, sagt Steinebach.

Um sich im Darknet bewegen zu können, braucht es kein IT-Fachwissen. Der Tor-Browser, eine Variante von Firefox, steht für alle zugänglich im Internet zum Download bereit. »Man kann über den Browser auch auf ganz »normale« Internetseiten wie eBay oder Amazon zugreifen – nur, dass eBay und

Amazon dann nicht wissen, wer man ist und keine Daten darüber sammeln können, für was man sich interessiert«, erklärt Steinebach. »Viele nutzen das Tor-Netzwerk inzwischen, um shoppen zu gehen. Sie haben die Erfahrung gemacht, dass sie abhängig von Gerät, Browser oder IP-Adresse unterschiedliche Preise genannt bekommen. Tor ermöglicht es seinen Nutzern, sich unerkant im Internet zu bewegen. Daher ist es ein mächtiges Werkzeug gegen den gläsernen Bürger.«

## Das »dunkle Netz« ist hip

Es gebe mittlerweile einen regelrechten Trend zum Darknet, für manche gehört es zum »digitalen Lifestyle«. Jeder, der im Internet etwas auf sich hält, hat auch im Darknet eine Präsenz – selbst Facebook hat eine Tor-Adresse.

**Zu erkennen sind diese an der Endung »onion«.** Man findet sie entweder über Suchmaschinen wie »DuckDuckGo«, die eine anonyme Suche ohne Tracking ermöglicht, also ohne dass das Nutzerverhalten protokolliert wird. Oder über sogenannte »HiddenWikis«, die zu verschiedenen Schlagwörtern Darknet-Seiten auflisten. Oder über das ganz »normale« Internet, wo sich Hinweise auf Darknet-Seiten finden lassen.

Früher wurde im Darknet ausschließlich auf Englisch kommuniziert – heute findet man zunehmend Russisch. »Und das liegt nicht nur daran, dass hier russischsprachige Hacker ihre Dienste anbieten«, stellt Steinebach klar. Vielmehr werde das Darknet von Russen zunehmend als politische Informationsplattform genutzt. »Es gab zum Beispiel eine Website, die eine unabhängige Rechtsberatung anbot und Bürgerrechtlern Tipps gab, wie sie sich gegen staatliche Repressalien zur Wehr setzen können. Diese Informationen mussten in Russland aus dem Netz genommen werden – und sind dann eins zu eins ins Darknet gewandert.«

Viele große Zeitungen wie die »New York Times« oder der britische »Guardian« haben eine Darknet-Präsenz, damit Informanten anonym Kontakt zu ihnen aufnehmen können. Auch umfassende wissenschaftliche Bibliotheken sind im Darknet zu finden, in denen für alle zugänglich zensurfreie Informationen bereitgestellt werden.

»Unsere Untersuchung zeigt: Das Angebot im Darknet ist breit gefächert. Illegale und legale Dienste werden gleichermaßen genutzt«, betont Steinebach.

Für das verbreitete Vorurteil, im Darknet wimmle es von Kinderpornografie, fanden Steinebach und sein Team keine Belege. »Wir erleben hier ein ähnliches Phänomen wie in den 2000er-Jahren beim File-Sharing. Da wurde auch behauptet, dass zu 80 Prozent kinderpornografische Inhalte geteilt würden. Wir haben für die Musik- und Filmindustrie im Rahmen von Studien Systeme gebaut, mit denen wir massenweise Content analysiert haben, um unter anderem technische

Methoden für Urheberrechtsverletzungen aufzudecken. Kinderpornografie haben wir da kein einziges Mal gefunden. Auch unter unseren Top-Ten-Darknet-Adressen ist keine Seite, auf der man kinderpornografisches Material erwerben könnte.«

Das Darknet wird fraglos von Pädophilen genutzt – es wird allerdings nicht von ihnen dominiert, wie oftmals behauptet. »Von 5 000 untersuchten Seiten im Darknet hatten rund vier Prozent einen kinderpornografischen Hintergrund«, so Steinebach, der in Kontakt mit den Strafverfolgungsbehörden steht. Spektakulär war 2017 der Ermittlungserfolg der Polizei gegen die Kinderpornoplattform »Elysium« mit weltweit mehr als 111 000 Nutzern. »Elysium« und zahlreiche andere Ermittlungserfolge gegen Cyberkriminalität, Drogen- oder Waffenhändler im Darknet zeigen: Die Polizei ist nicht so hilflos, wie oftmals dargestellt. »Alle großen Marktplätze sind früher oder später hochgenommen worden. Die Polizei arbeitet allerdings weniger mit genialen Hacking-Tricks, sondern setzt vor allem auf verdeckte Ermittler und klassische Ermittlungsarbeit«, sagt Steinebach. Spätestens der Versand der Ware zwingt den Besteller aus der Deckung des Darknet. Das Paket braucht eine Lieferadresse.

## Cleverer Hacker finden Sicherheitslücken

Steinebach und sein Team suchen gezielt nach Fehlern im Tor-Netzwerk – eine etablierte Vorgehensweise in der Informatik, um Systeme sicherer zu machen. »Wenn wir Sicherheitslücken finden, geben wir zunächst den Tor-Entwicklern Bescheid. Sie erhalten so die Möglichkeit, den Fehler zu beheben, bevor wir ihn veröffentlichen.« Doch warum machen sie die Lücke überhaupt publik? »Es wäre naiv zu glauben, dass nicht auch clevere Hacker irgendeiner Diktatur diesen Fehler finden. Da ist es besser, wenn die Entwickler-Community davon erfährt, den Fehler behebt und Schutzbedürftige nicht länger gefährdet werden.«

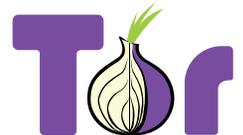
**Diktaturen wie China** ist das Darknet ein Dorn im Auge. Mit restriktiven Maßnahmen ist es dem digitalen Überwachungsstaat gelungen, den Zugang zum Tor-Netzwerk erheblich zu erschweren. »Aber selbst hier schaffen es Bürgerrechtler immer wieder reinzukommen«, betont Steinebach.

Das Darknet zu verbieten, hält Steinebach, insbesondere vor diesem Hintergrund, für unrealistisch. »Das Internet ist kein Raum, wo man Dinge verbieten kann. Das Tor-Netzwerk ist nicht zentral, sondern läuft aktuell über mehr als 6 000 Knoten auf der ganzen Welt. Nur weil man den Tor-Browser in Deutschland für illegal erklärt, bedeutet das nicht, dass man sich ihn in Frankreich oder den USA nicht runterladen könnte. Man kann den Zugang zum Darknet erschweren, aber es geht nicht abzuschalten. Abgesehen davon halte ich das auch nicht für erstrebenswert.«

»Zunehmend auch für Bürger, die der umfassenden Überwachung durch Amazon, Google und Co. entgehen wollen.«

Prof. Martin Steinebach

Tor steht für »The Onion Router«, das »Zwiebelnetzwerk«. Der Name kommt nicht von ungefähr: Das vielschichtige Netzwerk aus Rechnern macht es unmöglich, das Innere zu sehen – die IP-Adresse der Nutzer bleibt verborgen.



# Top Ten 10 Darknet Dienste

**1** **LM Social Server/  
Backdoor Trojan**  
**864 505 Anfragen**  
Anfragen an einen speziellen Port, der häufig von Trojanern für den Fernzugriff genutzt wird.

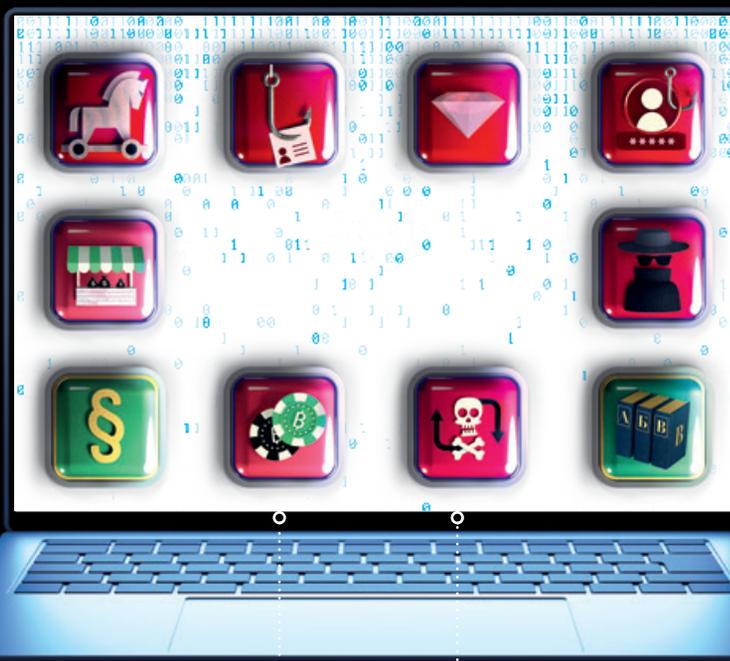
**2** **TrickBot**  
**161 421 Anfragen**  
Anfragen an eine Onion-Adresse, die in Zusammenhang mit »TrickBot« steht – einem Trojaner, der per Phishing-Mails, die angeblich von einem Finanzdienstleister kommen, Rechner infiziert.

**3** **Wall Street Market**  
**75 369 Anfragen**  
Marktplatz für Drogen, Waffen, Juwelen, Software etc.

**4** **Phishing-Website einer Tor-Suchmaschine**  
**61 086 Anfragen**  
Website, die zu einer ganzen Sammlung von Phishing-Websites gehörte (Ende 2018 eingestellt). Suchanfragen wurden zu anderen Phishing-Websites geleitet, unter anderem zu vollständig geklonten Tor-Marktplätzen, um die Nutzer zur Überweisung von Bitcoins zu verleiten.

**10** **HYDRA Market**  
**32 474 Anfragen**  
Marktplatz für Drogen, Sicherheitsdienstleistungen, Dokumentenfälschungen, Jobangebote etc.

**9** **RosPrawosudie**  
**33 309 Anfragen**  
Unabhängige Rechtsberatung und allgemeine juristische Ratschläge für russische Oppositionelle.



**5** **Hackers Collective**  
**52 559 Anfragen**  
Hacker bieten ihre Dienste an.

**6** **Troadizia**  
**52 111 Anfragen**  
Russische Enzyklopädie im Stil von Wikipedia.

**8** **Nitrogensports**  
**43 992 Anfragen**  
Illegales Online-Wettbüro.

**7** **The Pirate Bay**  
**49 395 Anfragen**  
Plattform für illegales File-Sharing (Umgehung des Copyrights).

**Datenerhebung:** April bis September 2018

**Original-Publikation:** Martin Steinebach et al., Detection and Analysis of Tor Onion Services, published 23 January 2020 • <http://s.fhg.de/darknet>

# Was essen wir morgen?

Forscher des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI untersuchten in einem EU-Projekt, welche Trends die europäische Lebensmittelbranche in den nächsten 15 Jahren prägen werden. Eine Auswahl der wichtigsten:

## **Verringerung von Lebensmittelabfällen**

1,3 Milliarden Tonnen Lebensmittel werden jährlich weltweit weggeworfen. Die Kosten von rund 750 Milliarden US-Dollar tragen vor allem Verbraucher und Landwirte. Die Forscher schätzen, dass rund zwei Drittel der Lebensmittelabfälle in Industrieländern vermeidbar wären, unter anderem durch eine Verbesserung der Produktions- und Logistikprozesse. Der steigende gesellschaftliche Druck und staatliche Vorschriften werden diese Entwicklung befördern – und die Verschwendung bekämpfen.

## **Alternative Proteine**

Jeder Europäer isst etwa 65 Kilogramm Fleisch pro Jahr, jeder US-Amerikaner sogar 90. Die Folgen sind bekannt: Belastungen für Klima, Umwelt – und die Gesundheit des Konsumenten. Um den Proteinbedarf der Weltbevölkerung langfristig zu decken, wird sich das Nahrungsmittelsystem umgestalten müssen. Innovationen wie rein pflanzliche Fleischalternativen, Produkte auf Insektenbasis oder Fleisch aus der Petrischale sind eine Alternative. Das Fraunhofer ISI geht davon aus, dass es zu einer Koexistenz von Fleisch- und alternativer Protein-Industrie kommen wird.

## **Vooking – vegan – glutenfrei**

Immer mehr Menschen hören auf, Fleisch zu essen – aus gesundheitlichen Gründen, aus Tierliebe oder aufgrund eines wachsenden Bewusstseins für Nachhaltigkeit. »Vooking« (Vegetarian Cooking) und das Kochen mit veganen und glutenfreien Zutaten liegen im Trend. Zwar leidet nur rund ein Prozent der Weltbevölkerung unter einer Glutenunverträglichkeit (»Zöliakie«). Quinoa, Amarant und Co. gelten jedoch als gesündere Alternative zu Weizenmehl. Die Forscher sind überzeugt: Der globale Markt für glutenfreie Lebensmittel wird bis 2025 um 13 Milliarden US-Dollar wachsen.

## **Lokale Lebensmittel-Kreisläufe**

Der Direktverkauf von Landwirten über Online-Shops oder Obst- und Gemüseboxen hat etliche Vorteile, darunter die Frische und bessere

Rückverfolgbarkeit der Produkte, weniger Verpackungsmüll oder geringere Umweltschäden durch den entfallenden Lebensmitteltransport. Aus klimatischen und saisonalen Gründen sind allerdings nicht alle Produkte verfügbar. Lokale Lebensmittelkreisläufe könnten dazu beitragen, die Nahrungsmittelproduktion bis 2035 von zentralen Strukturen auf dezentrale und teilweise autonome Ernährungssysteme umzustellen.

## **Präzisionslandwirtschaft**

Neue landwirtschaftliche Produktions- und Bewirtschaftungstechniken werden die Effizienz der Produktion steigern und die Nachhaltigkeit erhöhen. Sensoren ermöglichen beispielsweise die genaue Beobachtung und Messung des Pflanzenwachstums, sodass die Stickstoff-Düngung zielgenau und variabel erfolgen kann, was den Düngemittelverbrauch insgesamt reduziert. Software identifiziert und klassifiziert auf einem einfachen Handy-Foto Krankheiten, Unkraut und Insekten im Feld, liefert weitere wichtige Informationen und gibt Empfehlungen. Der weltweite Umsatz im Bereich Präzisionslandwirtschaft beträgt zurzeit 4,07 Milliarden US-Dollar. Bis 2025 soll er auf 10,23 Milliarden US-Dollar steigen.

## **Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen**

Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen sind die Basis für »smarte Landwirtschaft«. Selbstlernende, automatisierte Maschinen unterstützen bei der Aussaat der Pflanzen (Bodenvorbereitung, Saatgutzüchtung, Wasserzufuhrmessung). Ernteroboter erkennen automatisch den Reifegrad. KI könnte auch dazu beitragen, die Qualität und Frische von Lebensmitteln zu verbessern und deren Verschwendung zu verringern, weil Kundenanforderungen und -nachfrage bereits vorher bekannt sind.

## **Nachhaltige Lebensmittel für alle**

Nachhaltige Lebensmittel zeichnen sich durch geringe Umweltbelastung aus und tragen zur globalen Ernährungssicherheit und einem gesunden Leben bei. Innovative Lösungen, die

zu mehr Nachhaltigkeit im Lebensmittelsektor führen, sind in allen Bereichen möglich. Zum Beispiel: die Förderung regionaler und saisonaler Lebensmittel, die Steigerung des Bewusstseins über gesunde, nachhaltige Ernährung durch Kampagnen, nachhaltige Produktion durch künstliche Intelligenz oder andere neue Technologien.

## **Nutrigenetik**

Die Genetik beeinflusst die individuelle menschliche Gesundheit und Ernährung (Nutrigenetik) und umgekehrt. Aus dieser Erkenntnis lassen sich individuelle Ernährungsempfehlungen ableiten. So können Verbraucher ihr Krankheitsrisiko reduzieren und ihre Gesundheit verbessern. Der Umsatzmarkt für Nutrigenetik wurde im Jahr 2017 auf 252 Millionen US-Dollar geschätzt und soll bis 2025 um 16 Prozent wachsen.

## **Mehr Transparenz**

85 Prozent der deutschen Konsumenten wollen ihre Lebensmittel zurückverfolgen können. Etiketten können Orientierung geben. Regierungen und Unternehmen reagieren, indem sie neue Etiketten einführen oder alte, wie das Tierschutzlabel, standardisieren. Die Digitalisierung wird eine größere Transparenz und Rückverfolgbarkeit des Produkts ermöglichen und der Druck auf die Anbieter steigen, Verbraucherpräferenzen zu berücksichtigen.

## **Steigende Marktmacht von Einzelhändlern**

Die Konzentration im Lebensmitteleinzelhandel ist auf ihrem Höhepunkt. Wenige Unternehmen, die die wichtigsten Vertriebskanäle kontrollieren, dominieren den Markt. Die Folge: eine Machtverschiebung weg von den Lebensmittelproduzenten hin zu den Händlern. Im Jahr 2018 nahm beispielsweise ein europäischer Verband von sechs Einzelhändlern alle Produkte einer großen Marke aufgrund eines Preisstreits aus dem Regal und zwang das Unternehmen so zu Zugeständnissen. Es ist zu befürchten, dass die Einzelhändler ihre Macht verstärkt nutzen werden, um ihre Gewinne zu maximieren.



Auf 450 000 wird die Zahl der privaten Drohnen in Deutschland geschätzt. Missbrauch kann da keiner ausschließen.  
© ddp images

# Mikrowellen gegen Minihelikopter

Immer mehr Drohnen fliegen über Deutschland, immer größer werden die Gefahren – immer häufiger zeigt sich der wirtschaftliche Schaden. Elektromagnetische Strahlung kann helfen.

Text: Mehmet Toprak

Erst im März musste ein Landeanflug für Ministerpräsident Laschet abgebrochen werden – Drohnenalarm!

Das Bundeskriminalamt warnt: »Denkbare Szenarien, die mittels Drohnen ausgeführt werden können, reichen von Störungen von Veranstaltungen über Ausspähungen bis hin zu möglichen terroristischen Anschlägen.« Nach einer Schätzung des Verbands Unbemannte Luftfahrt gab es 2019 in Deutschland 450 000 privat genutzte Drohnen. Missbrauch mag längst niemand mehr ausschließen. Erst im März konnte Nordrhein-Westfalens Ministerpräsident Armin Laschet nach einer Israel-Reise mit seiner Delegation nicht auf dem Frankfurter Flughafen landen – einer Drohne wegen musste der Landeanflug abgebrochen und die Maschine nach Köln umgeleitet werden. Eineinhalb Stunden lang blieb der Flughafen gesperrt. Wirtschaftlicher Schaden: beträchtlich.

