

**BIOLOGISCHE TRANSFORMATION  
UND BIOÖKONOMIE**





» I THINK THE BIGGEST INNOVATIONS OF THE 21ST CENTURY WILL BE AT THE INTERSECTION OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY. A NEW ERA IS BEGINNING.«

Steve Jobs

»» ES GIBT KAUM EINEN  
BEREICH, IN DEM  
DIE BIOLOGISCHE  
TRANSFORMATION  
NICHT AUCH EIN TEIL  
UNSERER ZUKUNFT  
SEIN WIRD.«



---

#### Mit Biologisierung und Digitalisierung in die Zukunft!

---

Deutsche Produkte, Verfahren und Anlagen sind weltweit gefragt und wettbewerbsfähig. Die Fraunhofer-Gesellschaft als die führende anwendungsorientierte Forschungsorganisation trägt in vielen Bereichen der Technik zu diesem Erfolg bei. Die Bedeutung von Nachhaltigkeit hat hierbei eine immer wichtigere Rolle eingenommen. Die starke Zunahme der Erkenntnisse in den Biowissenschaften bietet heute zudem völlig neue Möglichkeiten, diese mit bestehenden Kompetenzen in den Bereichen Gesundheit, Ernährung, Energie – und insbesondere der Digitalisierung zu kombinieren und als Innovationsplattform zu nutzen.

Die in dieser Broschüre zusammengefassten Beispiele zeigen, dass die Fraunhofer-Gesellschaft sehr aktiv an Themen der Bioökonomie arbeitet und damit die Grundlage für den wirtschaftlichen Erfolg von morgen legt. Inspiriert werden die Forscherinnen und Forscher durch biologische Prinzipien und in der Natur etablierte stoffliche Kreislaufsysteme. Die entwickelten Produkte adressieren wichtige Herausforderungen unserer Zeit: schmackhafte und gesunde Lebensmittel ohne umweltbelastende Fleischproduktion, Stammzellen als Testsysteme, um Tierversuche zu ersetzen, extrem stabile und belastbare Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen durch Insekten, pflanzliche Nahrungsproduktion in der Stadt – um nur einige zu nennen.

Es gibt kaum einen Bereich, in dem die biologische Transformation nicht auch ein Teil unserer Zukunft sein wird. Ich wünsche den Akteuren in der Fraunhofer-Gesellschaft auch auf dem Gebiet der biologischen Transformation viel Erfolg.

Ihre

Prof. Dr. Wiltrud Treffenfeldt

DOW Europe, Chief Technology Officer Europe, Middle East, Africa & India  
Mitglied des Senats der Fraunhofer-Gesellschaft

## » FRAUNHOFER STELLT DEM DIGITALEN WANDEL EINEN BIOLOGISCHEN WANDEL AN DIE SEITE.«



Innovationen aus der Natur zu fördern, das hat hierzulande Tradition: In den 1990er-Jahren fördert die Bundesregierung die Biotechnologie als Schlüsseltechnologie. Mit einer unter deutscher Ratspräsidentschaft formulierten Roadmap begibt sich Europa im Jahr 2007 entschlossen auf die Reise in Richtung nachhaltiger Wirtschaft: »En Route to the Knowledge-based Bio-Economy«. Mit der »Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030« bringt die Bundesregierung die biobasierte Wirtschaft ins Zentrum der Hightech-Strategie.

Die Fraunhofer-Gesellschaft stellt nun dem digitalen Wandel (Vernetzung!) einen biologischen Wandel (Nachhaltigkeit!) an die Seite. Daraus entsteht das Konzept der biologischen Transformation – ein Prozess der zunehmenden Nutzung von Materialien, Strukturen und Prinzipien der belebten Natur in der Technik mit dem Ziel der nachhaltigen Wertschöpfung. Die biologische Transformation ist vielschichtig. Dazu gehört unter anderem die Substitution fossiler Grundstoffe durch nachwachsende Roh- und Reststoffe als wesentliche Säule einer Bioökonomie. Die Anwendung molekularbiologischer Erkenntnisse in der Entwicklung neuer (individueller) Therapien lassen sich ebenfalls darunter fassen. Auch für die Beherrschung von Komplexität sind Prinzipien der Natur nützlich, wenn etwa selbstorganisierte Produktionssysteme oder ganze digitale Ökosysteme entstehen sollen.

Dabei ist die biologische Transformation nicht nachhaltig per se. Sie muss einen Beitrag zu den Zielen der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung leisten. Aber Achtung! Die vorliegenden Beispiele sind nur grob sortiert, bunt und vielfältig – wie die Natur, die als Inspirationsquelle diene. Die Unvollständigkeit der Aufzählung – Beispiele wie ein Autoreifen aus Löwenzahn oder Butadien, fermentiert aus nachwachsenden Rohstoffen, fehlen! – ist Beleg für den Umfang und die Langfristigkeit des Engagements der Fraunhofer-Gesellschaft. So stellt die vorliegende Übersicht lediglich einen Anfang dar. Wir laden dazu ein, das Konzept der biologischen Transformation und dessen Systematik weiterzuentwickeln. Fortsetzung folgt.

Ihr

Dr. Patrick Dieckhoff  
Leiter Hauptstadtbüro der Fraunhofer-Gesellschaft  
Kordinator Biologische Transformation

# DIE BIOLOGISCHE TRANSFORMATION



Wer sich barfuß einem Ameisenhaufen nähert, sollte nicht zu lange stehen bleiben. Die Ameisensoldatinnen (ja, alle weiblich!) sind schnell. Kurzentschlossen verteidigen sie sich gegen den übermächtigen Beobachter. Die prompte Reaktion zeigt: Chaos herrscht im Ameisenhaufen nur scheinbar. Das Kollektiv der Sechsheiner hat seinen Staat im Griff. Nicht nur konzeptionell, auch mechanisch sind Ameisen uns Menschen oft voraus: Sie laufen kopfüber auf glatten Oberflächen. Auf ihren überfüllten Wegen gibt es keine Staus. Trotz ihrer immensen Zahl leben sie auf der ganzen Welt im Einklang mit der Natur. Der Mensch kann von der Natur lernen.

Es ist offensichtlich, die Bionik hat uns bereits Klett- und Reißverschlüsse gebracht, auch ultraglatte Oberflächen mit Lotoseffekt und Kameralinsen nach dem Modell eines Insektenauges. Die Natur inspiriert uns: Mehr als die Hälfte aller pharmazeutischen Wirkstoffe haben ihren Ursprung in der Natur. Dank der Biotechnologie haben Bakterien, Pilze und Pflanzen ihren festen Platz im Zentrum der chemischen Produktion. Drohnen werden nach dem Vorbild von Bienengehirnen gesteuert – die Nutzung von Materialien und Prinzipien der Natur ist auf dem Vormarsch. Aus der Vielzahl von Einzelbeispielen zeichnet sich ein erkennbarer Trend ab: die Konvergenz von Natur und Technik mit dem Ziel, nachhaltiges Wirtschaften zu ermöglichen. Experten sprechen von der biologischen Transformation. Die konsequente Anwendung und Kombination von Erkenntnissen der Lebenswissenschaften in allen Bereichen der Technik unterstützt die Ausbreitung nachhaltiger Wirtschaftssysteme wie der Bioökonomie.

Die biologische Transformation wird vom wachsenden Verständnis biologischer Prozesse und Prinzipien vorangetrieben. Diese Erkenntnisse konnten erst und bis heute zunehmend dank einer immer leistungsfähigeren Informationstechnologie gewonnen werden: Mit immensen Rechnerkapazitäten gelang die Entzifferung des menschlichen Genoms (und mittlerweile zahlreicher anderer Genome). Zunächst nur Buchstabensalat, erwuchs daraus die Möglichkeit, medizinische Therapien zu individualisieren und neue Diagnostika zu entwickeln. Die Analyse immenser Datenmengen erschloss unbekanntes globale Zusammenhänge. Dank GPS-gestützter Navigation können

Tierwanderungen auf dem Globus verfolgt werden. Die daraus gewonnenen Beobachtungen lassen Bezüge zwischen Lebensräumen erkennen, die zuvor als getrennt galten. Nicht immer bringen uns die Daten gute Nachrichten: Globale Studien zu Klimafolgen (Zahl der Bäume, Ausmaß von Gletschern, Wüsten etc.) zeigen das gesamte Ausmaß des Klimawandels und seiner Ausmaße auf den Wandel der Ökosysteme. Vom Großen zum ganz Kleinen geben computergesteuerte Mikroskope Aufschluss über kleinste Strukturen auf molekularer Ebene. So entstehen nanostrukturierte Wirk- und Werkstoffe. Simulationen »in silico« helfen, Tierversuche zu reduzieren. In der IT entstehen digitale Ökosysteme. Am Horizont erscheint DNA als hocheffizienter Datenspeicher oder neuronale Technikschnittstellen. Kurzum: Die digitale Transformation hat die biologische erst ermöglicht. Beide gehen Hand in Hand, sie verstärken sich gegenseitig.