Das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT in Euskirchen forscht an der Gefahren-

abwehr – mit Mikrowellen. Marian Lanzrath arbeitet in der zuständigen Arbeitsgruppe »Elektromagnetische Effekte und Bedrohungen«. Sechs Wissenschaftler und zwei Techniker erproben die Wirkung starker elektromagnetischer Strahlung (High-Power Electromagnetics, HPEM). »Wir konzentrieren uns auf Mikrowellen im hochfrequenten Bereich, die sich durch Richtantennen stark fokussieren lassen«, erklärt Lanzrath. »Damit richtet sich die Wirkung der elektromagnetischen Wellen genau auf ihr Ziel, außerhalb davon gibt es keine Schäden.«

**Elektromagnetische Wellen lösen überall da**, wo Strom fließt, Störspannungen aus. Bei ausreichender Stärke werden Signale nicht mehr oder falsch übermittelt, die Elektronik spielt verrückt. An einigen Stellen entsteht eine Überspannung, die auch zum Komplettausfall eines Bauteils führen kann. In der Versuchshalle, 15 mal sechs Meter groß, vier Meter hoch, führen die Forscher die Wirkung vor. Die Drohne

kreist über einem ausgespannten Sicherungsnetz. Dann werden hochenergetische gepulste Mikrowellen ausgesendet und wirken auf die Drohne ein. Anfangs schwebt sie noch stabil in der Luft, plötzlich schert sie nach links, dann nach rechts aus, sackt ab, scheint sich zu fangen, taumelt – und stürzt ab. Durch die Landung im Netz bleibt sie äußerlich unversehrt, die Steuerelektronik ist in der Regel jedoch kaputt.

»Jede Drohne ist anfällig für die Einwirkung von Mikrowellen«, erläutert Lanzrath. Das ist ein wunder Punkt, den sie mit praktisch allen elektronischen Geräten teilt. Zwar ist es theoretisch möglich, Elektronik durch Metallverkleidungen zu schützen. Doch steigt dadurch das Gewicht, was bei einem Flugobjekt wenig hilfreich ist. Einen vollständigen Schutz hält Lanzrath im Falle der Drohnen für ausgeschlossen: »Selbst wenn man die Elektronik mit Metall abschirmt, können die Mikrowellen immer noch durch Spalte an den Rotoren oder Antennen eindringen.«

## Harte Tests: Bis zu zehn Drohnen werden pro Monat zerstört

Der vom Fraunhofer INT verfolgte Ansatz funktioniert – und das nicht nur in der Versuchshalle. Auch auf freiem Feld führen die Experten Versuche durch, lassen Drohnen aufsteigen und versuchen, sie mit HPEM-Equipment außer Gefecht zu setzen. Wegen gesetzlicher Regelungen für den Betrieb starker Sendeanlagen müssen die Forscher immer zuerst eine behördliche Genehmigung einholen. Die Herausforderungen wachsen im Freien. Jetzt ist die Drohne nicht acht, sondern einige Hundert Meter entfernt. Leistungsfähige Modelle bewegen sich mit Geschwindigkeiten von über 100 Stundenkilometern. Zielgenauigkeit und Reichweite der Abwehrsysteme sind gefordert. Lanzrath ist aber auch hier gelassen. »Die Reichweite des HPEM-Systems reicht dank Fokussierung durch die Antennen und starker Sendeanlage aus, um unbemannte Luftfahrzeuge (UAS) auch unter freiem Himmel zu erfassen und unschädlich zu machen.« Eine Machbarkeitsstudie läuft noch bis Mitte 2021. In Spitzenzeiten werden am Institut pro Monat infolge der Tests bis zu zehn Drohnen zerstört.

Seine Aufgabe als Anti-Drohnenkämpfer hat Marian Lanzrath in gewisser Hinsicht Angela Merkel zu verdanken. Bei einer Wahlkampfveranstaltung der CDU in Dresden im Jahr 2013 war plötzlich eine Videodrohne vor der Bundeskanzlerin aufgetaucht. Gesteuert wurde sie von einem Mitglied der Piratenpartei, das mit der Aktion auf das Problem der allgegenwärtigen Überwachung aufmerksam machen wollte. Pirat und Drohne konnten schnell gestoppt werden. Doch die Sicherheitsbehörden waren alarmiert. Was wäre gewesen, wenn die Drohne keine Kamera, sondern Sprengstoff getragen hätte? Seitdem arbeiten Behörden, Industrie und mehrere Fraunhofer-Institute (s. Kasten) daran, solche Risiken zu minimieren. ■

## So schützen wir uns vor Drohnen

Neben dem HPEM-Projekt am INT arbeitet Fraunhofer an fünf weiteren Initiativen, um Drohnen zu erkennen und abzuwehren. Vier davon werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dem Programm »Forschung für die zivile Sicherheit« unterstützt.

**PROJEKT AMBOS** – Abwehr von unbemannten Flugobjekten für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben | **INSTITUT** Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE | **WAS PASSIERT** Ein deutsch-österreichisches Verbundprojekt das seit Februar 2017 daran arbeitet, Drohnen zu erkennen, zu analysieren und Abwehrmaßnahmen durchzuführen.

**PROJEKT ARGUS** – System zur situationsbewussten Abwehr von Gefahren durch UAS | **INSTITUT** Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB | **WAS PASSIERT** Das System soll unbemannte Flugsysteme erkennen und sofort praxistaugliche Einsatzvorschläge machen.

**PROJEKT ORAS** – Sensorgestütztes Überwachungs- und Alarmierungssystem zur Detektion und Verfolgung unbemannter Flugsysteme (ORAS) | **INSTITUT** Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR | **WAS PASSIERT** Das Projekt setzt den Schwerpunkt auf das Erkennen von Drohnen im urbanen Umfeld. Mithilfe von Radarnetzwerken soll ein engmaschiges Überwachungsnetzwerk eingerichtet werden. In Zusammenarbeit mit Abwehrsystemen könnten beispielsweise Großveranstaltungen wie Volksfeste oder auch Flughäfen gesichert werden.

**PROJEKT MIDRAS** – Mikro-Drohnen-Abwehr-System | **INSTITUT** Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI | **WAS PASSIERT** Mithilfe von Massiv-MIMO-Antennen, also der Kombination von mehreren Antennen in einem Gerät, die das gesamte Umfeld abdecken, sollen die Erkennung von Mikrodrohnen und gegebenenfalls nötige Abwehrmaßnahmen realisiert werden.

**PROJEKT MODEAS** – Modulares DrohnenErfassungs- und Assistenzsystem | **INSTITUT** Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB | **WAS PASSIERT** Hier wird eine ganze Batterie von Sensorstationen verknüpft. Die Stationen arbeiten mit hochauflösenden 360-Grad-Kameras, Trackingeinheiten, Richtmikrofonen, Radar, Telezoom-Kameras und Laserentfernungsmessern. Das ermöglicht die zuverlässige Entdeckung aller möglichen Flugobjekte. MODEAS wird von Fraunhofer eigenfinanziert.

»Selbst wenn man die Elektronik mit Metall abschirmt, können die Mikrowellen immer noch durch Spalten an den Rotoren oder Antennen eindringen.«

Marian Lanzrath,  
Fraunhofer INT

## Quantenbits ins Glasfasernetz bringen

 Quanteninformationen mit Glasfasern über weite Entfernungen übertragen und damit dem Quanteninternet den Weg bereiten: Daran arbeiten das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und das niederländische Forschungszentrum QuTech. Die gemeinsam entwickelten Quanten-Frequenzkonverter sollen die Anbindung von Quantenprozessoren an Glasfasernetze ermöglichen und 2022 beim weltweit ersten Quanteninternet-Demonstrator zum Einsatz kommen, der vier niederländische Städte verbinden wird.

Die Photonik ist dabei eine Schlüsseltechnologie: Einzelne Photonen und Quantenzustände werden mittels Lasereinsatz gezielt erzeugt, manipuliert und kontrolliert. Speziell entwickelte Technologien sollen es möglich machen, die Frequenz der Photonen systematisch zu konvertieren, wobei die Quanteninformation nicht beeinträchtigt wird. Ziel ist es, die Photonen anschließend verlustarm durch bestehende Glasfasernetze zu übertragen und Qubits – also die kleinsten Recheneinheiten eines Quantencomputers – über große Entfernungen miteinander zu koppeln.

Die große Herausforderung ist das Design entsprechender Frequenzkonverter mit einer hohen Effizienz, die nur wenig Rauschen im Ausgangssignal erzeugen. »Für die Langstrecken-Verbindungen mit möglichst geringen Übertragungsverlusten müssen diese Photonen so verändert werden, dass ihre Wellenlängen in den Telekommunikations-Bändern im Bereich zwischen 1500 nm und 1600 nm liegen«, erklärt Florian Elsen, Projektmanager und Koordinator für Quantentechnologie am Fraunhofer ILT.

Niederlande



Italien

## Clever bauen: Automatisiert und digital

 Noch rollt der Husky A200 ferngesteuert und mit leerer Ladefläche über die Bordsteine und Grasflächen des Technologieparks NOI in Bozen, Südtirol. Doch schon bald könnte die mobile Roboterplattform über das Gelände einer Baustelle fahren, größere Lasten transportieren und dabei ganz allein den richtigen Weg finden.

Genau daran arbeiten zurzeit Camilla Follini, wissenschaftliche

Mitarbeiterin des Teams Process Engineering in Construction bei Fraunhofer Italia, und ihre Kollegen. »Ziel ist es, eine Brücke zwischen Robotik und Bauwirtschaft zu schlagen«, sagt sie. Dafür muss der bullige Transporter allerdings noch einiges dazulernen. Indoor seien die Tests bereits positiv verlaufen. Es ist also nur eine Frage der Zeit, bis sich der Roboter auch auf jeder Baustelle autonom zwischen Baurüstern, Betonpfählen,

## China

**Politische Stabilität ist ausschlaggebend**

 Was sind die wesentlichen Kriterien für die Standortwahl deutscher kleiner und mittelständischer Unternehmen in China? Welche Bedürfnisse haben sie? Das untersuchten Forscher des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und der Universität Stuttgart im Auftrag der Regionalregierung von Pujiang.

Im innerchinesischen Wettbewerb um Arbeitsplätze und ausländische Investitionen haben bisher vor allem östliche Küstenregionen die Nase vorn. Die Regionalregierung von Pujiang County im mittleren Westen will das ändern. Ein deutsch-chinesisches Kooperationszentrum und ein neuer Industriepark sollen vor allem kleine und mittelständische Unternehmen aus Deutschland in die Region locken.

Die Studie des Fraunhofer IAO liefert überraschende Ergebnisse: »Wir hatten im Vorfeld vermutet, dass finanzielle Faktoren wie staatliche Subventionen für die Unternehmen enorm wichtig sind. Doch am wichtigsten war ihnen die politische Stabilität, was mit Investitionssicherheit zu erklären ist«, fasst Adrian Barwasser zusammen, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement der Uni Stuttgart. Außerdem wünschen sich die Unternehmen Unterstützung in rechtlichen und politischen Fragen. »In China kann sich die Gesetzeslage innerhalb weniger Wochen ändern. Gesetze werden wesentlich schneller verabschiedet als in Deutschland. Dann müssen Unternehmen schnell und richtig reagieren«, erklärt Barwasser.

# Fraunhofer weltweit

Schotterhaufen und Arbeitern bewegen kann.

Um Entscheidungsfindungen in Bauprozessen digital zu unterstützen, richtet Fraunhofer Italia zudem das BIM Simulation Lab ein. Im Rahmen dieses Projektes werden drei Software-Systeme entwickelt, die das »Building Information Modeling (BIM)« ermöglichen, eine Methode der vernetzten Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden.

## Israel

**Keine Chance für Herpesviren**

Herpesviren bleiben ein Leben lang im Körper. Sie ruhen, vom Immunsystem unerkannt, in Nervenzellen und können von dort aus immer wieder Infektionen hervorrufen. Derzeitige Behandlungsmöglichkeiten lindern lediglich die Symptome, können aber einen erneuten Ausbruch nicht verhindern. Das wollen Forscher des Fraunhofer-Instituts für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB in Stuttgart zusammen mit Kollegen der Hebräischen Universität in Jerusalem ändern.

Im Kern der infizierten Wirtszelle verursacht ein kodiertes Protein die Vermehrung des Herpes-simplex-Virus-1 (HSV-1). Dadurch kommt es zum Ausbruch der

Krankheit, wie etwa dem Lippenherpes. Dieses Protein kann durch bestimmte Ribonukleinsäuren blockiert werden. Das Team um Gershon Golomb, Hebrew University, und Steffen Rupp, Fraunhofer IGB, forscht daher an der Entwicklung eines liposomalen Trägersystems, das die blockierenden Ribonukleinsäuren stabilisiert und möglichst gezielt in die infizierten Zellen bringt, um eine Reaktivierung des Virus zu verhindern.

Den Wissenschaftlern gelang es, ein optimiertes liposomales System (LipDOPE-siHSV) herzustellen. »Es wurde eine signifikante antivirale Aktivität in mit HSV infizierten Zellen erzielt«, erklärt Steffen Rupp.

# Die Jagd nach der Anti-Icing-Formel



Fliegst du schon oder enteist du noch? Das ist die – kostenträchtige – Frage bei kalten Temperaturen. © mauritius images

Vereiste Tragflächen erhöhen das Gewicht des Flugzeugs, stören Aerodynamik und Flugverhalten. Eine neue Oberflächenstruktur vom Fraunhofer IWS, der TU Dresden und der Airbus Zentralforschung verhindert das Anhaften. 400 bis 600 Liter Chemikalien kostet das Enteisen eines Flugzeugs – die Passagiere dazu wertvolle Zeit, bis die Maschine endlich in der Luft ist.

Text: Britta Widmann

**E**is am Flugzeug? Für die Fluggäste ist es ärgerlich, weil es sie Zeit kostet. Für die Fluggesellschaften ist es teuer, da die Enteisung eines einzigen Flugzeugs 400 bis 600 Liter Chemikalien verbraucht. »Wir sind«, versichert Elmar Bonaccorso, Materialwissenschaftler bei Airbus, da sehr glaubhaft, »permanent auf der Suche nach einer umweltfreundlicheren Anti-Icing-Formel!«

**Eine ökologisch nachhaltige Lösung** hat Airbus mit Forschenden des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik IWS sowie der TU Dresden getestet: Im EU-Projekt Laser4Fun entwickelten die Partner mit der Direkten Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) ein Laserverfahren, mit dem sich komplexe Oberflächenstrukturen im Mikrometer- und Submikrometerbereich gestalten lassen. Diese ermöglichen ein effektives Anti-Icing. Die Vorteile erläutert Dr. Tim Kunze, Gruppenleiter Oberflächenfunktionalisierung am Fraunhofer IWS: »Zum einen wird das Anhaften von Eis verhindert oder stark reduziert, und zum anderen ist eine geringere Heizleistung beim Enteisen erforderlich.« Denn nicht nur am Boden, auch in der Luft ist die Bildung von Eis kritisch. »Wenn das Flugzeug bei Minusgraden durch die Wolken fliegt, gefriert das Wasser innerhalb von Millisekunden auf der Oberfläche. Um die Funktionsfähigkeit von Steuerelementen wie Landeklappen nicht zu stören, kommen thermische Eisschutzsysteme zum Einsatz«, erklärt Elmar Bonaccorso. Dabei muss es nicht einmal allzu kalt sein. Denn im Vergleich zu trockenem Eis, das sich bei extremer Kälte bildet, entsteht bereits bei Temperaturen um den Nullpunkt »klebriges« Eis, das zusätzlich besonders schwer ist.

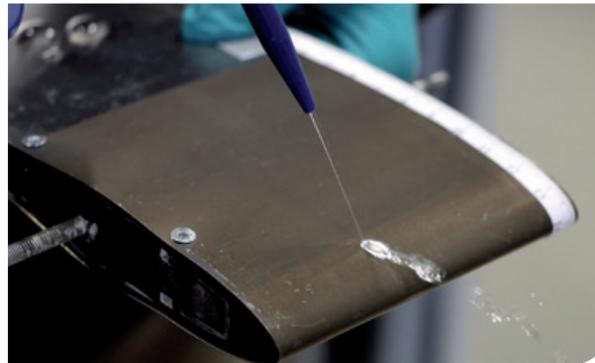
Der Trick: Die Forscherinnen und Forscher nutzen die DLIP-Technologie mit Ultrakurzpulslasern, sodass mehrstufige Mikrostrukturen auf 3D-Tragflächen in einem Ein-Schritt-Verfahren erzeugt werden. Das Ergebnis: Teile des anhaftenden Eises können sich unter bestimmten Vereisungsbedingungen von selbst lösen, sodass eine 20 Prozent geringere Heizleistung für den aktiven Eisschutz ausreicht. Dies eröffnet zahlreiche Vorteile: Es sind beim Start weniger umweltschädliche Enteisungsmittel erforderlich, die Wartezeit für die Fluggäste während der Enteisung reduziert sich und der Energie- sowie der Treibstoffverbrauch im Flugbetrieb sinken ebenso wie das Fluggewicht. »Mit herkömmlichen Technologien ist eine Kombination der beiden Effekte aktuell nicht möglich«, betont Kunze.

## Härtetest im Windkanal

Um diesen Kombi-Effekt zu erzielen, waren systematische Prozessentwicklungen und viele Tests in den Laboren von Airbus erforderlich. Im Windkanal des Flugzeugherstellers in Ottobrunn bei München wurde der Demonstrator – ein mit der DLIP-Technologie strukturiertes, komplex geformtes NACA-Profil – unter realen Bedingungen bei Windgeschwindigkeiten zwischen 65 bis 120 m/s, Lufttemperaturen unter

minus zehn Grad Celsius und verschiedenen Feuchtwerten geprüft.

Das Resultat der Experimente: Auf dem unstrukturierten Profil verschwindet das Eis bei einer Heizleistung von 60 Watt erst nach 70 Sekunden, auf dem strukturierten Pendant hingegen bildet es sich bereits nach fünf Sekunden vollständig zurück – bei gleicher Heizleistung. »Mit unserem DLIP-Ansatz realisierten wir erstmals multiskalige biomimetische Oberflächen mit Mikrometerauflösung auf einem komplexen Bauteil wie dem NACA-Profil. Wir konnten die konkreten Vorzüge gegenüber anderen Laserverfahren zeigen«, so Tim Kunze. Sein Kollege Sabri Alamri ergänzt: »Die wasserabweisende Struktur ist ein Versuch, herkömmliche Technologien durch umweltschonende, kostengünstigere Alternativen zu ersetzen.« Reale Flugtests mit einem A350, an dem eine per DLIP bearbeitete Oberfläche angebracht wurde, sind bereits gestartet. ■



»Die wasserabweisende Struktur ist ein Versuch, herkömmliche Technologien durch umweltschonende, kostengünstigere Alternativen zu ersetzen.«

Sabri Alamri,  
Fraunhofer IWS

Das NACA-Profil mit der wasserabweisenden strukturierten Oberfläche.  
© Airbus

## Direct Laser Interference Patterning (DLIP)

Die Grundlage des Interferenzeffekts ist schon aus dem Physikunterricht bekannt: Ein Lichtstrahl, der einen Doppelspalt passiert, bildet bei Überlagerung ein periodisches Muster aus hellen und dunklen Linien – sogenannte Interferenzmuster. Die Experten vom Fraunhofer IWS erzeugen das Muster auf anderen Wegen – gleich bleibt aber, dass Licht beim Direkten Laserinterferenzstrukturieren (engl.: Direct Laser Interference Patterning) überlagert werden muss.

Das Verfahren eignet sich zum Herstellen von nano- und mikrometergroßen Strukturen und ermöglicht gezielte Oberflächentopographien für eine Vielzahl von Anwendungen. Ein kohärenter Laserstrahl wird in zwei oder mehr Strahlen geteilt und auf der Oberfläche des Bauteils kontrolliert überlagert. Der aus der Überlagerung resultierende Interferenzeffekt – die »periodische Modulation der Laserintensität« – erlaubt das Aufbringen definierter Strukturen auf 2D- und 3D-Bauteilen.