Aus heutiger Situation sind drei Stufen der biologischen Transformation erkennbar. Sie sind zu verschiedenen Zeitpunkten entstanden, nutzen verschiedene Werkzeuge (Strukturen, Materialien, Prinzipien) und setzen sich bis in die Zukunft fort. Am Anfang stand die Bionik, die Abstraktion von Strukturen und Prozessen der Natur und deren Anwendung auf ein technisches Problem. Davon zeugt die Anmeldung des ersten deutschen Bionik-Patents im Jahr 1920: ein »neuartiger Streuer« nach dem Vorbild der Kapsel des samenstreuenden Schlafmohns. Das Lernen von der Natur macht hier nicht halt. Im Laufe der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts profitiert die Medizin von zahlreichen Diagnostika wie Blutzuckerteststreifen

oder Medikamenten wie Antibiotika, deren Wirkstoffe so oder ähnlich in Natur vorkommen. Der nächste Meilenstein in den 1970er-Jahren: Die beiden Pioniere Stanley Cohen und Herbert Boyer machen die Natur zum Produktionsgehilfen. Indem sie lernen, DNA in Zellen zu vermehren, erfinden sie die Biotechnologie. Technisches Wissen auf lebende Organismen anzuwenden ist ihr Wagnis. Heute werden verschiedenste Güter in biologischen Organismen produziert. Bakterien, Pilze und andere Mikroorganismen sind effiziente Produzenten von Vitaminen, Spezialchemikalien, Biotreibstoffen sowie humanisierten Implantaten. Moderne Waschmittel reinigen heute bei 30°C Waschttemperaturen so effektiv wie früher bei 90°C. Das spart Energie.

Die Anwendung biologischer Prinzipien hat tief greifende Veränderungen in so verschiedenen Wirtschaftsbereichen wie Pharmazie, Konsumgüter- und Nahrungsmittelherstellung oder auch in der Landwirtschaft hinterlassen. Für die Zukunft ist absehbar, dass sich die Entwicklung weiter fortsetzen wird. Biologie und IT wachsen zusammen. Dank Künstlicher Intelligenz oder maschinellem Lernen entstehen »soziale Maschinen«, Logistikkonzepte oder widerstandsfähige Produktionssysteme bis hin zu Maschinen, die sich selbst optimieren.

Komplementär zur digitalen Transformation, die vor allem eine Vernetzungs- und Effizienzstrategie ist, zielt die biologische Transformation auf die nachhaltige Entwicklung. Beide Agenden sind notwendige, aber keine hinreichenden Bedingungen. Sie müssen zusammen gedacht und fortgeführt werden. Anders als die Digitalisierung, die mittlerweile als schlichte Notwendigkeit angesehen wird, benötigt die biologische Transformation derzeit politische Unterstützung. Eine gute Matrix für den nachhaltigen Nutzen sind die zentralen Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals, SDGs), zu deren Erreichung die biologische Transformation beiträgt.

---

## Fazit

---

Die biologische Transformation speist sich aus den Erkenntnissen der Lebenswissenschaften. Deutschland ist führend im Bereich der Effizienz- und Umwelttechnologien. Mit dem Begriff Industrie 4.0 wurde hierzulande der Begriff für eine digital gestützte Vernetzungs- und Effizienzstrategie geschaffen, die im Kern keine Agenda zur Nachhaltigkeit ist. An diesem Punkt setzt die biologische Transformation an, die unter Nutzung von Materialien und Prinzipien der Natur, dem Menschen ein nachhaltiges Wirtschaften ermöglicht.

Dank einer umfassenden und stetigen Förderung hat Deutschland eine starke Position im Bereich der Lebenswissenschaften. Die biologische Transformation bezeichnet hier einen Prozess, der sich aus den verschiedensten Wissenschaftsdisziplinen speist und die Ausbreitung nachhaltiger Wirtschaftssysteme unterstützt, wie sie zum Beispiel die Bioökonomie darstellt. Die biologische Transformation ist damit ein Innovationsprozess, der die Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse und möglicherweise eines Systemwechsels beschreibt. Damit bildet er die Brücke zwischen Forschung und Wissenschaft und einem volkswirtschaftlichen System wie der Bioökonomie. Es handelt sich dabei um eine Querschnittsaufgabe für Wissenschaft, Politik und Gesellschaft.

Dr. Bernhard Aßmus, Dr. Isabella Wedl, Dr. Patrick Dieckhoff  
Fraunhofer-Gesellschaft, [www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)

# BEITRÄGE DER BIOLOGISCHEN TRANSFORMATION ZU DEN NACHHALTIGKEITZIELEN\* DER UN



## SDG 2

### Kein Hunger

Durch das Zusammenspiel technologiebasierter Ansätze (Smart Agriculture, moderne Pflanzenzüchtungstechnologien) mit biologischen Ansätzen (z. B. Mikrobiomforschung und Agrobiodiversität) lassen sich die Effizienz, Resilienz und Umweltverträglichkeit (reduzierter Stoffeintrag) der Landwirtschaft steigern. Die Erforschung alternativer Proteinquellen, etwa als Fleischersatz, ermöglicht zudem die Substitution von Treibhausgas-intensiven tierischen Produkten.