# Gewandhaus? Zu Hause!

Neuer Klang für neue Zeiten:  
Ein Besuch dort, wo der Audiogenuss  
von Übermorgen entsteht.

Text: Josef Seitz

Selten ist das eigene Heim so sehr Lebensmittelpunkt geworden wie in Zeiten der Corona-Krise. Im größten Fraunhofer-Institut, dem IIS in Erlangen, arbeitet Dr. Ulli Scuda als Leiter des Soundlab mit seinem Team an neuen Wegen, wie das Wohnzimmer Konzertsaal werden kann, Kino und Sportarena.

## Hören wie der Dirigent

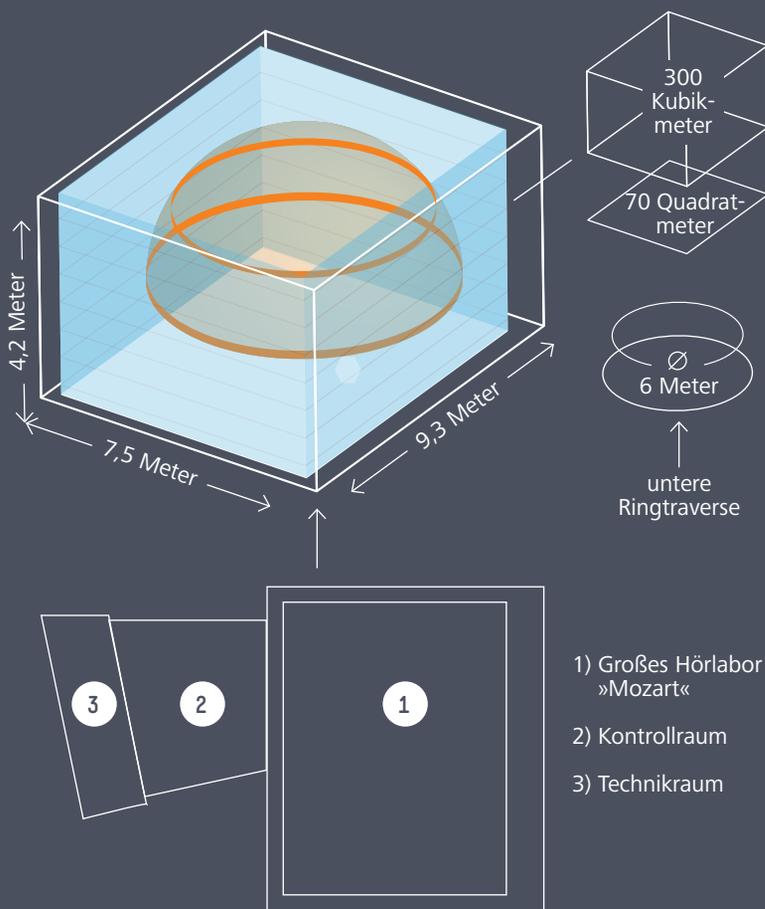
Im Leipziger Gewandhaus klopft der Dirigent ans Pult. Die Musiker konzentrieren sich. Dann heben sie an zu Beethovens 9. Symphonie: »Alle Menschen werden Brüder«. Ein Daumen-Druck auf die Fernbedienung: Der Zuschauer vor dem Fernseher wechselt akustisch vom Platz des Dirigenten hoch auf den Balkon. Die »Ode an die Freude« klingt weniger direkt, dafür angereichert um Hall und Akustik des Gewandhauses. Einen einzigen Daumendruck weiter empfängt der »Queen's Seat« den Zuhörer, auch wenn der weiter zu Hause im Fernsehsessel sitzen bleibt – fernab von hustenden Sitznachbarn und weit von jeder möglichen Tröpfcheninfektion.

Es sind faszinierende Klangmöglichkeiten, die hier schon entwickelt wurden, im Bereich Audio und Medientechnologien am Fraunhofer IIS in Erlangen, der Geburtsstätte des Welterfolgs mp3. Faszinierender ist, was noch entstehen wird. Im »Tatort« am Sonntag endlich Worte verstehen statt Genuschel hören? In der Allianz-Arena den Kommentator ausblenden und Live-Atmosphäre samt Stadionsprecher genießen? Beim Spielfilm das Sound-Design in 3D erleben als, wie Ulli Scuda sagt, »Emotion, die erzählt wird«? All das bekommt der Zuschauer an die Hand, in seine Fernbedienung, die dem Fernsehen zu einer individualisierbaren Akustik verhilft. »Ich bin überzeugt«, sagt Scuda, »dass dieses Erleben für unsere Gesellschaft immer wertvoller werden wird – gerade wenn wir durch Pandemie und Ausgangssperren eingeschränkt werden.« Den promovierten Tonmeister fasziniert die Unmittelbarkeit des Klangs. »Man kann sich im Kino die Hand vor die Augen halten, aber ein gutes Sounddesign packt einfach jeden.«

Mit seinem Soundlab-Team aus 14 Toningenieuren und hochspezialisierten Technikern profitiert Ulli Scuda von einer einzigartigen Voraussetzung: dem Hörlabor »Mozart« (s. rechts), in dem allein Lautsprecher, Mischpulte und Computer im Wert von rund 700 000 Euro installiert sind. Ohne Musik ist es hier so still, »dass man sein eigenes Blut rauschen hört«, sagt Ulli Scuda. Und mit Musik? »Ein großer Männerspielplatz – auch für Frauen.« ■

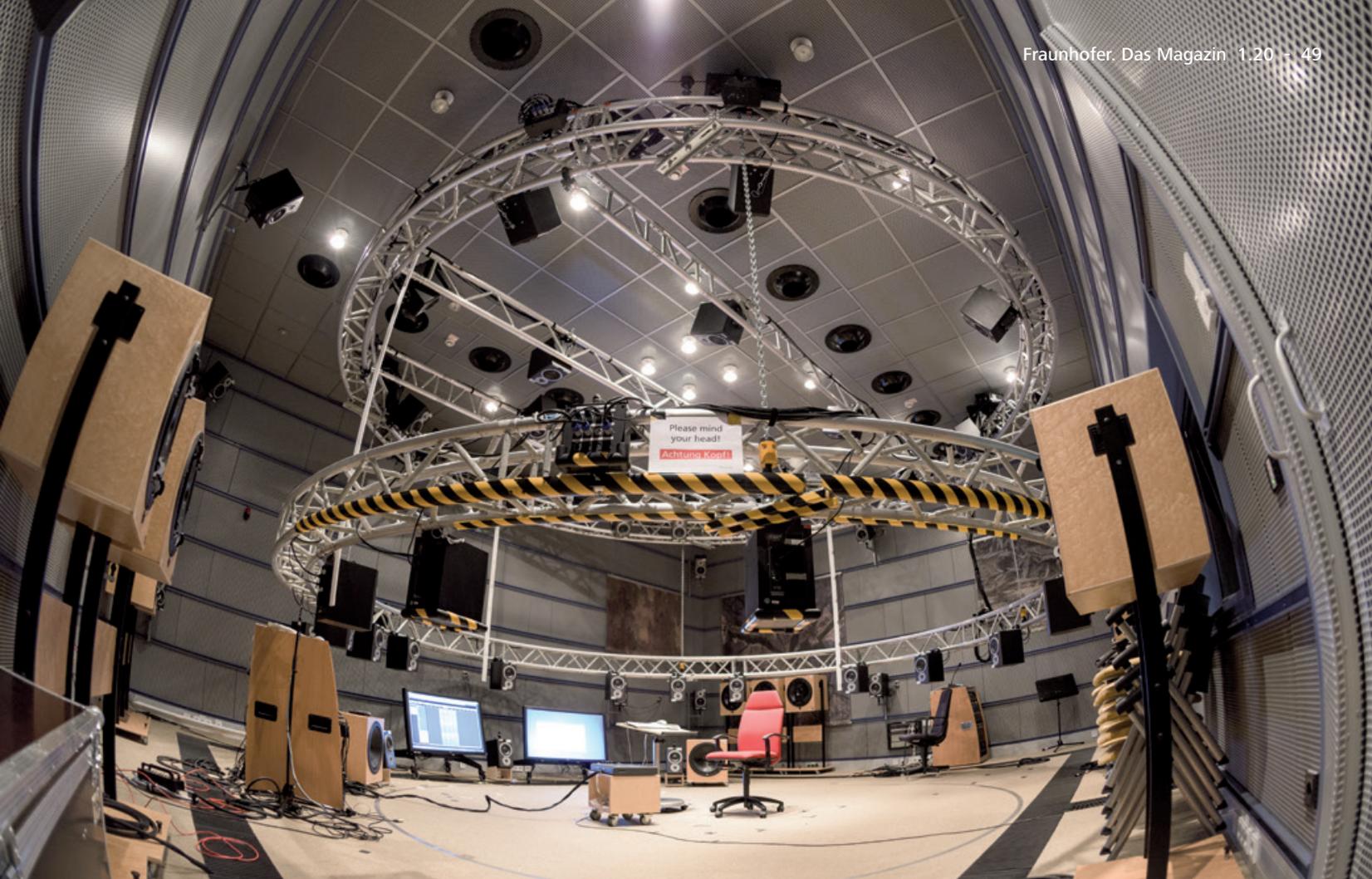
## Hörlabor »Mozart«

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS ist die Geburtsstätte des mp3-Formats. Für die Entwicklung der Audiotechnologien betreibt das IIS weltweit einmalige Hörlabore. Sie heißen »Mahler«, »Ravel« – das größte hat den Namen »Mozart« bekommen. Es entspricht den strengen Anforderungen der ITU-R Recommendation BS.1116 zur Durchführung vergleichender subjektiver Hörtests für die Entwicklung von Audiocodierverfahren und Signalverarbeitungstechnologien. Im Spektrum von Mono bis zu 3D-Klang und 22.2 lassen sich alle Hörsituationen hart umschalten – von einem Kontrollraum mit dem Namen »Strawinsky«.



## Die absolute Stille dank Raum-in-Raum-Konzept

Das Hörlabor »Mozart« ist akustisch völlig entkoppelt von der Umgebung. Zwischen Innenraum und äußerer Betonschale befindet sich ein halber Meter Dämmmaterial. Auch der Fußboden ist vom Rest des Gebäudes isoliert, um jeden Trittschall auszuschließen. Selbst die Klimaanlage hat extragroße Einlassdüsen erhalten, um zu garantieren, dass die Luft nur langsam strömt und kein Lufthauch die Stille stören könnte. Nur in diesem so speziellen Raum wird es möglich, jedes Klangdetail tatsächlich hörbar zu machen.



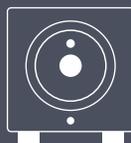
9x

**9 Hauptlautsprecher**  
Klangquelle Nr. 1: 3-Wege-Koaxial-Lautsprecher RL 901k der Firma Geithain, 1960 gegründet und Lieferant der Studiomonitore für den damaligen DDR-Rundfunk



43x

**43 Lautsprecher**  
Die aktiven Nahfeldmonitore BM6A mk II der Firma Dynaudio sind entlang der oberen Ringtraverse angebracht. Sie übertragen von 48 bis 21 000HZ.



2x

**2 Subwoofer**  
Auch für den Bass sind Geithain-Modelle installiert. »Voll aufgedreht wackelt zwar nicht unser Labor«, sagt Dr. Scuda, »dafür wehen die Hosenbeine.«

## Das perfekte Wohnzimmer?

Eine runde Sache – zumindest für den perfektionistischen Musik- und Kinofreund. Dank der Ringtraversen sind alle Klangquellen gleich weit vom Hörplatz entfernt angebracht. Die Lautsprecher lassen sich vom Steuerraum »Strawinsky« (unten) in allen Variationen kombinieren, um jeder Höranforderung gerecht zu werden.



3D-Rundgang durchs Hörlabor »Mozart«  
<https://s.fhg.de/iis360>

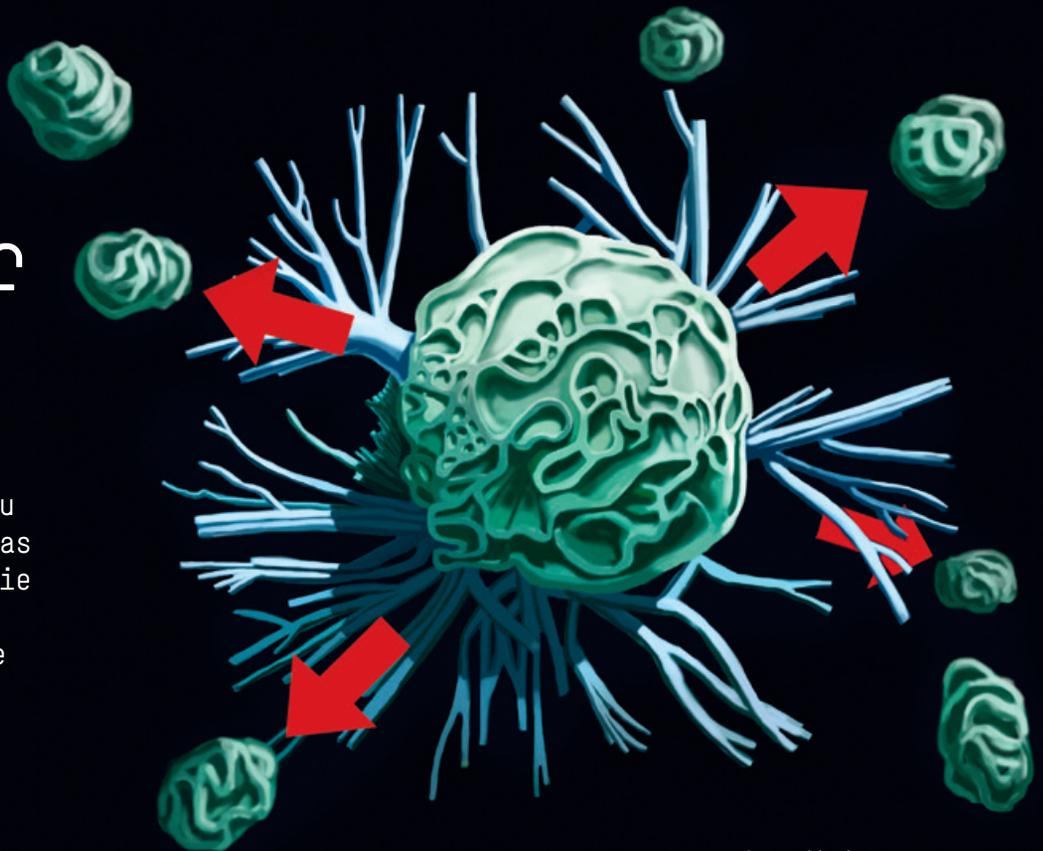


Am Mischpult:  
Dr. Andreas Silzle, Hauptplaner der Schalllabore

# Jagd auf die Killer im Körper

Was macht eine Tumorzelle zu einer mörderischen Zelle? Das Fraunhofer ITEM erforscht die Mechanismen der Metastasen-Bildung – und sucht Ansätze für neue Therapien im Kampf gegen Krebs.

Text: Christine Broll



© mauritius images

»Neun von zehn aller Krebs-toten sterben nicht am Primärtumor, sondern an den Tochtergeschwülsten.«

Dr. Bernhard Polzer,  
Fraunhofer ITEM

**H**och konzentriert blickt Dr. Bernhard Polzer durch das Mikroskop. Auf dem Objektträger liegen Zellen aus dem Knochenmark einer Brustkrebspatientin. Zwischen den Knochenmarkszellen sucht er nach gestreuten Tumorzellen, die er zuvor mit einem blauen Farbstoff markiert hat. Hat er eine blaue Zelle entdeckt, saugt er sie mit einer Glaskapillare auf und legt sie auf einen leeren Objektträger.

Es sind einzelne Zellen wie diese, die Krebspatienten umbringen können. Gestreute Tumorzellen, die im Knochenmark oder anderen Organen jahrelang schlummern und eines Tages Metastasen bilden, die schließlich zum Tod führen. Neun von zehn aller Krebstoten sterben nicht am Primärtumor, sondern an den Tochtergeschwülsten.

»Wir entwickeln spezielle Methoden, um einzelne gestreute Tumorzellen genetisch zu analysieren und sie gezielt zu bekämpfen«, erklärt Bernhard Polzer, stellvertretender Bereichsleiter im Forschungsbereich Personalisierte Tumorthherapie des Fraunhofer-Instituts für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM in Regensburg. Anhand der genetischen

Daten will das 40-köpfige Forschungsteam Licht in den noch unverstandenen Prozess der Metastasen-Bildung bringen. Und Ansätze für neue Therapieformen finden.

Geleitet wird der Forschungsbereich von Prof. Christoph Klein, der 2014 für seine Arbeiten mit dem Deutschen Krebspreis ausgezeichnet wurde. »Bei der Krebsentstehung greifen die Zellen auf Programme zurück, die in der Embryonalentwicklung wichtig sind«, erklärt Klein. »Wenn sich eine entartete Brustdrüsenzelle ablöst und über das Blut in das Knochenmark gelangt, versucht sie dort eine neue Brustdrüse zu bilden.« Es entsteht dabei aber keine Brustdrüse, sondern nur eine Wucherung, die das umliegende Organ zerstört.

## Lymphknoten-Untersuchung wie vor hundert Jahren

Ein großes Potenzial zur Vermeidung von Metastasen sieht Christoph Klein in einer Diagnostik, welche die beginnende Metastasierung molekular und zellbiologisch verstehen lernt. Wichtige Informationen hierzu können bei der pathologi-

schen Untersuchung von Lymphknoten gewonnen werden, die während einer Tumoroperation entfernt wurden. Um zu sehen, ob der Tumor bereits gestreut hat, werden die Lymphknoten seit mehr als hundert Jahren mit dem gleichen Verfahren begutachtet. Aus dem Gewebe werden an mehreren Stellen hauchdünne Scheiben herausgeschnitten, in denen der Pathologe nach Krebszellen sucht. »Leider wird das Gewebe zwischen den Schnittebenen nicht betrachtet«, kritisiert Klein. »Dort vorhandene Metastasen werden daher übersehen.«

Gemeinsam mit dem Fraunhofer IPA und dem Fraunhofer IIS hat das Team von Christoph Klein eine Methode entwickelt, mit der sich der gesamte Lymphknoten analysieren lässt. Zur Probenvorbereitung dient ein Tissue Grinder, ein Gewebezerkleinerer, der die Zellen schonend separiert. Danach wird die Probe mit einem speziellen Farbstoff behandelt, der die gestreuten Tumorzellen anfärbt. Zwei Millionen Lymphknoten-Zellen werden automatisch gescannt. Unter dem Mikroskop erfolgt dann die Begutachtung der verdächtigen Objekte. »Mit unserer Methode haben wir bei der Hälfte der untersuchten Lymphknoten Tumorzellen nachgewiesen«, berichtet Bernhard Polzer. »Mit dem klassischen Verfahren konnten die Pathologen dagegen nur in 15 bis 20 Prozent der Proben Krebszellen finden.« Zurzeit wird das Verfahren für den Markt entwickelt.