## SDG 3

### Gesundheit und Wohlergehen

Biopharmazeutika, regenerative Medizin, biofunktionalisierte Materialien in der Medizintechnik, Gewebeersatz und Mikrobiom-basierte Ansätze sind Beispiele für bioinspirierte Therapien und Diagnostika. Ein weiterer Effekt der biologischen Transformation liegt in der Substitution medizinischer Tierversuche durch die Entwicklung von zellbasierten Testsystemen. Maschinelles Lernen und fortgeschrittene Computersimulation erleichtern zudem das Verständnis komplexer biochemischer Vorgänge in Zellen und Organismen und beschleunigen das Finden medizinischer Wirkstoffe.

## SDG 6

### Sauberes Wasser und sanitäre Einrichtungen

Biologische Verfahren zur Abwasserreinigung sind bereits gut etabliert: Mikroorganismen helfen, die gelösten Schad- und Abfallstoffe im Abwasser abzubauen oder sogar in nutzbare Rohstoffe umzuwandeln. Biosensoren und molekulare Biotechnologie in der Umweltanalytik werden genutzt, um Schadstoffbelastungen im Wasser präzise zu detektieren, während bioelektrochemische Systeme und biomimetische Membrantechnologien eine energieeffiziente Wasseraufbereitung ermöglichen. Zu einer effizienteren Wassernutzung in der Landwirtschaft tragen präzise Bewässerungssysteme bei, die durch biologische Prinzipien inspiriert sind.

## SDG 7 und SDG 13

### Bezahlbare, saubere Energie und Klimaschutz

Die nachhaltige Nutzung von Biomasse oder ihrer Abbauprodukte im Rahmen einer Kaskadennutzung als Energieträger ermöglicht die Substitution fossiler Energieträger. Bioenergie kann – in regional unterschiedlichem Ausmaß – zu einem nachhaltigen Kraftstoff-, Wärme- und Stromerzeugungssystem beitragen. Zum anderen werden nach dem Vorbild von Pflanzen und Mikroorganismen katalytische Verfahren entwickelt, um aus Kohlendioxid als Rohstoff Basischemikalien herzustellen und so zu einer »Closed Carbon Cycle Economy« beizutragen.

## SDG 9

### Industrie, Innovation und Infrastruktur

Die Adaption biologischer Prinzipien kann wesentlich dazu beitragen, die Resilienz technologischer Systeme und Infrastrukturen zu erhöhen. Dies betrifft sowohl verwendete (Bau-)Materialien (etwa im Falle selbstreparierender Materialien) als auch ganze Infrastruktursysteme (z. B. im Bereich Mobilität oder Energieversorgung), die nach dem Vorbild resilienter Ökosysteme gestaltet werden könnten. Die Verwendung natürlicher Ressourcen ist zudem eine Voraussetzung, um die Industrieproduktion international aus der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zu lösen.

## SDG 12

### Nachhaltiger Konsum, nachhaltige Produktion

Die Substitution fossiler Ressourcen durch nachwachsende biologische Materialien und Chemikalien sowie die Organisation in geschlossenen Stoffkreisläufen leisten einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks der Wirtschaft. Über die Nutzung biologischer Prozesse und biomimetischer Ansätze können Produktionsprozesse effizienter und somit rohstoffschonender gestaltet werden. Die Nutzung biologischer Prinzipien (z. B. Schwarmintelligenz als digitaler Prozess) kann logistischen Aufwand und industrielle Konzentration an besonders belasteten Standorten reduzieren.

\* Sustainable Development Goals (SDGs).

## BIOLOGISCHE TRANSFORMATION – UMSETZUNG IN DER WIRTSCHAFT

Es ist anzunehmen, dass die biologische Transformation globale Handels- und Wertschöpfungsketten, Wirtschaftsbereiche, Industriestandorte und Arbeitsplätze beeinflussen und entstehen lassen wird. Die biologische Transformation gibt Impulse für eine Vielzahl von Sektoren durch neue Werkzeuge, neu nutzbare Materialien und Rohstoffe (CO<sub>2</sub>-Nutzung durch biotechnologische Methoden, Abfall- und Reststoffe), Produktionsweisen, Maschinen und Roboter oder digitaler Ökosysteme.