## Gestreute Tumorzellen verändern sich

Hat Bernhard Polzer unter dem Mikroskop einzelne gestreute Tumorzellen isoliert, geht er mit der Probe in den Raum nebenan. Hier stehen DNA-Sequenzierer der neuesten Generation. Doch selbst für diese modernen Maschinen ist die DNA-Menge einer Einzelzelle zu wenig, um ein verlässliches Ergebnis zu liefern. Vor der Analyse muss Polzer daher die DNA der Zelle vervielfältigen. Dazu benutzt er eine Methode, die Christoph Klein bereits 1999 entwickelte – eine wichtige Pionierarbeit, die die Analyse von Einzelzellen erst möglich machte und heute weltweit als Standardverfahren etabliert ist.

**Bei der genetischen Analyse** lässt sich zum Beispiel erkennen, ob die gestreuten Tumorzellen die gleichen Eigenschaften haben wie der Primärtumor und daher auf die gleiche Behandlung ansprechen könnten. Oft ist das aber nicht der Fall. Die gestreuten Zellen verändern sich, wenn sie längere Zeit in einem fremden Gewebe leben. »Wenn Brustkrebszellen im Knochenmark liegen, können sie die Eigenschaften der sie umgebenden blutbildenden Zellen annehmen«, berichtet Christoph Klein. »Offenkundig passen die Zellen sich an ihre Umgebung an.« In ihrem neuen Umfeld können die gestreuten Zellen aber auch neue Krebsgene aktivieren. Dann werden sie immer aggressiver und gefährlicher.

Wenn die genetische Analyse ergibt, dass sich die gestreuten Tumorzellen verändert haben, müssen sie mit anderen

Mitteln bekämpft werden als der Primärtumor. Wie sich für jede Patientin und jeden Patienten das geeignete Medikament finden lässt, wird von Polzer und Klein gerade erforscht. Ausgangspunkt ist eine Technologie, die bereits bei großen Zellzahlen funktioniert und jetzt für Einzelzellen adaptiert wird. Analysiert werden dabei 450 krebstypische Mutationen, für die es bereits Medikamente auf dem Markt oder in klinischen Studien gibt.

**Bernhard Polzer hat das Ziel klar vor Augen:** »Wir wollen aus Lymphknoten oder Knochenmark die gestreuten Tumorzellen isolieren und sie auf die 450 Mutationen untersuchen. Dann könnten wir mit dem geeigneten Medikament die Bildung von Metastasen verhindern.« Damit dieses Ziel erreicht wird, arbeiten die Regensburger Forscher mit verschiedenen Firmen zusammen, die diese innovative Diagnostik in den klinischen Alltag transferieren wollen.

Um zu ermitteln, welches Medikament gegen die Metastasen eines Patienten wirkt, nutzt das Regensburger Team auch klassische Methoden. Dazu werden die Tumorzellen auf einem Nährboden vermehrt. Darauf wachsen sie zu kugeligen Gebilden, sogenannten Organoiden, heran. An diesen Zellen lassen sich dann direkt im Labor die verschiedenen infrage kommenden Wirkstoffe testen. In Zusammenarbeit mit dem Regensburger Klinikum soll auf diese Weise in Zukunft vielen Patienten geholfen werden.

## Was macht eine Zelle zur Killerin?

Wenn Bernhard Polzer eine blau gefärbte gestreute Tumorzelle aufsaugt, fragt er sich oft: Hätte diese Zelle das Potenzial gehabt, die Patientin zu töten? Oder hätte sie weiter geschlafen und keinen Schaden angerichtet? Denn längst nicht jede gestreute Zelle bildet auch Metastasen. Christoph Klein hat ausgerechnet, dass bei einer Brustkrebspatientin, die noch keine sichtbaren Metastasen hat, 10 000 bis 20 000 gestreute Krebszellen im Knochenmark vorkommen können. Nur ein paar davon haben das Potenzial, eine Metastase zu bilden. Aber was sind die Eigenschaften, die sie dazu befähigen? Überlistet sie das Immunsystem? Hat sie aggressive Krebsgene aktiviert? Was macht sie zu einer mörderischen Zelle?

Um hier eine Antwort zu finden, hat Christoph Klein in Zusammenarbeit mit mehreren Kliniken eine Studie mit 200 Brustkrebspatientinnen gestartet. Von diesen Patientinnen untersucht sein Team den Primärtumor, gestreute Tumorzellen und Metastasen. In jeder untersuchten Zelle werden alle von der Zelle aktivierten Gene analysiert. Diese Daten werden dann mit dem klinischen Verlauf der Patientinnen korreliert. Eine riesige Datenmenge, die das Bioinformatik-Team der Forschungsgruppe strukturiert. »Wir suchen in den Tumorzellen nach Markern, die mit einer schlechten Prognose für die Patientin assoziiert sind«, erklärt Christoph Klein. Ende des Jahres werden die gesamten Ergebnisse der Studie vorliegen. Und einen Hinweis darauf geben, was eine Zelle zur Killerin macht. ■

Auch bei einer Brustkrebspatientin ohne sichtbare Metastasen können bis zu 20 000 gestreute Krebszellen im Knochenmark vorkommen.



So soll MARK 51\*7 einmal aussehen: vorne die geplanten Forschungsgebäude, hinten das große DHL-Paketzentrum. © Bochum Perspektive 2022 GmbH

Das ehemalige 70 Hektar große Opelgelände: rechts das neue DHL-Paketzentrum, links das Gebiet, auf dem die Forschungsgebäude und Technologieunternehmen entstehen, die mit Energie aus Grubenwasser versorgt werden. © Lutz Leitmann



# Ein Bergwerk heizt ein



Erdwärme aus der gefluteten Kohlenzeche Dannenbaum:  
Damit könnte der geplante Technologiecampus zum  
Vorbild für das gesamte Ruhrgebiet werden.

Die Strecken in einem Bergwerk sind wie U-Bahn-Tunnel ausgebaut. In stillgelegten Bergwerken sind sie häufig mit Wasser gefüllt – und das liefert Energie. © shutterstock

Text: Christine Broll

**D**er Dornröschenschlaf dauerte mehr als 60 Jahre. 1957 waren in der Kohlenzeche Dannenbaum noch 239 500 Tonnen Steinkohle abgebaut worden. 1958 verließ der letzte Kumpel das Bergwerk. Die Schächte wurden verfüllt, die untertägige Bergwerksinfrastruktur steht mittlerweile unter Wasser. 800 Meter darüber drehte sich die Welt weiter. Auf dem ehemaligen Zechengelände baute Opel ein riesiges Automobilwerk und schloss es wieder. Jetzt erlebt das Areal seine zweite Metamorphose, hin zu einem Industrie- und Technologiecampus, auf dem einmal 6000 Menschen arbeiten werden – und die alte Kohlenzeche soll eine ganz aktuelle Rolle übernehmen.

**Die Rolle des Prinzen**, der Dannenbaum wachküst, übernehmen die Stadtwerke Bochum und die neue Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastruktur und Geothermie (IEG). Gemeinsam wollen sie das geflutete Bergwerk nutzen, um den Technologiecampus mit Energie zu versorgen. Im Winter wird aus 800 Metern Tiefe 35 Grad warmes Wasser zum Heizen gefördert. Im Sommer sorgt 18 Grad kaltes Wasser aus 300 Metern Tiefe für Kühlung.

### Umweltfreundliche Alternative für die gesamte Region

Für Prof. Rolf Bracke, Leiter der Fraunhofer IEG, könnte dieses Projekt Vorbildfunktion für das gesamte Ruhrgebiet haben: »Unter großen Teilen des Ruhrgebiets befinden sich die Infrastrukturen von rund 200 ehemaligen Bergwerken mit zum Teil über 50 Quadratkilometern Ausdehnung und über 1000 Metern Tiefe. Die meisten sind mit Wasser gefüllt und ließen sich als thermische Speicher für industrielle oder energiewirtschaftliche Abwärme nutzen.« Die Energie aus dem Grubenwasser könnte auch eine umweltfreundliche Alternative für die Versorgung der großen Fernwärmenetze in der Region sein. Denn bislang werden die meisten Fernwärmenetze noch durch die Abwärme von Erdgas- und Kohlekraftwerken gespeist.

Der Name des neuen Technologiecampus ist genauso kreativ wie seine Energieversorgung. MARK 51°7 heißt das Areal des ehemaligen Opelgeländes jetzt, benannt nach seiner geografischen Lage bei 51° nördlicher Breite und 7° östlicher Länge. Rund die Hälfte der 70 Hektar großen Fläche soll mit Energie aus Grubenwasser versorgt werden. In diesem Bereich werden sich Technologieunternehmen ansiedeln, dazu Forschungsinstitute der Max-Planck-Gesellschaft und der Ruhr-Universität.

»Nach dem aktuellen Stand der Berechnungen gehen wir davon aus, dass bis zu 85 Prozent des Wärme- und Kältebedarfs der angeschlossenen Abnehmer durch das natürliche Energiepotenzial des Grubenwassers gedeckt werden kann«,

erklärt der wissenschaftliche Projektleiter Gregor Bussmann, stellvertretender Leiter der Abteilung Speicher und Untertagesysteme an der Fraunhofer IEG. »Mit dieser Wärmemenge könnte man rund 1000 Einfamilienhäuser beheizen.«

Damit ist dieses Grubenwasserprojekt mit Abstand das größte seiner Art in Deutschland. In einigen kleinen Vorhaben wurde das Prinzip bereits erprobt, zum Beispiel in Bochum, wo die Stadtwerke mit warmem Wasser aus der Zeche Robert Müser zwei Schulen und die Bochumer Feuerhauptwache beheizen.

### Hunderte von Lageplänen wurden zum digitalen 3D-Modell

Für die Planungen mussten Gregor Bussmann und sein Team erst einmal die Verhältnisse unter Tage analysieren. Dafür konnten sie auf Karten zurückgreifen, die die Markscheider seit der Eröffnung der Zeche im Jahr 1859 gezeichnet hatten und die heute bei der Bergbehörde in Dortmund archiviert sind. »Wir haben Hunderte von Lageplänen und Karten ausgewertet und in ein digitales 3D-Modell überführt«, berichtet Bussmann.

In diesem Modell konnte Bussmann sehen, wo die senkrechten Schächte und die waagrechten Röhrensysteme, die sogenannten Strecken, exakt liegen. Das unterirdische Gebäude besteht aus acht Stockwerken – den Sohlen. In der tiefsten Sohle, die mehr als 800 Meter unter der Oberfläche liegt, rechnen die Wissenschaftler mit einer Wassertemperatur von mindestens 35 Grad Celsius. Um dieses zu fördern, musste zuerst nach einer geeigneten Stelle für die Bohrung gesucht werden. ▶

200 ehemalige Bergwerke – und die meisten ließen sich als thermische Speicher nutzen!

Mehr als 60 Jahre ruhte die Kohlenzeche Dannenbaum. 1958 hatte der letzte Kumpel das Bergwerk verlassen.  
© Johann Schmidt/  
Fotoarchiv Ruhr Museum



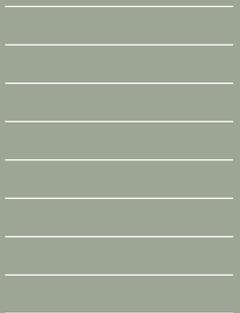
Nutzen Sie dieses  
Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig –  
für Gedanken, Notizen,  
Bewahrenswertes.

# Wenden

Bereit für eine



»Nachhaltigkeit bedeutet für mich, den Horizont meiner Entscheidungen zu erweitern. Ich versuche, nachhaltig zu handeln, indem ich mir klarmache, dass die Entwicklungen in Industrieländern und Entwicklungsländern genauso miteinander verbunden sind, wie die verschiedenen Abteilungen eines Unternehmens und Lieferkette. Gleichzeitig haben meine Entscheidungen nicht nur kurz- und mittelfristige, sondern eben auch langfristige Folgen. (Ich würde sicher weniger Kinderschokolade essen, wenn der Hosebund sofort und nicht erst mit einigen Tagen Verzögerung knäufen würde.)« Prof. Julia Arlinghaus  
Fraunhofer IFF





Besprechung in der Energiezentrale, die das Geothermiezentrum mit Erdwärme versorgt: Prof. Rolf Bracke (r.) und Gregor Busmann. © Sascha Kreklau/Fraunhofer

► Was nicht einfach war, denn durch die Bohrung wollte man keinesfalls befestigte Strecken in den darüber liegenden Sohlen beschädigen. Jetzt steht die Planung, im Frühsommer 2021 wird mit der Bohrung begonnen.

### Im Sommer wird der Kreislauf umgekehrt

Wenn alles fertig ist, können pro Stunde bis zu 70 Kubikmeter warmes Wasser gefördert werden. Dieses warme Wasser gibt seine Energie über einen Plattenwärmetauscher und Wärmepumpen an den Heizkreislauf des Wärmenetzes ab und wird dadurch auf rund 18 Grad abgekühlt. Dann wird es durch ein zweites Bohrloch in die vierte Sohle in 300 Metern Tiefe in das Bergwerk zurückgeführt. Im Heizkreislauf bringen die Wärmepumpen das Wasser dann auf eine Vorlauftemperatur von 48 Grad.

Im Sommer wird der Kreislauf umgedreht. Das kühle Wasser aus der vierten Sohle wird mittels Kältemaschinen weiter auf die Nutzttemperatur des Kältenetzes von 10 Grad abgekühlt. Die bei der Kälteproduktion entstehende Abwärme wird dabei in die achte Sohle injiziert. So wird das Wärmereservoir in 800 Metern Tiefe wieder regeneriert. Und der nächste Winter kann kommen.

Für die Genehmigung durch die Behörden musste die Fraunhofer IEG umfangreiche Untersuchungen zu möglichen Folgeschäden vorlegen. Darin konnte ausgeschlossen werden, dass sich der Untergrund durch die Pumpbewegungen hebt oder senkt. Es sind auch keine negativen Auswirkungen auf die Wasserqualität zu befürchten. »Da wir das Wasser in einem geschlossenen Kreislauf führen, kann es nicht verschmutzt werden«, verdeutlicht Busmann. »Außerdem liegen wir weit außerhalb von Trinkwassergewinnungsgebieten.«

Der Leiter der Fraunhofer IEG sieht in den stillgelegten Bergwerken zwischen Aachen und Hamm auf lange Sicht ein noch größeres Potenzial. Er möchte sie als Wärmespeicher nutzen. Wie das funktionieren könnte, will er im EU-Projekt »Heatstore« erproben – mit einer Kleinzeche, die direkt unter dem Campus der Fraunhofer IEG liegt. »Wir wollen das Grubenwasser im Sommer mit einer hocheffizienten Solaranlage auf 60 bis 70 Grad erwärmen. Im Winter werden wir dieses Wasser mittels einer Hochtemperatur-Wärmepumpe dann auf 100 bis 110 Grad erhitzen und in das bisher von fossilen Brennstoffen befeuerte Fernwärmenetz Bochum-Süd einspeisen«, betont Rolf Bracke. »Die alten Zechen in ehemaligen Bergbauregionen können nach dem Kohleausstieg einen wichtigen Beitrag zur Transformation der Fernwärmesysteme leisten.«

Bis zu 70 Kubikmeter Wasser speisen ihre Energie ein – pro Stunde.

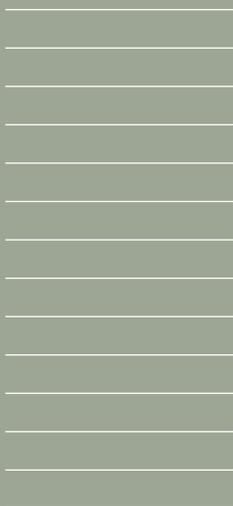
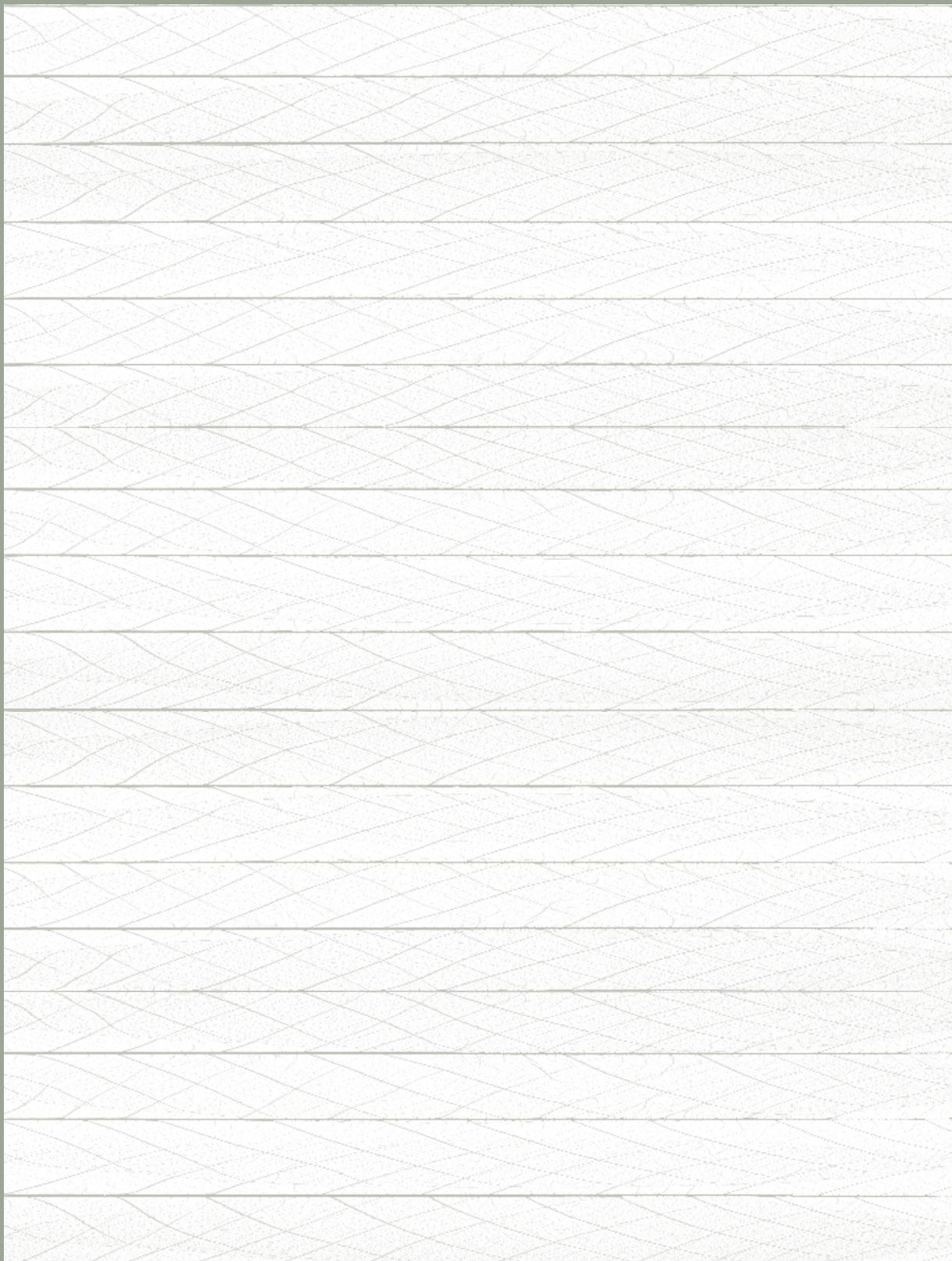
80%

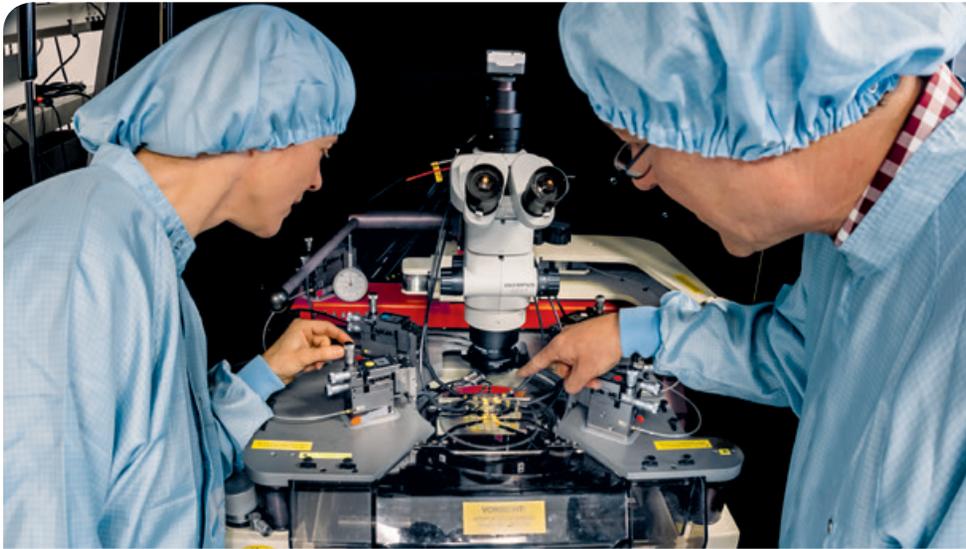
Fraunhofer hat eine besondere Verantwortung für die Verwirklichung der UN-Nachhaltigkeitsziele. Davon ist nach einer Fraunhofer-Befragung die absolute Mehrheit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter überzeugt:

# Wenden

Bereit für eine

Nutzen Sie dieses Fraunhofer-Magazin nachhaltig – für Gedanken, Notizen, Bewahrens Wertes.





Prof. Heidemarie Schmidt und Prof. Stefan Schulz versprechen sich Großes von den winzigen Memristoren. © Cornelia Schubert

# Kleines Ding, große Chancen

Memristoren ermöglichen eine Arbeitsweise, die der von Synapsen im menschlichen Gehirn ähnelt – eine Hoffnung für KI-Anwendungen!

Text: Mehmet Toprak

**M**emristor ist ein Kunstwort, das sich aus Memory und Resistor zusammensetzt. Gemeint ist ein elektronisches Bauelement, das Daten zugleich verarbeiten und speichern kann. Es ist sehr kompakt, schnell und energieeffizient. Eine nützliche Komponente aus der Ingenieurskiste. Eigentlich kein großes Ding. Könnte man denken.

Am Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS ist man da ganz anderer Meinung. Prof. Heidemarie Schmidt ist Leiterin des ATTRACT-Projekts BFO4ICT (»Entwicklung einer Gesamttechnologie für die modulare Integration neuartiger elektronischer Bauelemente in mikroelektronische CMOS-Hybride«). Sie arbeitet mit ihrem fünfköpfigen Team seit 2016 an der Technologieentwicklung zur industrietauglichen Herstellung von Memristoren auf der Basis von Bismut-Eisenoxid (BFO). Dem ENAS-Team ist die praxisnahe Fertigung solcher Bauteile gelungen. Nicht nur deshalb glaubt Schmidt an die große Zukunft der Memristoren und spricht von Anwendungsszenarien wie Künstliche Intelligenz und Kryptographie.

## Einzigartiges Bauteil

Ein Abstecher in die Grundlagen erklärt, warum diese Komponente so interessant sein kann. Die Elektrotechnik kennt drei grundlegende passive Bauelemente: Kondensator,

Spule und Widerstand. Der Kondensator speichert elektrische Ladung, die Spule induziert Spannung, der Widerstand begrenzt oder teilt den Strom. Der Transistor gehört nicht in diese Reihe, er ist ein aktives Bauelement. Der Wissenschaftler Leon Ong Chua von der kalifornischen Universität Berkeley postulierte 1971, dass neben Kondensator, Spule und Widerstand ein viertes Bauelement existieren müsse. Ein Bauteil, das die Funktionen der anderen miteinander kombinieren könne. Er gab ihm den Namen Memristor.

**Damit war die Jagd eröffnet** auf ein geeignetes Memristormaterial. Erst 2007 gelang es Forschern, im Hewlett-Packard-Labor den ersten Memristor auf der Basis von Titanoxid zu bauen. Ein früher Prototyp und der Beweis, dass es ihn geben kann.

Die Eigenschaft, die dieses Bauteil so einzigartig macht, ist der variable Widerstand. Dessen Wert ist abhängig vom Stromfluss, genauer gesagt der elektrischen Ladung, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung durch das Bauteil fließt. Nach dem Abschalten der elektrischen Spannung bleibt der zu diesem Zeitpunkt erreichte Widerstandswert erhalten. Weil der Widerstand mittels Veränderungen an Stromfluss und Spannung regulierbar ist und nach dem Ausschalten nicht verloren geht, können die Bauteile für Datenspeicherung und Rechenoperationen genutzt werden. Das wäre ideal für die Hardware-Kryptographie, also das Generieren von Schlüsseln direkt in der elektronischen Komponente. ▶

»Der Memristor hat das Zeug, der Entwicklung von KI in ganz Europa einen Schub zu geben.«

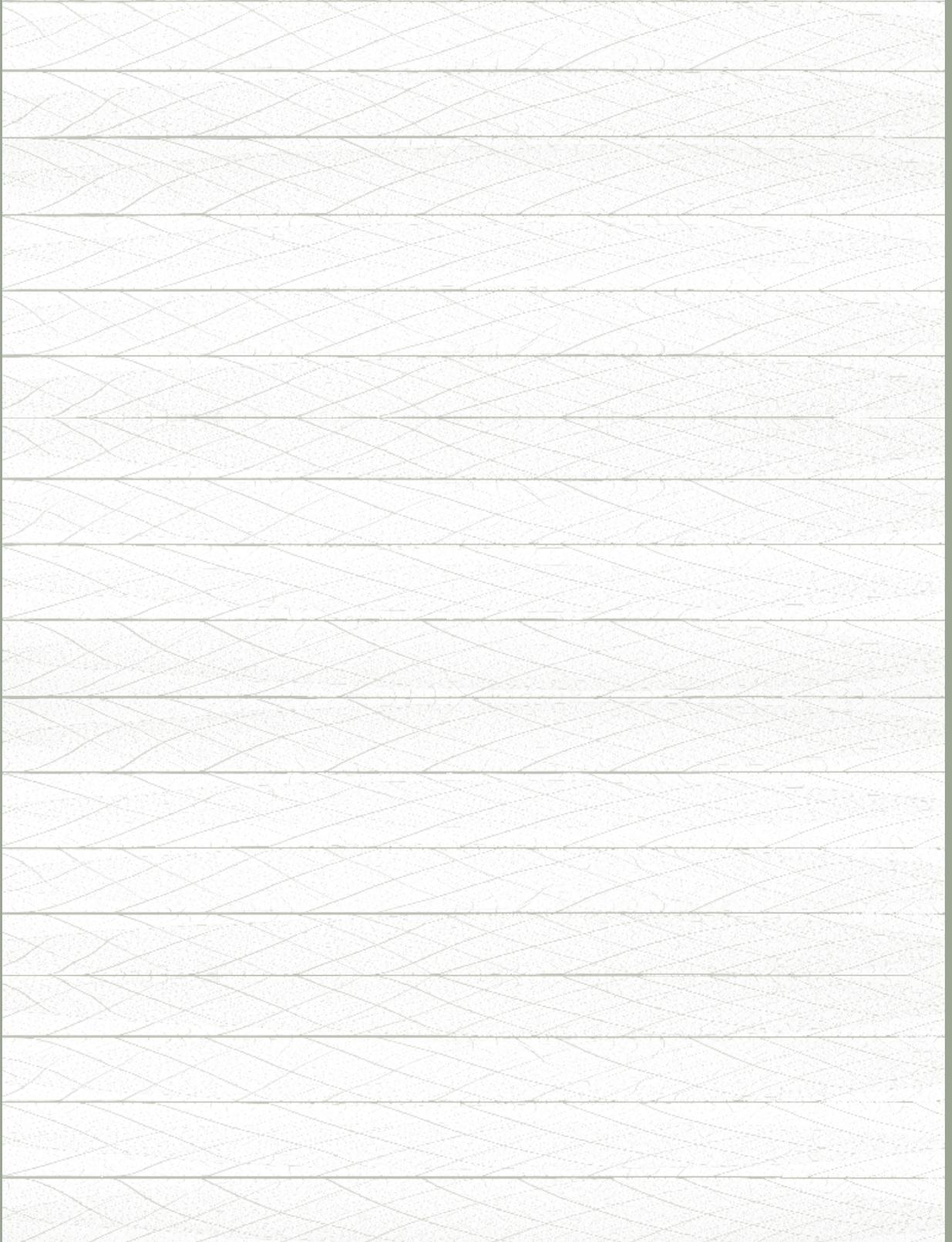
Prof. Stefan Schulz

Nutzen Sie dieses  
Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig –  
für Gedanken, Notizen,  
Bewahrenswertes.

# Wenden

Bereit für eine

»Nachhaltigkeit  
ist natürlich die  
ökologische  
Erhaltung der  
Umwelt, aber  
eben auch die  
ökonomische  
Langzeitigkeit  
von Produkten  
und Geschäfts-  
modellen.«  
Johannes Schuler,  
Fraunhofer ISI



► Wegen winziger Fertigungsschwankungen hat jedes Bauteil seinen eigenen variablen Widerstand. Es lässt sich damit zur Erzeugung eines individuellen Schlüssels einsetzen, Fachleute sprechen von »Physically Unclonable Functions«. Beispielsweise könnte eine Sprachnachricht, die man ins Handy spricht, direkt nach dem Mikrofoneingang verschlüsselt werden.

## Künstliche Intelligenz im Schaltkreis

Ein noch bedeutenderes Anwendungsszenario sieht Heidemarie Schmidt aber im sogenannten neuromorphen Rechnen, bei dem die Datenverarbeitung und -speicherung an einem Ort erfolgt. Die besonderen Qualitäten des Memristors, dessen Widerstandswert zwischen null und eins beliebig, das heißt analog, variierbar ist, ermöglichen nämlich eine Arbeitsweise, die der von Synapsen im menschlichen Gehirn gleicht. Darüber hinaus lässt sich im BFO-Memristor jede der 16 möglichen zweiwertigen Logikfunktionen implementieren, wobei deren Ausgangssignale auch wieder zwischen null und eins variierbar sind. Hinzu kommt, dass der BFO-Memristor jederzeit in eine der 16 Logikfunktionen rekonfigurierbar ist.

Schmidt verweist auf einen entscheidenden Vorteil: »Da die Logikfunktionen mit den Memristoren definiert und rekonfigurierbar sind, sind auch die Algorithmen zum Trainieren von KI-Schaltungen beherrschbar und transparent.« Das ist der springende Punkt: »Damit lassen sich KI-Anwendungen zertifizieren. Bei heiklen Szenarien im Bereich Sicherheit oder beim autonomen Fahren von Autos ist das eine entscheidende Voraussetzung für den Praxiseinsatz«, sagt Schmidt.

## Memristor für Next Generation Computing

Prof. Stefan Schulz ist Leiter der Abteilung Nano Device Technologies am Fraunhofer ENAS, wo das ATTRACT-Projekt BFO4ICT angesiedelt ist. Die Arbeiten im ATTRACT-Projekt sollen die Initiative »Next Generation Computing« voranbringen, eins der Forschungsfelder, die bei Fraunhofer als strategisch bedeutsam gelten. Schulz sagt: »Die Memristor-Technologie ist eine disruptive Technologie mit enormen Vorteilen. Hier müssen wir dranbleiben und die Ausdauer haben, auch einige Jahre zu warten, bis die Technologie wirklich marktreif ist.«

Heidemarie Schmidt arbeitet seit 13 Jahren an dem Thema. Die Aufgabe ist anspruchsvoll. Es erfordert beispielsweise hochentwickelte Dünnschichttechnologien, geeignete Reinräume und reproduzierbare Rezepte zur Herstellung der BFO-Memristoren in der Produktion. Dabei setzt das Fraunhofer ENAS auf die Zusammenarbeit mit den Forscherinnen und Forschern des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf sowie der TU Chemnitz.

Die Herausforderungen haben Schmidt und ihr Team gut bewältigt. Tatsächlich ist mehr gelungen, als nur erste Prototypen oder Demonstratoren vorzustellen. Die Forscher können inzwischen Memristoren auf Wafern fertigen. Wafer, das sind die weniger als einen Millimeter dicken Silizium-Scheiben, die bei der Produktion als Grundplatte der mikroelektronischen Bauelemente dienen. Je größer ein Wafer, desto mehr Bauelemente können damit produziert werden. Im Reinraum des Fraunhofer ENAS sind Wafer mit einem Durchmesser von 200 Millimetern im Einsatz. »Das war technologisch ein hohes Risiko, denn man weiß vorher nie genau, ob die Herstellungsverfahren im Nanometerbereich tatsächlich funktionieren«, bemerkt Schulz. Dass es klappt, haben die Fraunhofer-Forscherinnen und -Forscher inzwischen bewiesen. Und zwar auf Maschinen, die auch in der realen Fabrikhalle genutzt werden können.

## Cleverer Wahl des Materials

Ein Meilenstein für den Erfolg des Projekts war die Wahl des Memristor- und Elektroden-Materials. Während früher oft Titandioxid als Memristor-Material und Edelmetalle wie Platin oder Silber als Elektroden-Material zum Einsatz kamen, nutzt das Fraunhofer-Team Bismut-Eisenoxid (BFO), ein ternäres Oxid (aus drei Elementen bestehend), dessen chemische Zusammensetzung von den Forschenden modifiziert wurde. Wie genau, bleibt Betriebsgeheimnis. Im Endergebnis führt es dazu, dass sich die Schaltgeschwindigkeit der BFO-Memristoren von Millisekunden auf Nanosekunden verkürzt und dass BFO-Memristoren analoge Datenverarbeitung und -speicherung an einem Ort ausführen können.

Die Chancen stehen also gut, dass Memristoren in einigen Jahren KI-Anwendungen und der Hardware-Verschlüsselung einen Fortschritt bescheren. Damit werden auch Anwendungen in der Gesundheitsbranche denkbar. Der Arzt oder die Ärztin mit Tablet in der Hand könnte die Blutwerte direkt am Krankenbett mithilfe des Memristor-getriebenen KI-Moduls analysieren und auswerten lassen. Diagnose und Patientendaten würden das Gerät verschlüsselt verlassen, bevor sie via WLAN auf den Klinikservern landen.

**Auch Privatanwender dürfen hoffen.** So könnten Programme wie Spracherkennung oder Übersetzung auf dem Smartphone, die heutzutage auf einem Cloud-Server abgearbeitet werden, direkt im Gerät erfolgen. Die wichtigste Neuerung ist aber sicherlich die Zertifizierbarkeit komplexer KI-Szenarien, etwa beim autonomen Fahren oder in der industriellen Produktion.

Stefan Schulz hat dabei die wirtschaftliche Entwicklung in Europa im Blick: »Der Memristor hat das Zeug, der Entwicklung von Künstlicher Intelligenz in ganz Europa einen Schub zu geben.« ■

»Damit lassen sich KI-Anwendungen zertifizieren – eine entscheidende Voraussetzung für den Praxiseinsatz.«

Prof. Heidemarie Schmidt

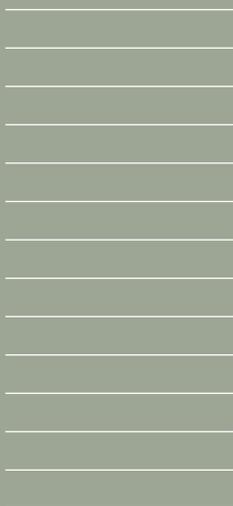
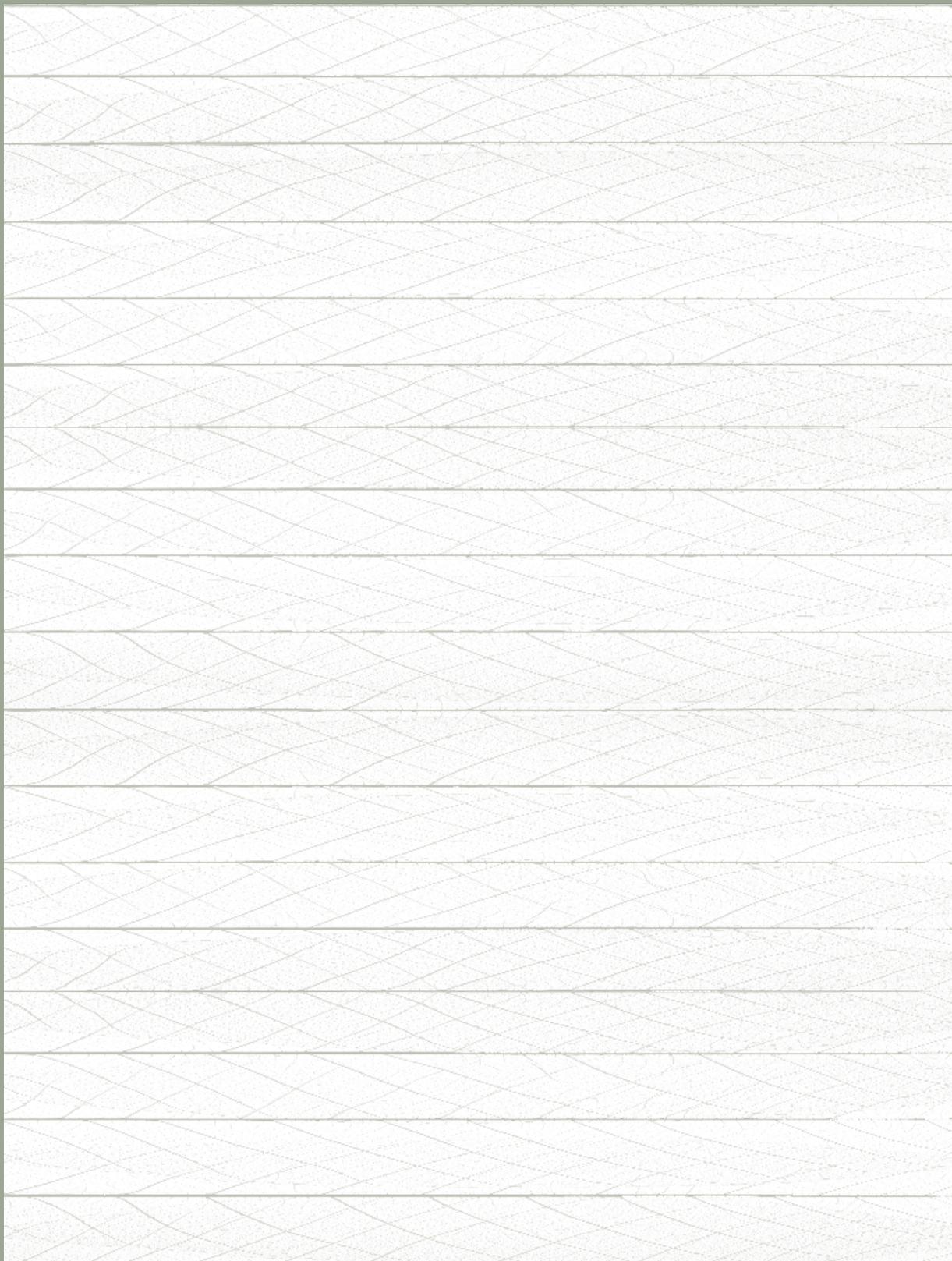
80%

**Veisch statt Fleisch:** Das Fraunhofer IVV hat die **Nasstextur** weiterentwickelt: Pflanzliches Proteinpulver wird durch einen Extruder gepresst. Danach kühlt sich die Masse ab, wobei sich die Proteine auffalten und vernetzen. Am Ende stehen Nuggets, Gulasch oder Schnitzel mit einem **Wasseranteil wie echtes Fleisch:** 60 bis

# Wende?

Bereit für eine

Nutzen Sie dieses Fraunhofer-Magazin nachhaltig – für Gedanken, Notizen, Bewahrenswertes.