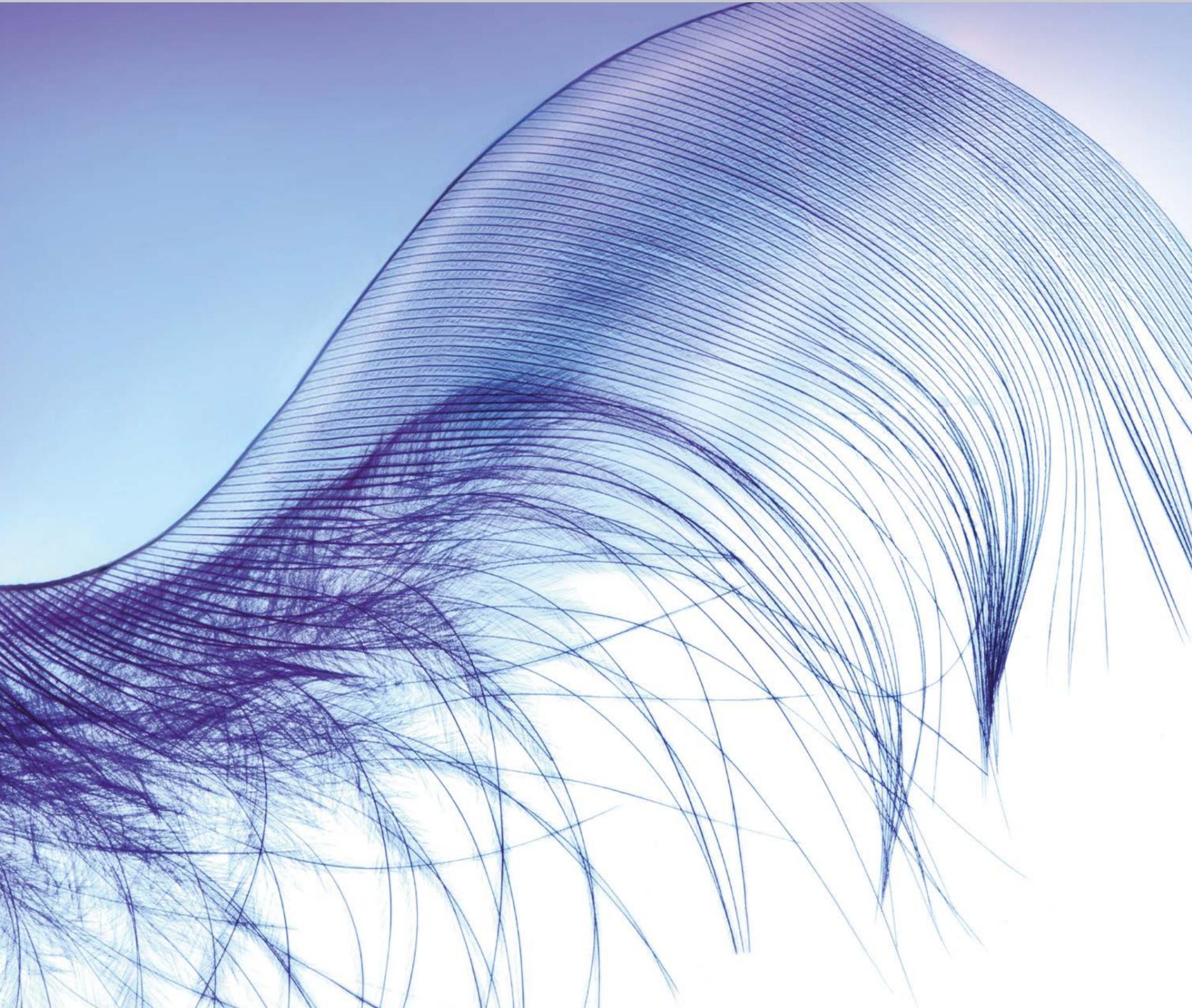
In der deutschen Volkswirtschaft kommt beispielsweise dem Maschinen- und Anlagenbau eine bedeutende Rolle als Diffusionsmotor zu. Er bestimmt Ausbreitungstiefe und -geschwindigkeit der biologischen Transformation. So definiert der Maschinenbau als wichtige Zuliefer-Branche Strukturen und Standards und damit Grundsteine der Anwendung biologischer Prinzipien. Beispielsweise wird der Übertragung biologischer Prinzipien wie Stoffkreisläufe, Redundanz und Resilienz auf technische Produktionssysteme ein bislang nicht ausgeschöpftes Potenzial zugemessen. Die Chemie- und Pharmaindustrie dürfen aufgrund der Anwendung biotechnologischer Produktionsprozesse und biologischer Therapien als fortgeschritten biologisch transformiert gelten. Es hat sich gezeigt, dass Unternehmen besonders erfolgreich waren, die es geschafft haben, sich Zugang zu (externem) spezialisiertem Know-how zu verschaffen. Kenntnisse und Erfahrungen in der Anwendung von

Organismen und dem Umgang mit biologischen Produkten haben sich als Schlüssel zum Markterfolg erwiesen. Der Zusammenarbeit von Unternehmen und Experten verschiedenster Fachrichtungen, Prozessen sowie dem Knüpfen (ungewöhnlicher) Allianzen sollte besonderes Augenmerk gelten. Aus der Bewältigung der im Zuge der Digitalisierung (Industrie 4.0) zunehmenden Komplexität von Produktionsprozessen bieten sich darüber hinaus neue Ansatzpunkte.

Die Realisierung der Potenziale des biologischen Transformationsprozesses bringt erhebliche Herausforderungen mit sich. Dazu zählen Kostenwettbewerbsfähigkeit (z. B. im Vergleich zu fossilen Produkten), die Vernetzung unterschiedlicher Sektoren, die Überwindung von Pfadabhängigkeiten sowie ein gesellschaftlicher Konsens über die zentralen Ziele der biologischen Transformation sowie politische und wirtschaftliche Handlungsbedarfe. Erhebliche Innovationsanstrengungen sowie unterstützende Begleitmaßnahmen sind notwendig, um sich bietende Marktchancen nutzen zu können. Dazu gehören Bedarfs- und Marktanalysen, Identifizierung von Geschäftsmodellen, Impact Assessments, Vernetzungsaktivitäten und gesellschaftliche Dialoge.

Dr. Sven Wydra, Dr. Thomas Reiss  
Fraunhofer ISI, [www.isi.fraunhofer.de](http://www.isi.fraunhofer.de)





---

### **Industrialisierung, Innovation, Infrastruktur – Produktionsprozesse, von der Natur inspiriert**

---

- 18 Komplexität und Gleichgewicht – digitale Ökosysteme
- 20 Ultraeffiziente Produktion in der Fabrik der Zukunft
- 22 Optimieren statt maximieren – der Abschied vom linearen Denken
- 24 Pharmawirkstoffe vom Feld – vom Acker in die Apotheke
- 26 Pilze als Produzenten – Wasch- und Reinigungsmittel aus dem Fermenter
- 28 Verbindung von Natur und Technik – biologisch-technische Schnittstellen
- 30 Alleskönner Alge – im Lichte einer nachhaltigen Chemikalienproduktion

---

### **Nachwachsende Ressourcen für Ernährungssicherung und Gesundheit**

---

- 34 Seide aus dem Labor – Hightech-Faser für die Medizintechnik
- 36 Geschmack ohne Reue – Pflanzeneiweiß für Nachhaltigkeit und Genuss
- 38 (R)Evolution in der Medizin – biologisierte Therapien und Implantate
- 40 Lokal, smart, urban – die Zukunft der Nahrungsmittelproduktion
- 42 Zellen und Stahl – automatisierte Zellproduktion
- 44 Aquakulturen – Teil einer nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion
- 46 Bioinspirierte Wundauflagen – heilen wie die Natur

---

### **Prinzip Kreislauf – nachhaltiger Konsum und Klimaschutz**

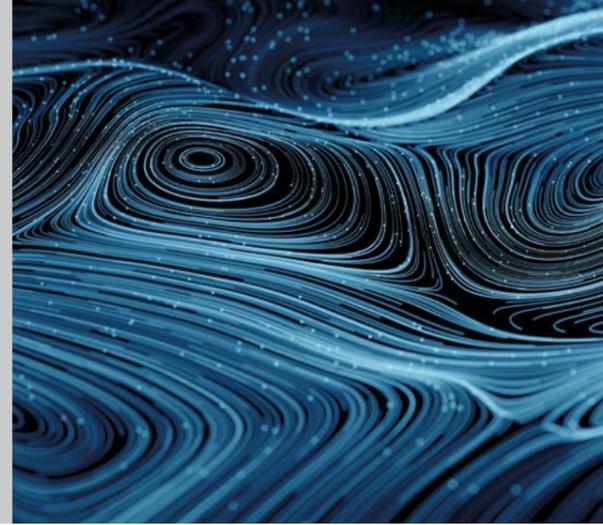
---

- 50 Fasern aus Früchten – Multitalente aus dem Biomüll
  - 52 Mehr aus weniger – Nährstoffmanagement in der Landwirtschaft
  - 54 Die Milch macht' s – Chemikalien aus Molke
  - 56 Zu schade für den Kamin – Holzreste als Rohstoffquelle
  - 60 Vom Klimakiller zum Rohstoff – CO<sub>2</sub> in der chemischen Produktion
  - 62 Treibstoffe aus alten Kleidern – die Möglichkeiten der Insektenbiotechnologie
  - 64 Lacke und Farben aus Pflanzenöl – Glanz für den nachhaltigen Konsum
- 66 Impressum



## **INDUSTRIALISIERUNG, INNOVATION, INFRASTRUKTUR – PRODUKTIONSPROZESSE, VON DER NATUR INSPIRIERT**

Die Verknappung von Rohstoffen, Flächenschwund und die essenzielle Pflege von gesellschaftlichen Gütern wie Luft, Wasser und Ökosystemen erfordern ein Umdenken in der industriellen Produktion. Wir werden uns daran gewöhnen müssen, Nahrungsmittel oder Pharmawirkstoffe von Hauswänden zu ernten, ohne Tierversuche auszukommen und ultraeffizient zu produzieren.