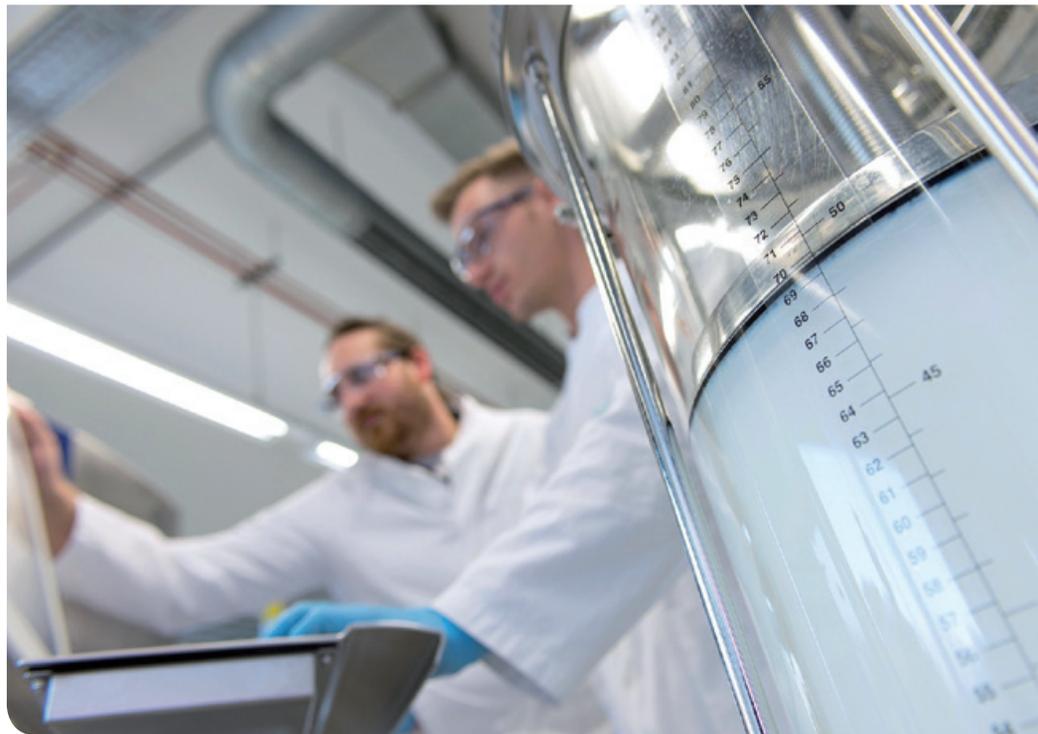


# Ausweg aus der Antibiotikakrise

Bakteriophagen infizieren Bakterien und töten sie ab. Schon vor 100 Jahren heilte man mit ihrer Hilfe schwere Infektionen. Jetzt erlebt die Phagentherapie eine Renaissance – im Kampf gegen multiresistente Bakterien.

Text: Christine Broll

Etwa 2 400 Todesopfer fordern antibiotikaresistente Erreger in Deutschland im Jahr. Das Fraunhofer ITEM forscht an Gegenmitteln. © Fraunhofer ITEM



Seit Holger Ziehr vor über zwanzig Jahren eine BBC-Dokumentation über die Phagentherapie sah, lässt ihn das Thema nicht mehr los. Seit dieser Zeit arbeitet er daran, Phagen für den Kampf gegen antibiotikaresistente Keime einzusetzen. Doch lange fand er nur wenig Mitstreiter. Forschungsanträge wurden belächelt und abgelehnt. Unternehmen winkten ab, als es darum ging, Prüfpräparate für klinische Studien herzustellen. Erst als immer mehr Bakterien gegen Antibiotika resistent wurden und Pharmafirmen die Suche nach neuen antibakteriellen Wirkstoffen einstellten, zahlte sich seine Beharrlichkeit aus.

Heute ist Prof. Holger Ziehr ein äußerst gefragter Experte für die Phagentherapie. Der Bereichsleiter am Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin ITEM in Braunschweig entwickelt eine Plattformtechnologie zur Produktion von pharmazeutisch einsetzbaren Phagen. Parallel

dazu etabliert er mit den Zulassungsbehörden einen Musterprozess, nach dem Phagen in Deutschland als therapeutischer Wirkstoff zugelassen werden können. Er sieht die Phagen als wichtigen neuen Baustein in der Therapie: »Wir wollen die Antibiotika nicht ersetzen. Phagen sollen dort zum Einsatz kommen, wo Antibiotika an ihre Grenzen stoßen.«

**Entdeckt wurde die Phagentherapie** schon vor den Antibiotika. Es war im Jahr 1917, als der franko-kanadische Mikrobiologe Félix d'Hérelle mit Erregern der Bakterienruhr arbeitete, die er bei erkrankten Soldaten isoliert hatte. Auf den Bakterienrasen, die er in Schalen züchtete, entdeckte er immer wieder kleine Löcher, die sich mit der Zeit ausbreiteten. Weitere Versuche zeigten, dass in den Löchern winzige Mikroben lebten, die die Bakterien auffraßen. Diese bislang unentdeckten Mikroben nannte er Bakteriophagen: Bakterienfresser. ▶

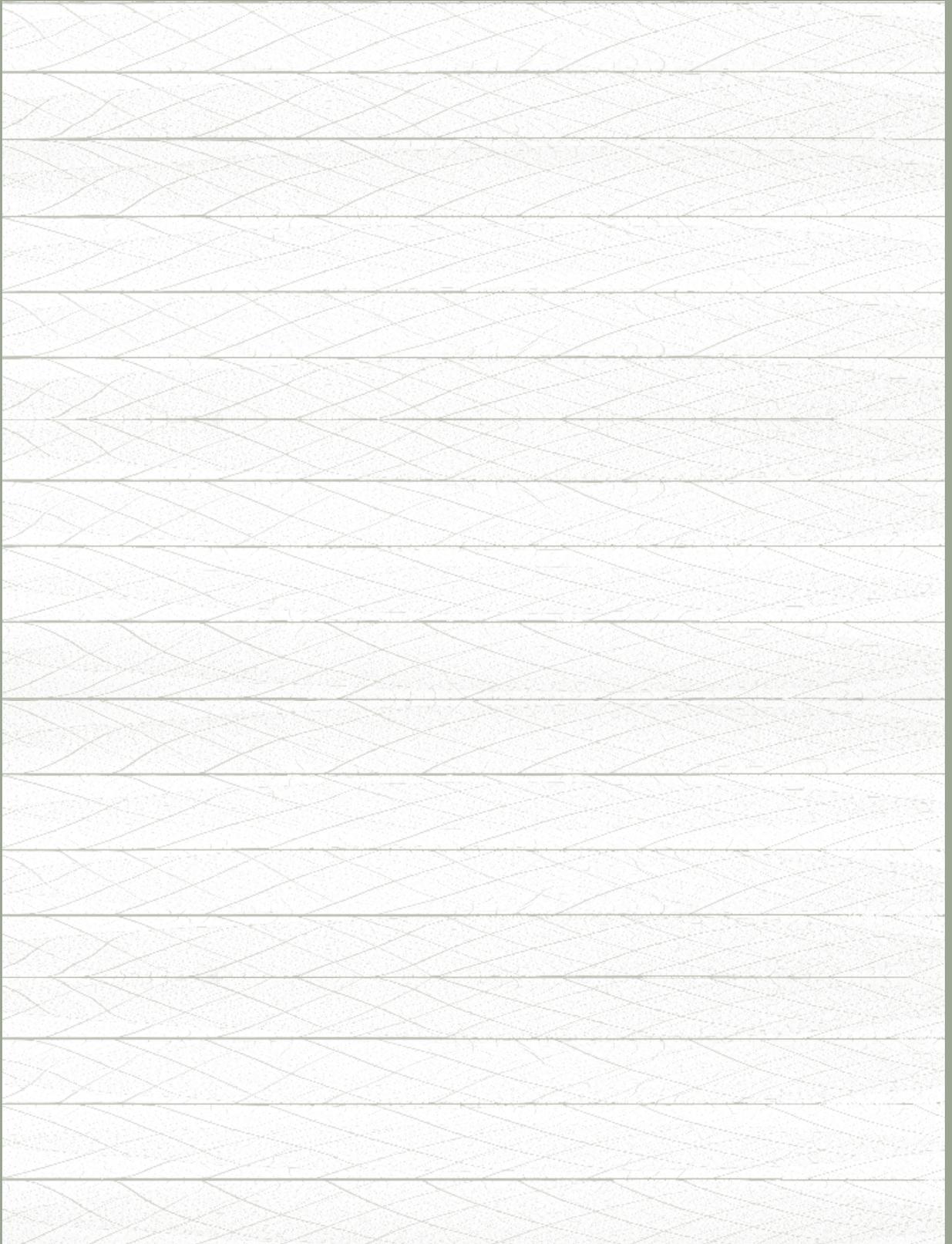
**30 000 bis 35 000 Menschen pro Jahr infizieren sich in Deutschland mit multi-resistenten Erregern.**

Nutzen Sie dieses  
Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig –  
für Gedanken, Notizen,  
Bewahrenswertes.

# Wenden

Bereit für eine

»Nachhaltigkeit  
bedeutet für mich:  
Die Menschheit  
sollte wieder  
lernen, mit der  
Natur zu leben  
und nicht gegen  
sie. Und sie sollte  
aufhören, die  
Welt mit ihren  
'Fuß'-Spuren zu  
bedecken.« Anita  
May, Gruppen-  
leiterin Fraun-  
hofer CBP



© Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Coliphagen, Leibniz-Institut DSMZ

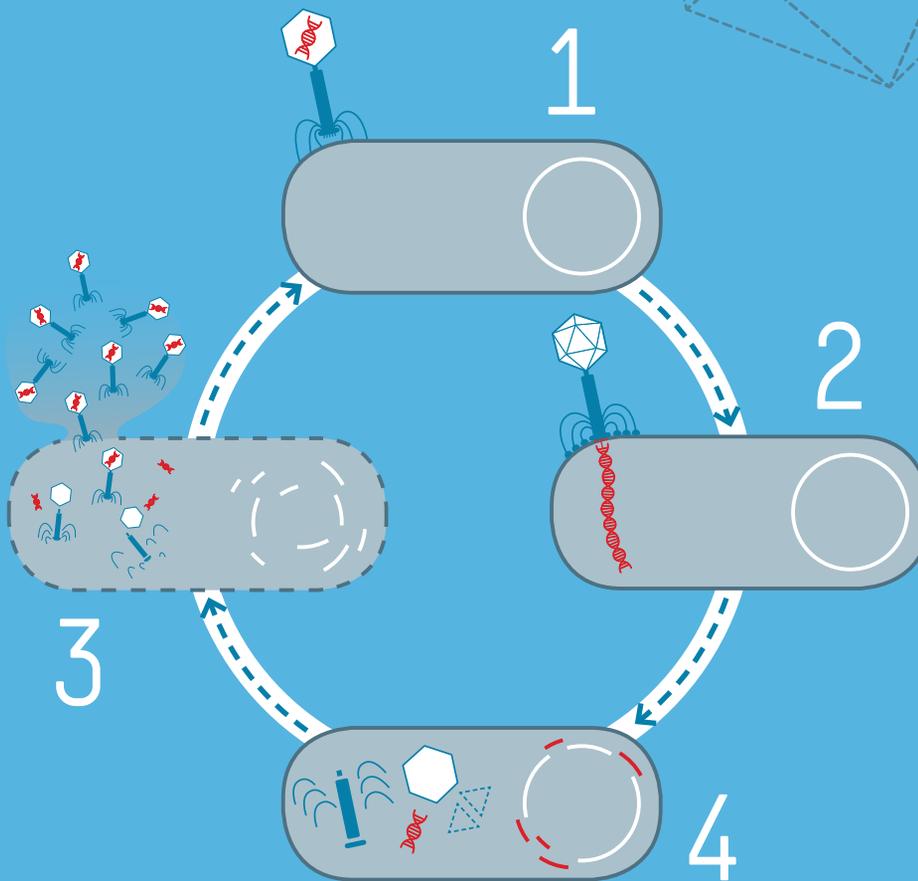
## Phagen

Bakteriophagen sind Viren, die ausschließlich Bakterien infizieren. Sie können sich nicht auf tierischen und menschlichen Zellen vermehren. Daher sind sie für den Menschen ungefährlich. Es gibt mehr Phagen auf der Erde als alle anderen Organismen zusammen. Phagen kommen überall dort vor, wo auch Bakterien leben, also auch in der menschlichen Darmflora und auf der Haut. Global gesehen tragen sie wesentlich zur Regulation des Bakterienvorkommens bei.

**Der Kopf eines Phagen** hat die Form eines Ikosaeders, einer Art Würfel mit 20 Flächen und 12 Ecken. Er enthält das genetische Material und sitzt auf einem langen Schwanz. Mit den Schwanzfasern, die die Form von Spinnenbeinen haben, heftet sich der Phage an seine Wirtszelle. Bakteriophagen können sich nicht selbst vermehren. Sie benutzen dafür Bakterienzellen. Jede Phagenart ist auf einen bestimmten Stamm von Bakterien spezialisiert.

Der Phage erkennt den geeigneten Wirt an speziellen Rezeptoren auf dessen Oberfläche. Die Bakterien-Rezeptoren und die Phagen-Schwanzfasern müssen wie Schlüssel und Schloss zusammenpassen, damit der Phage das Bakterium infizieren kann.

Nachdem sich der Phage an das Bakterium angeheftet hat (1), injiziert er das Erbgut aus seinem Kopf in die Zelle (2). Das Bakterium beginnt dann mit der Produktion von Phagenbestandteilen (3). Anschließend werden die Phagen zusammgebaut und freigesetzt (4). Aus einem Bakterium können 50 bis 100 neue Phagen entstehen.



Grafik © Vierthaler und Braun

► Bereits 1919 behandelte Félix d'Hérelle den ersten Ruhr-Patienten erfolgreich mit einer Phagenlösung. Gemeinsam mit seinem Freund Georgi Eliava gründete er 1936 in Tiflis/Georgien das Eliava-Institut für Phagenforschung, das zur Keimzelle für die Verbreitung der Phagentherapie in der Sowjetunion wurde. Im Zweiten Weltkrieg wurden die Soldaten der Roten Armee erfolgreich mit Phagen therapiert. Später verfeinerten sowjetische Forscher die Methoden immer weiter. Nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion geriet das alte Wissen über die Phagentherapie aber in Vergessenheit.

### Hilfe für Mukoviszidose-Patienten

Genau hundert Jahre nach Entdeckung der Bakteriophagen startete Holger Ziehr mit zwei Partnern das Projekt Phage4cure, das vom Bundesforschungsministerium gefördert wird. Ziel ist die Entwicklung eines auf Phagen basierenden Medikaments für Mukoviszidose-Patienten. Menschen mit

dieser genetischen Erkrankung haben in ihren Lungen einen zähen Schleim, der ein idealer Nährboden für Bakterien ist. Zu diesen Bakterien gehört auch *Pseudomonas aeruginosa*, das mittlerweile gegen die meisten Antibiotika resistent ist.

Die Phagen, die im Projekt verwendet werden, stammen aus der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen DSMZ in Braunschweig. In der Sammlung befinden sich auch viele Phagen, die für antibiotikaresistente Bakterien spezifisch sind. Isoliert wurden sie unter anderem aus Abwässern von Kliniken und kommunalen Kläranlagen.

**An mehr als 130 klinischen Proben** von Patienten testeten die Forschenden am Fraunhofer ITEM, welche Phagen am besten gegen die *Pseudomonas*-Bakterien wirken. »Es gibt keinen Breitband-Phagen, der alle *Pseudomonas*-Stämme abdeckt«, erklärt Holger Ziehr. »Daher haben wir einen Cocktail aus drei verschiedenen Phagen gemischt.« ►

Schon 1919 war die Phagentherapie erfolgreich – und wurde wieder vergessen.

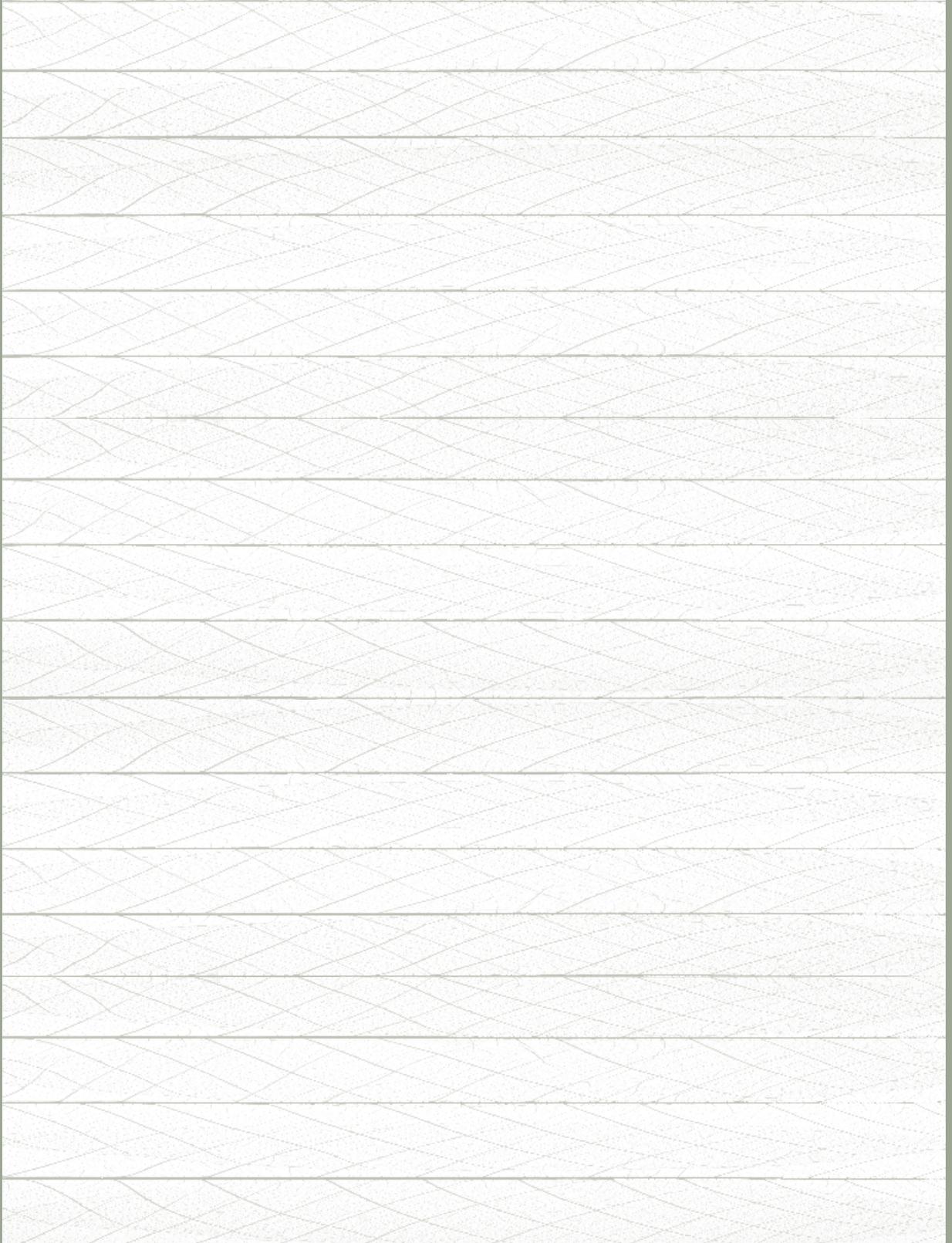
CO<sub>2</sub>

Wie wirkt sich mein  
Essverhalten auf  
Umwelt und Klima  
aus? In **Kantinen-**  
**Aktionswochen**  
gibt das Fraunhofer-  
Institut ISE den  
Mitarbeiterinnen  
und Mitarbeitern  
**tagtäglich Ant-**  
**worten:** Lebens-  
mittel-Siegel,  
Herkunftsort der  
Zutaten, **CO<sub>2</sub>-**  
**Fußabdruck der**  
**Mahlzeiten** – alles  
wird transparent.

# Wende?

Bereit für eine

Nutzen Sie dieses  
Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig –  
für Gedanken, Notizen,  
Bewahrenswertes.



In einer sterilen Anlage können die Phagen gleich im Fraunhofer ITEM abgefüllt und dann verschickt werden.  
© Fraunhofer ITEM



► Hergestellt werden die Phagen im zweiten Stock des Instituts. Hier ist das Reich von Dr. Sarah Wienecke, die für die Phagenproduktion verantwortlich ist. Wenn sie einen neuen Ansatz startet, legt sie einen flexiblen Einweg-Plastikbehälter auf einen beheizbaren Schütteltisch, füllt ihn mit zehn Litern klarer Nährlösung und gibt *Pseudomonas*-Bakterien eines ungefährlichen Produktionsstammes dazu. Unter sanftem Wiegen und angenehmer Wärme wachsen die Bakterien heran. Wenn die Nährlösung durch die gewachsenen Bakterien eine bestimmte Trübung erreicht hat, fügt Sarah Wienecke die Phagen hinzu.

Schon nach wenigen Stunden verschwindet die Trübung und die Nährlösung wird wieder klar. Die Phagen haben ganze Arbeit geleistet. Sie haben die Bakterien infiziert, sich in ihnen vermehrt und dann zum Platzen gebracht. Jetzt ist die gesamte Nährlösung voller Phagen. Dann filtert die Biotechnologin die groben Bestandteile ab und reinigt die Phagen mit weiteren biotechnologischen Standardmethoden. Für die Produktion der Phagen als Prüf-Arzneimittel gibt es am ITEM bereits Reinnräume mit entsprechenden Anlagen, in denen nach strengen Behördenauflagen produziert werden kann.

## Klinische Studien starten 2021

Dr. Sabine Wronski entwickelt dann aus den Phagen am Hauptsitz des Fraunhofer ITEM in Hannover ein Aerosol, das die Mukoviszidose-Patienten inhalieren können. Weitere präklinische Tests finden an der Berliner Charité statt, wo die Phagen an lebenden Lungengewebschnitten getestet werden, die aus menschlichen Lungenteilen, zum Beispiel nach einer Tumor-Operation, gewonnen wurden. In Berlin sind für 2021 auch die ersten klinischen Studien an der Charité Research Organisation vorgesehen – zuerst an gesunden Probanden und dann an Patienten.

Bei der Zulassung arbeitet das Phage4Cure-Team eng mit dem Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) zusammen und betritt damit regulatorisches Neuland. Denn es gibt noch keine speziellen Vorschriften für Therapeutika, die sich wie Phagen selbst vermehren können. Als Richtschnur für das Prozedere dienen die Anforderungen an biologische Arzneimittel, wie zum Beispiel therapeutischen Antikörpern. Die bei diesem Projekt entwickelten Qualitätsparameter können dann als Vorlage für die Zulassung weiterer Phagentherapeutika zu klinischen Prüfungen dienen.

## Phagentherapie als Kassenleistung?

Welchen Stellenwert die Phagentherapie mittlerweile hat, zeigt das Projekt PhagoFlow, bei dem es um die Behandlung von Wunden geht, die mit antibiotikaresistenten Keimen infiziert sind. Gefördert wird das Projekt vom Gemeinsamen Bundesausschuss (G-BA), dem Gremium, das über den Leistungsanspruch aller in Deutschland gesetzlich krankenversicherten Menschen rechtsverbindlich entscheidet. »Professor Josef Hecken, der Vorsitzende des Gemeinsamen Bundesausschusses, setzte sich persönlich für PhagoFlow ein«, betont Holger Ziehr. Das Projekt soll Hinweise darauf geben, ob und wie die Phagentherapie in den Leistungskatalog der gesetzlichen Krankenkassen übernommen werden könnte.

»Die Phagentherapie ist in Deutschland auf dem Weg zum Patienten – endlich!«

Prof. Holger Ziehr

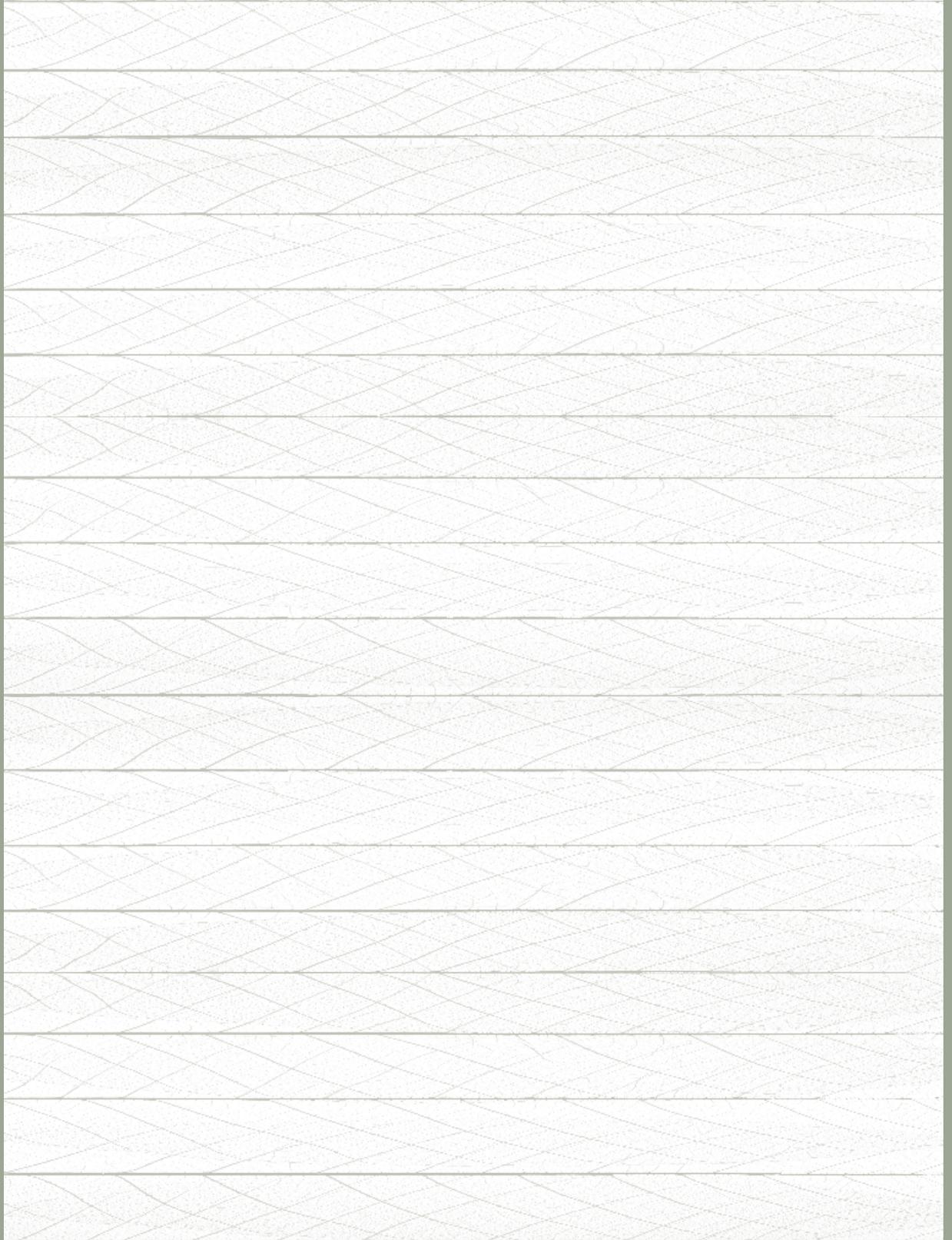
**Viele Patienten mit Schussverletzungen**, deren Wunden trotz Antibiotika nicht mehr heilen, werden im Bundeswehrkrankenhaus Berlin behandelt. Bei PhagoFlow arbeitet das ITEM mit den Militärärzten zusammen. Die Auswahl geeigneter Phagen übernimmt wieder die Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen. Das ITEM produziert die Phagen in größerem Maßstab und stellt sie der Apotheke des Bundeswehrkrankenhauses zur Verfügung. Die Apotheker wählen dann nach einer mikrobiologischen Analyse des Wundsekrets die für den jeweiligen Patienten passenden Phagen aus. Zur Behandlung wird der Phagen-Cocktail einfach in die nicht verheilende Wunde gegeben – genauso wie bei den Soldaten der Roten Armee vor über 70 Jahren –, nur sind die qualitativen Anforderungen an den Cocktail heute andere.

Nach den ersten Erfolgen in den öffentlich geförderten Projekten ist auch das Interesse der Industrie erwacht. Der erste Großauftrag mit einer Pharmafirma ist beim ITEM bereits unter Dach und Fach. Holger Ziehr freut sich sehr über die entstandene Dynamik: »Die Phagentherapie ist in Deutschland auf dem Weg zum Patienten – endlich.« ■

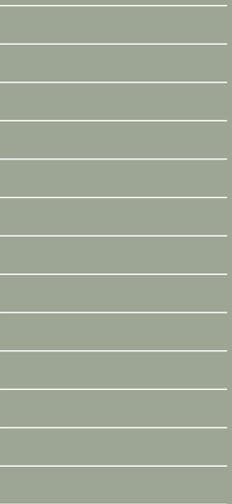
Nutzen Sie dieses  
Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig –  
für Gedanken, Notizen,  
Bewahrenswertes.

# Wenden

Bereit für eine



»Nachhaltigkeit  
bedeutet für  
mich, Ressourcen  
nicht zu ver-  
schwenden, aber  
verschwende-  
risch mit meiner  
Verantwortung  
für die Zukunft  
umzugehen.«  
Hartmut Pflaum,  
Fraunhofer  
UMSICHT

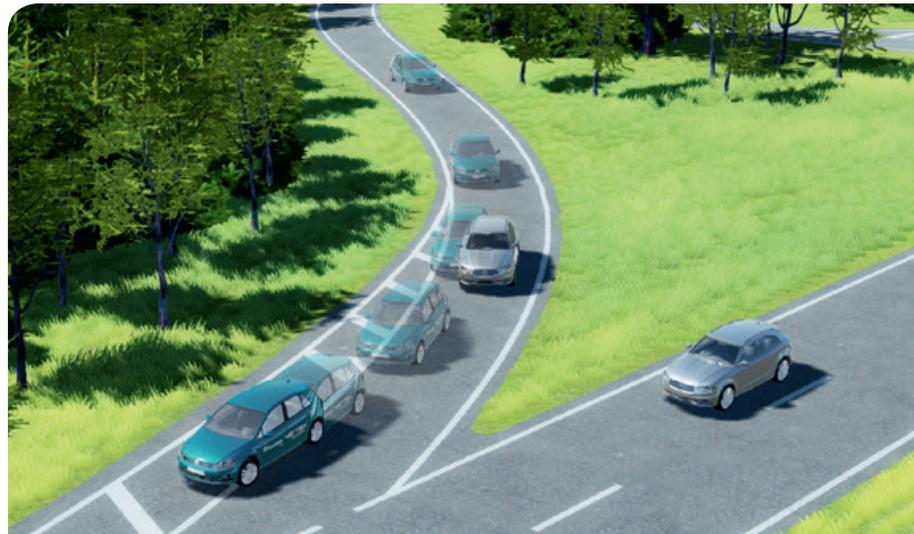


# Prüfstein Sicherheit

Tesla, Waymo und Uber haben selbstfahrende Autos schon über Millionen Kilometer steuern lassen. Risiken bleiben. Jetzt bietet Fraunhofer neue Lösungen im Wettrennen um intelligente Systeme fürs autonome Fahren.

Text: Eva Rathgeber

Fahrzenario mit der Simulationsplattform OCTANE.  
© Fraunhofer IOSB



Die Hälfte aller Autofahrer wünscht sich in den nächsten fünf Jahren ein selbstfahrendes Auto. So ergab es eine Studie des Gaggemini-Research-Institutes. Fast drei Viertel zweifeln jedoch, ob sie sich einem selbstfahrenden Auto wirklich anvertrauen können. Sicherheitsbedenken sind das große Problem beim autonomen Fahren – und können die große Chance werden für die deutsche Wirtschaft, sich gegenüber Hightechfirmen aus den USA und China doch noch durchzusetzen. Zuverlässigkeit gilt schließlich weltweit als Stärke der deutschen Ingenieurskunst. Die Fraunhofer-Gesellschaft arbeitet aktuell an einer Reihe von Lösungen für Sicherheit beim selbstfahrenden Auto.

**Das Wettrennen um die letzten 20 Prozent** des Weges hat aus Sicht von Prof. Mario Trapp gerade erst begonnen: »In der klassischen KI hinken wir den USA und China hinterher, aber in der Absicherung von KI sind wir in Deutschland führend«, sagt der Leiter des Fraunhofer-Instituts für Kognitive Systeme IKS in München.

Neben dem Schutz vor Cyberangriffen und der Ausfallsicherheit der Bordelektronik beispielsweise mithilfe von Redundanzen geht es den Herstellern vor allem darum, von Fahrzeugen verursachte Unfälle zu vermeiden. Die typischen Fehlerraten, wie sie bei klassischen Systemen im Auto akzeptiert werden, liegen bei der Kennzahl  $10^{-8}$ , das bedeutet, dass es erst bei 100 Millionen Betriebsstunden zu einem kritischen Fehler kommen darf. Ein Auto fährt ungefähr 200 bis 300 Stunden im Jahr – es dauert in der Regel also ziemlich lang, bis es zu einem Fehler kommt. Beim autonomen Fahren hingegen sind solche Werte längst nicht erreicht. »Unter guten Wetterbe-

dingungen und bei guten Verkehrssituationen können wir bereits super fahren. Wenn wir diese Erfahrungen aber auf die reale Welt mit zum Beispiel Regen, Sturm oder Schnee und schwierigen, unvorhergesehenen Verkehrssituationen übertragen wollen, stoßen wir derzeit noch auf große Hürden«, sagt Mario Trapp. In Expertenkreisen wird deshalb frühestens ab 2035 mit der Straßenzulassung der ersten vollautonomen Pkw gerechnet.

Hinzu kommt, dass an die KI eines intelligenten Autos sehr viel höhere Ansprüche gestellt werden müssen als an einen menschlichen Fahrer oder an andere KI-Systeme wie Sprachassistenten. Der Grund ist klar: Wenn ein Sprachassistent jemanden mehrmals falsch versteht, so ist das ärgerlich, wenn aber ein Auto einen Fahrradfahrer falsch klassifiziert, kann das tödlich enden. Konsens ist sogar, dass die KI eines autonomen Fahrzeugs in puncto Sicherheit mindestens um den Faktor 10 besser sein sollte als der durchschnittliche menschliche Fahrer. Angesichts der Tatsache, dass 90 Prozent aller Verkehrsunfälle auf menschlichem Versagen beruhen, hat KI also durchaus Potenzial, Straßen sicherer zu machen.

## Fünf Komponenten für ganzheitliche Sicherheit

Unter dem Schlagwort »Safe Intelligence« arbeitet das Fraunhofer IKS an Lösungen, um die Sicherheit von KI in autonomen Autos zu garantieren und nachzuweisen. Dabei geht es den Software-Ingenieuren darum, zwei an sich widersprüchliche Welten zu vereinen: den kreativen Gestaltungsfreiraum intelligenter Softwareentwicklung und die restriktivere Welt der Sicherheit. ▶

»In der Absicherung von KI sind wir in Deutschland führend.«

Prof. Mario Trapp

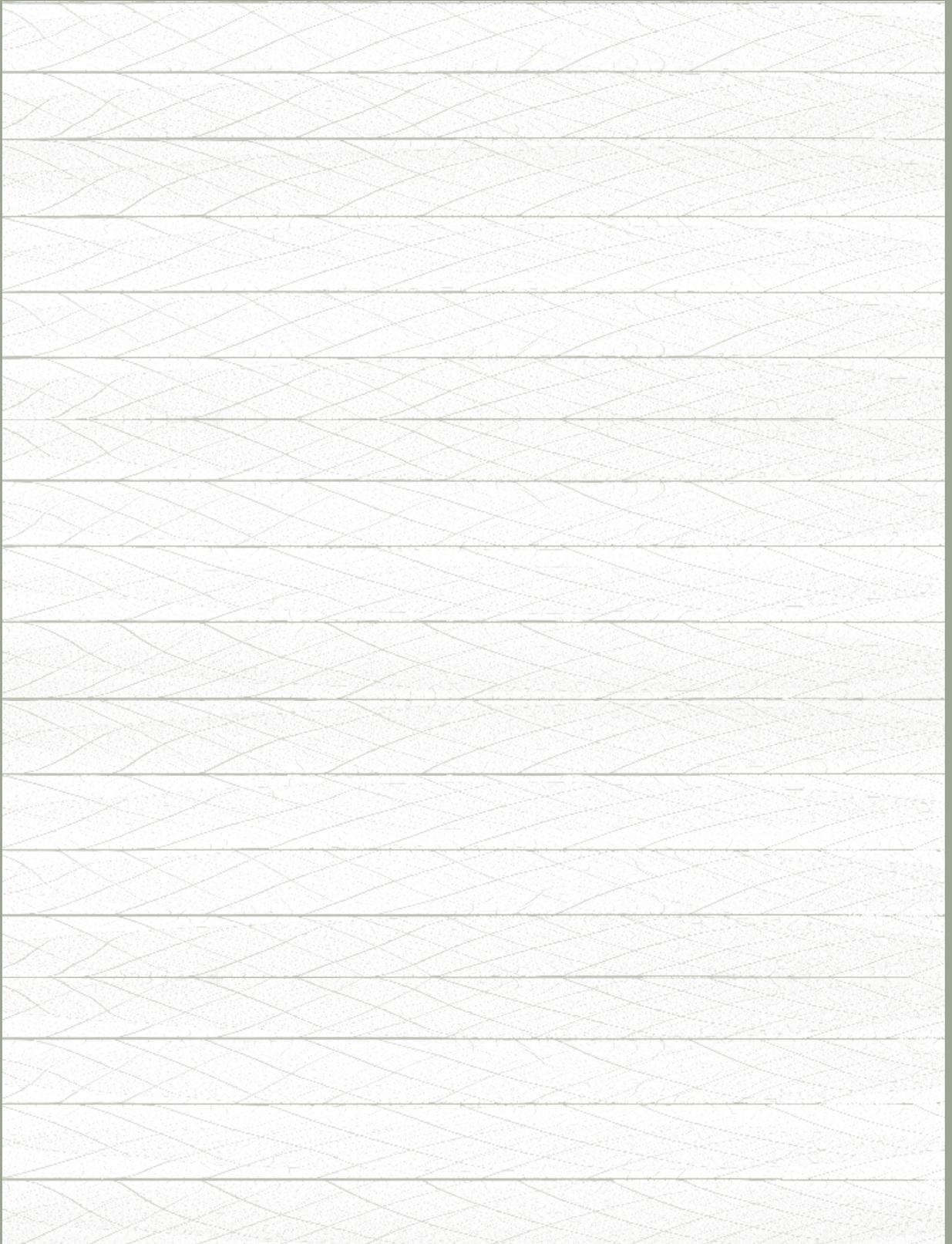
Nutzen Sie dieses  
Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig –  
für Gedanken, Notizen,  
Bewahrens Wertes.