# KOMPLEXITÄT UND GLEICHGEWICHT – DIGITALE ÖKOSYSTEME

Das Eichhörnchen im Wald hat keine Alternative: Es muss mit seinen »Mitbewohnern« – sprich Vögeln, Hasen, Rehen und Co. – interagieren. Schließlich lebt es in einem natürlichen Ökosystem. Auch im gesellschaftlichen und industriellen Umfeld sind zunehmend Vernetzung und Interaktion gefragt, sei es in der Softwarebranche, dem Energiemarkt oder unseren Städten. Wie kann man solche digitalen Ökosysteme optimieren? Welche Anforderungen müssen sie erfüllen? Um diese und ähnliche Fragen rund um die digitalen Ökosysteme zu beantworten, überträgt man Ansätze aus den natürlichen Ökosystemen auf die künstlich geschaffenen Versionen.

Natürliches Ökosystem? Klar, tausendfach gehört. Das ist eine Lebensgemeinschaft von Organismen mehrerer Arten und ihrer unbelebten Umwelt. Egal ob Sumpfgelände, Wüste oder Meer: Die Wesen, die in einem solchen Ökosystem leben, interagieren miteinander – sie begegnen sich, helfen sich gegenseitig wie Bienen und Pflanzen, schmarotzen wie Misteln, fressen ihr »Gegenüber« bzw. werden gefressen. Was die Rahmenbedingungen in einem Ökosystem angeht, so können die Bewohner diese nur bedingt beeinflussen: Ein Ökosystem in einer Wüste bleibt trocken, das eines Sumpfgeländes feucht. Verweht es den Samen einer trockenheitsliebenden Wüstenpflanze in ein Sumpfgelände, so findet er dort ungeeignete Wachstumsbedingungen vor – und wird nicht keimen.

## Digitales Ökosystem? Eine Definition ...

So weit, so gut. Doch was verbirgt sich hinter dem Begriff »Digitales Ökosystem«? Digitale Ökosysteme sind heterogene Systeme aus interagierenden Akteuren und ihrer Umgebung, so die Definition. Beispiele dafür finden sich viele. Bei reinen Software-Ökosystemen etwa agieren IT-Systeme mit Menschen. Verschiedene Organisationen und Unternehmen tummeln sich auf dem Markt für Softwareentwicklung und Webservices – sie alle stehen über Netzwerke miteinander in Verbindung. Vielfach bildet eine Plattform wie der Apple App Store die Basis eines solchen Netzwerks, oder auch ein gemeinsamer Markt. Sind zusätzlich technische Systeme Akteure, so spricht man von »Smart Ecosystems«. Ebenso wie die Individuen eines natürlichen Ökosystems auch versuchen die

Akteure, bestimmte Ziele zu erreichen (siehe auch Bild rechts). Dazu sind sie auf die Interaktion mit anderen Akteuren des digitalen Ökosystems angewiesen, müssen jedoch auch vorgegebene, kaum beeinflussbare Rahmenbedingungen beachten.

## Beispiel Smart Grid

Ein Beispiel lässt diese Definition griffiger werden: Smart Grids. Diese Systeme helfen Haushalten dabei, überschüssige Energie – etwa aus Solarzellen – ins Netz abzugeben oder benötigte Energie aus dem Netz zu beziehen. Dabei gilt: Energie soll gewinnorientiert verkauft und günstig bezogen werden. Energieerzeuger können steuernd eingreifen, beispielsweise über die Preisgestaltung. Herrscht Flaute, liefern Windgeneratoren keine Energie. Der Energiepreis schnell in die Höhe und ermuntert die Haushalte, Energie ins Netz einzuspeisen oder zumindest wenig Energie zu verbrauchen. Allerdings sind auch diesem Einfluss aus Gründen der Netzstabilität Grenzen gesetzt: So kann über eine Hochspannungsleitung beispielsweise nur eine definierte Maximalenergie übertragen werden.

## Digitale Ökosysteme in der Wirtschaft

In der Wirtschaft spielen digitale Ökosysteme eine zunehmend große Rolle, denn Systeme, die ursprünglich einmal getrennt waren, werden nun vernetzt. So entstehen in vielen Anwendungsbereichen digitale Ökosysteme, sei es in der Produktion (Industrie 4.0), in der Medizin oder im Transportwesen. Die

|            | NATÜRLICHES ÖKOSYSTEM                       | DIGITALE ÖKOSYSTEME  |  |
|------------|---|--|--|
|            |   | Software Ökosystem   | Smart Ecosystem <sup>1</sup>   |
| Subjekte   | – Lebende Organismen                        | – Organisationen   | – Organisationen   |
| Objekte    |   | – IT-Systeme   | – IT-Systeme<br>– Technische Systeme   |
| Wert       | – Potenzial für überlebensfähigen Nachwuchs | – Potenzial, direkt und indirekt Geld zu verdienen und als Organisation zu überleben | – Potenzial, direkt und indirekt Geld zu verdienen und als Organisation zu überleben   |
| Ressourcen | – Organismen                                | – Arbeitskraft<br>– Kapital<br>– Daten<br>– Source Code (Software)                   | – Arbeitskraft<br>– Kapital<br>– Source Code (Software)<br>– Maschinen und andere physikalische Entitäten<br>– Daten (digitaler Zwilling von physikalischen Entitäten inkl.) |
| Umwelt     | – Physikalisch (Natur)                      | – Digital  | – Physikalisch (Natur und Technik)<br>– Digital  |

<sup>1</sup> »Smart Ecosystems« sind Software-Ökosysteme, die ehemalige Insellösungen in eine integrierte Gesamtlösung konvergieren lassen.