# Wende?

Bereit für eine

10 000

**Insektenschutz** ist ein Anliegen mehrerer Initiativen. Beim Fraunhofer-UMSICHT haben Mitarbeitende eine Blumenwiese mit mehr als 35 verschiedenen **Blumen- und Gräserarten** angelegt. Bienen-völker beherbergen die Institute HHI und ICT. Auch das Dach der Fraunhofer-Zentrale in München ist Start- und Landplatz für Bienen, an die



► Ausgangspunkt dabei ist das sichere System und im Mittelpunkt steht die Frage: Wie viel KI kann da hinein? Im Fokus der Entwicklungsarbeiten stehen im Wesentlichen drei Aspekte: Erstens – es dürfen keine Menschen zu Schaden kommen. Zweitens – ein Auto, das in der Garage steht, nutzt niemandem. Das heißt: Ein Auto muss zuverlässig funktionieren und dabei sicher sein. Drittens – die Kosten müssen stimmen.

»KI lässt sich leichter für Funktionen einsetzen, die wir überwachen können, wie beispielsweise eingeschränkte Fahrtrouten im öffentlichen Personennahverkehr oder bestimmte selektive Bereiche wie der Verkehr auf Autobahnen oder der Güterverkehr von Lkw. Sobald es aber an Herausforderungen wie Fußgängererkennung geht, so kriegt das derzeit niemand abgesichert«, sagt Mario Trapp. Die Künstliche Intelligenz wird darauf trainiert, wie Personen aussehen. Es lässt sich nur bedingt nachvollziehen, was genau die KI dabei lernt. Dabei können Merkmale wie kurze oder lange Röcke und Hosen oder gelbe Regenjacken eine Rolle spielen. Es gibt aber eine Reihe gelber Objekte, hinter denen keine Menschen stecken – und es gibt Menschen, die die KI nicht erkennen wird. Auch wenn etwas im Weg steht und der Blick eingeschränkt ist, ist die Identifikation erschwert.

»Natürlich könnte man das System vorsichtiger auslegen und es in solchen Fällen immer sehr langsam fahren oder sogar eine Vollbremsung ausführen lassen, aber dann wird es zu vorsichtig und dann stimmen zwar die Sicherheitswerte, aber nicht die Zuverlässigkeit und nicht die Kosten«, betont Trapp. Als Antwort auf die aktuellen Ungewissheiten wurde am Fraunhofer IKS die sogenannte Vier-plus-eins-Sicherheitsarchitektur entwickelt. Dabei wird in fünf Richtungen gearbeitet: Auf der ersten Ebene geht es um die Weiterentwicklung von KI-Verfahren mit dem Ziel, der KI beizubringen, dass sie weiß, was sie nicht weiß, also ihre Unsicherheit selbst richtig erkennt. »Auf die derzeitigen Konfidenzwerte der KI kann man sich nicht verlassen, sie schätzt

sich selbst in der Regel viel zu positiv ein«, weiß Maximilian Henne, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IKS.

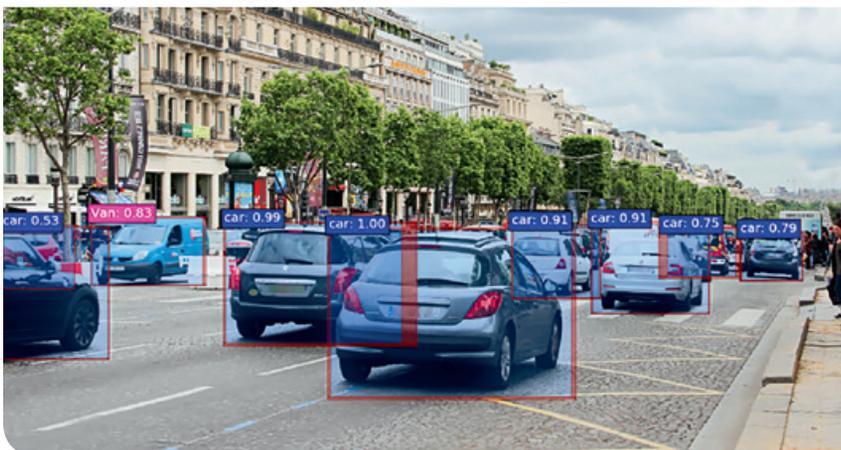
Eines dieser Verfahren heißt »Out of distribution detection« (außerhalb der Verteilung des Trainingsdatensatzes). Dabei bringt man der KI bei zu erkennen, wenn sich ein neues Beispiel konzeptionell stark von den Trainingsdaten unterscheidet, und lässt sie den Grad der Abweichung methodisch quantifizieren. Die zweite Ebene behandelt Fragen der Überwachung der KI als Blackbox. Hier werden spezielle Fehleranalysen durchgeführt. Ein dritter Baustein befasst sich mit Adaptive Safety Management: Hier wird an der Fähigkeit der KI gearbeitet, nicht nur das aktuelle Sicherheitsrisiko zu bewerten, sondern sich auch selbst daran anzupassen, sodass eine bestmögliche Leistung ohne eine Gefährdung der Sicherheit erreicht wird. Viertes Baustein ist das »Continuous Safety Management«: Über dieses lernt man systematisch aus Felderfahrungen, um nicht nur das Produkt schnell zu verbessern, sondern auch das nötige Wissen zur Absicherung kognitiver Systeme systematisch zu erweitern und dadurch die Safety-Prozesse zu verbessern.

»KI schätzt sich selbst in der Regel viel zu positiv ein. Auf die derzeitigen Konfidenzwerte kann man sich nicht verlassen.«

Maximilian Henne

## Nachweis über virtuelles Testen

Um die Marktreife ihrer selbstfahrenden Autos nachzuweisen, haben insbesondere US-amerikanische Unternehmen wie Waymo, Tesla und Uber bereits Millionen Testkilometer auf amerikanischen Straßen zurückgelegt. Experten sind sich jedoch einig, dass die hohe Anzahl weltweiter Testfahrten noch lange nicht ausreicht, um die Sicherheit autonomer Fahrzeuge zu garantieren. Außerdem ist hier der logistische und zeitliche Aufwand sehr hoch, zumal bei komplexen Systemen kleine Parameteränderungen kaum überschaubare Konsequenzen bewirken und neue Testfahrten notwendig machen können. Verschiedene Fraunhofer-Institute beschäftigen sich deshalb damit, den Sicherheitsnachweis auch auf Grundlage virtueller Simulation zu erbringen. ►



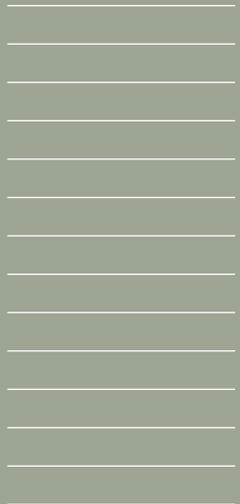
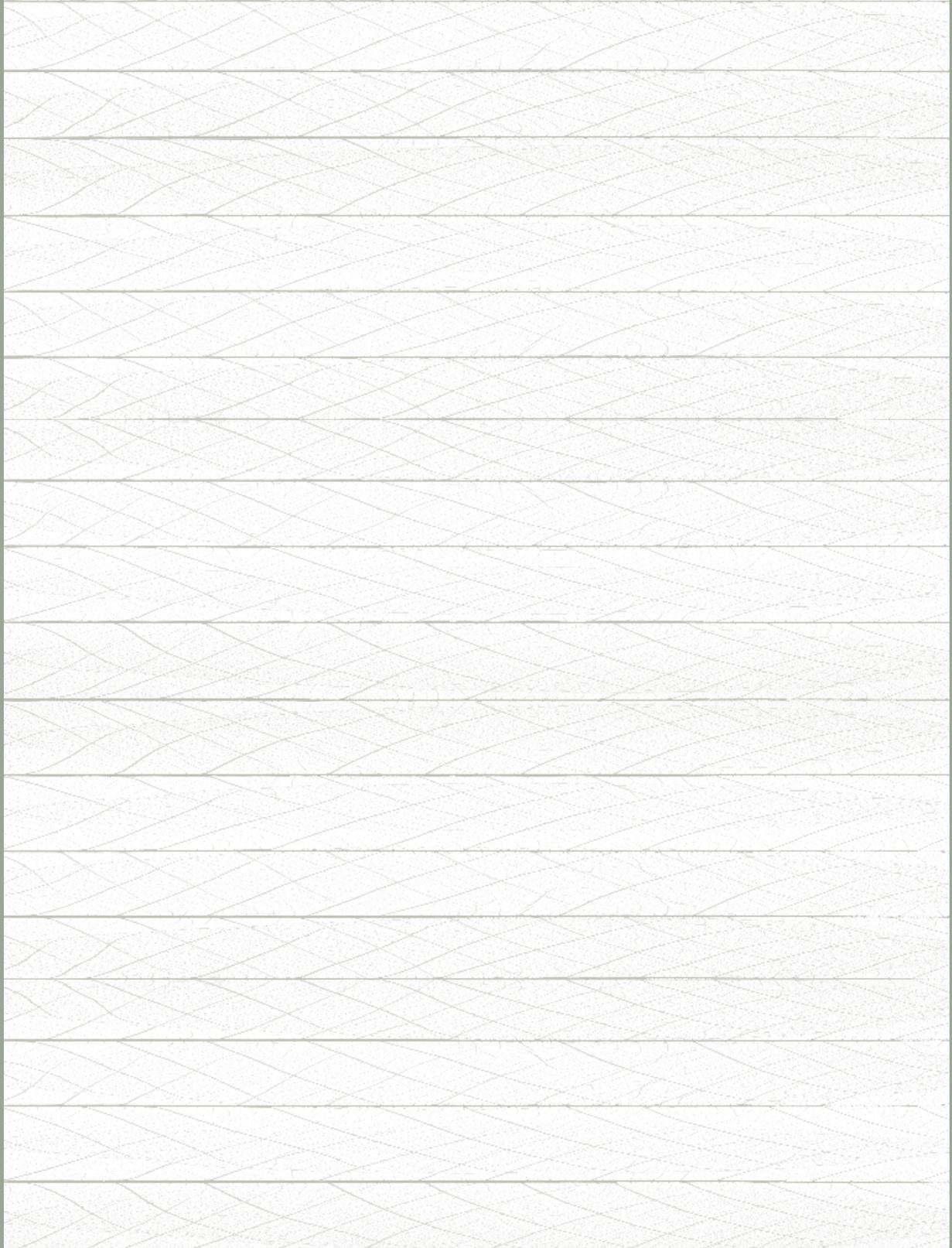
KI-basierte 2D-Objekterkennung mit Unsicherheitswerten. © Fraunhofer IKS

»Trägt Ihre tägliche Arbeit zu einer nachhaltigen Entwicklung bei?«  
Bei einer internen Fraunhofer-Umfrage antworten 20 Prozent »oft« und vier Prozent sogar »immer«. Fraunhofer-Beschäftigte arbeiten an der Nachhaltigkeit – Tag für Tag.

# Wende?

Bereit für eine

Nutzen Sie dieses Fraunhofer-Magazin nachhaltig – für Gedanken, Notizen, Bewahrenswertes.



► So entwickeln Forschende des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI im Projekt SePIA zusammen mit der TU Dresden und sächsischen Unternehmen eine komplexe Validierungsplattform für das hochautomatisierte Fahren, elektronische Teilsysteme und das Gesamtfahrzeug. Dazu werden Realfahrtszenarien mit flächendeckenden Unfalldaten und Informationen aus polizeilichen Unfallgutachten sowie aus Fahrzeug- und Videodaten herangezogen. »2019 gab es in Deutschland mehr als 2,7 Millionen Verkehrsunfälle; in die besonders schweren waren überwiegend Radfahrer, Fußgänger und motorisierte Zweiräder, wie beispielsweise Motorräder und Mopeds, involviert«, sagt Dr. Christian Erbsmehl, Leiter der Gruppe Fahrzeug- und Verkehrssicherheit am Fraunhofer IVI in Dresden. »Unser Ansatz ermöglicht es, reale Unfallsituationen virtuell nachzustellen und verschiedene Fahrzeugsicherheitssysteme auch im Zusammenspiel auf ihre Fähigkeit zu testen, den Crash mit weniger Geschwindigkeit zu vollziehen oder den Unfall ganz zu vermeiden«, so der Forscher. Als Bewertungsmethode dient eine virtuelle Simulation, die auf einem Szenarien-Katalog basiert. Die entwickelte Plattform wird in einer Hard- und Software-Anwendungsumgebung exemplarisch getestet und demonstriert.

Auch das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB forscht zusammen mit Industrieunternehmen seit mehreren Jahren in den Bereichen Fahrerassistenz bis hin zum vollautomatisierten Fahren. »Das gemeinsame Ziel ist es, eine definitive Aussage über das Sicherheitsniveau treffen zu können«, sagt Dr. Miriam Ruf vom Fraunhofer IOSB. Die Leiterin der Automotive-Forschungsgruppe sieht eine besondere Schwierigkeit darin, dass die Fahrzeugumgebung dynamisch ist und hier immer neue Bedingungen hinzukommen, eine neue Marke von E-Rollern, eine neue Lackierung oder eine neue Regenjackenkollektion. »Wir wissen auch nicht, wie sich die Menschen in Zukunft verhalten werden, wenn immer mehr KI auf den Straßen unterwegs sein wird«, so Ruf weiter. Die KI-Software autonomer Fahrzeuge müsste deshalb so konstruiert werden, dass sie sich auch nach der Markteinführung weiterentwickeln und an immer neue Situationen anpassen kann.

**Am Fraunhofer IOSB gibt es zwei Versuchsfahrzeuge,** denen die Forschenden automatisiertes Fahren beibringen. Im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg in Karlsruhe haben Unternehmen seit 2018 die Möglichkeit, ihre autonomen Fahrzeuge im realen Verkehr zu testen – das Fraunhofer IOSB übernimmt hier die Anonymisierung der Sensordaten und bietet sich als Anlaufstelle für Unternehmen und Öffentlichkeit an. Ein aktuelles Projekt ist die Simulationsplattform OCTANE, die in institutsübergreifender Kooperation entwickelt wird. Mit der Plattform lassen sich kritische Fahrsituationen virtuell simulieren und testen – auch schneller oder langsamer als in Echtzeit. Das Besondere des OCTANE-Konzepts ist nach Angaben von Ruf die Gestaltung als Open-Source-Plattform, deren Simulationsmodelle individuell auf

die jeweiligen Bedürfnisse der Nutzer hinsichtlich Rechenzeit, Ergebnisqualität und Bedienbarkeit angepasst werden können.

## Unüberwachtes Fahren funktioniert – in speziellen Situationen

Noch fehlt eine offizielle Definition der Sicherheitskriterien für autonomes Fahren. Sie ist aber die Voraussetzung, damit autonome Fahrzeuge auf dem Markt zugelassen werden können. »Für uns wäre der Worst Case, wenn die IT-Riesen die Standards setzen würden«, sagt Mario Trapp. »Sie bringen bekanntlich neue Software auf den Markt und finden dann schrittweise Fehler, um sie dann nach und nach zu verbessern. Aber für Autos geht das so nicht. Da ist der Gesetzgeber gefragt.«

**Viele Hersteller sehen das Hauptgeschäft** in Level 5, also im vollautomatisierten Fahren. Die Branche ist aber erst bei Level 2-3 angekommen, am Markt sind derzeit nur teil- oder hochautomatisierte Fahrzeuge zugelassen, bei denen der Fahrer das autonome System noch überwachen und/oder Fahrzeugfunktionen selbst übernehmen muss.

Zunächst wird man deshalb aus Expertensicht die vorhandene Erfahrung wohl eher dazu nutzen, um immer bessere Assistenzsysteme zu bauen und immer mehr Automatisierung in die Fahrzeuge hineinzubringen. In vielen anderen Einsatzbereichen für KI, zum Beispiel in der Medizin, ist immer noch ein Mensch da, der kontrolliert. Hinsichtlich selbstfahrender Autos weiß man allerdings, dass Menschen im Notfall gar nicht in der Lage wären, innerhalb weniger Sekunden das Steuer zu übernehmen, denn sie können den Kontext nach langer Ruhepause gar nicht so schnell erfassen.

In speziellen Fahrsituationen und unter bestimmten Bedingungen lässt sich heute schon KI-basiertes vollautonomes Fahren realisieren. Prof. Trapp: »Bei sehr eingeschränkten Funktionalitäten können wir heute schon die geforderten Fehlerraten erreichen.« ■

Displayanzeige eines VERTEX-Versuchsfahrzeugs des Fraunhofer IOSB: Solange der Mensch die automatisierte Fahrfunktion überwachen muss, ist klare Mensch-Maschine-Kommunikation eine sicherheitsrelevante Systemfunktion. © Fraunhofer IOSB



2,7 Millionen Verkehrsunfälle in Deutschland im Jahr 2019: »Unser Ansatz ermöglicht es, reale Unfallsituationen virtuell nachzuspielen.«

Dr. Christian Erbsmehl

# Wende?

Bereit für eine

Nutzen Sie dieses Fraunhofer-Magazin  
nachhaltig – für Gedanken, Notizen,  
Bewahrsweites.

Fraunhofer-Magazin weiter.vorn

100%

- Recyclingpapier
- klimaneutral
- aus verantwortungsvollen  
Quellen