Herausforderungen zu beherrschen, die sich in puncto digitale Ökosysteme stellen, ist daher elementar für viele Wirtschafts- und Lebensbereiche. Insbesondere die Interdisziplinarität ist alles andere als einfach zu meistern. So reichen klassische Softwareentwicklungsmethoden oder Konstruktionsverfahren des Maschinenbaus allein nicht mehr aus, vielmehr benötigt man Entwicklungsmethoden für Gesamtsysteme. Aber auch die Fragestellungen sind umfassender. So muss die Sicherheitsbewertung in digitalen Ökosystemen betrachten, wie Security, Safety und Privacy miteinander wechselwirken. Dazu kommt: Viele Fragen können nicht mehr in der Entwicklung, sondern erst in der Laufzeit beantwortet werden, etwa weil die Systeme sich autonom verändern.

## Ansätze aus der Natur übertragen: Vom Ameisenhaufen bis zur Schwarmintelligenz

Um die digitalen Ökosysteme besser verstehen und optimieren zu können, überträgt man Prinzipien der natürlichen Ökosysteme auf die technischen – sie werden so biologisch transformiert. Was das im Alltag heißt, verdeutlichen zwei Forschungs-

beispiele am Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE. Hier schalten die Forschenden zahlreiche IT-Systeme zusammen – sie sollen gemeinsam einen größeren Nutzen bringen als die Summe der einzelnen Komponenten und Geschäftsprozesse auf diese Weise optimieren. Dies ist ähnlich einem Ameisenhaufen: Auch hier liegt die gemeinsame Schaffenskraft deutlich über dem, was die einzelnen Ameisen zusammengenommen schaffen würden. Ein weiteres Projektbeispiel ist der Einsatz von Crowdsourcing: Welche Anforderungen werden an ein digitales Ökosystem gestellt? Hierbei soll die Intelligenz aller Beteiligten einfließen, um das Ökosystem optimal zu gestalten. Eine solche »Schwarmintelligenz« kann jedoch ebenso förderlich wie schädlich sein, ihre Auswirkungen auf die digitale Welt müssen daher erforscht und adaptiert werden. Digitale Ökosysteme werfen viele schwierig zu beantwortende Fragestellungen auf. Dennoch lohnt es sich, sie besser zu verstehen: Denn die Ergebnisse lassen sich vielfältig nutzen.

Prof. Peter Liggesmeyer, Dr. Jörg Dörr  
Fraunhofer IESE, [www.iese.fraunhofer.de](http://www.iese.fraunhofer.de)



## ULTRAEFFIZIENTE PRODUKTION IN DER FABRIK DER ZUKUNFT

In vielen Regionen der Welt verschärft sich der Wettbewerb um Flächen zur Produktion von Nahrungsmitteln, zum Wohnen, Leben und Arbeiten. Gleichzeitig werden auch viele Rohstoffe knapper – seien sie biotisch oder abiotisch. Beide Trends erfordern ein neues Denken in der industriellen Produktion. Die Ultraeffizienzfabrik – ein Ansatz aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA – dient in diesem Umfeld als Leitbild für die Produktion der Zukunft. Das Ziel: Eine lokale, verlustfreie Produktion in lebenswerter Umgebung – sprich mit so wenig Material und Energie wie nötig – effektiv zu produzieren. Material und Energie fließen hier im Kreis und dienen immer wieder als Ausgangspunkt der Produktion.

Die anpassungsfähige, emissionsfreie Fabrik der Zukunft sichert ein intaktes ökologisches und soziales Umfeld, integriert in die urbane Umgebung. Neben der zunehmenden Digitalisierung stellt die biologische Transformation eine wesentliche Voraussetzung hierfür dar. Ziel ist zudem, den Anteil biobasierter, lokal verfügbarer Werkstoffe und Materialien zu erhöhen. Gelingen soll dies durch die Anwendung bionischer Prinzipien bei der Produktgestaltung, genauer gesagt durch bionische Strukturen, Funktionen und Oberflächen sowie innovative Fertigungstechnologien – beispielsweise additive Verfahren oder selektive Beschichtungstechnologien mit biogenen Materialkomponenten. Das Ergebnis: Der Transportaufwand sinkt, die Materialeffizienz und die Resilienz gegenüber Turbulenzen in der global verteilten Wertschöpfungskette steigen.

### Aus Verbrauch wird Nutzung

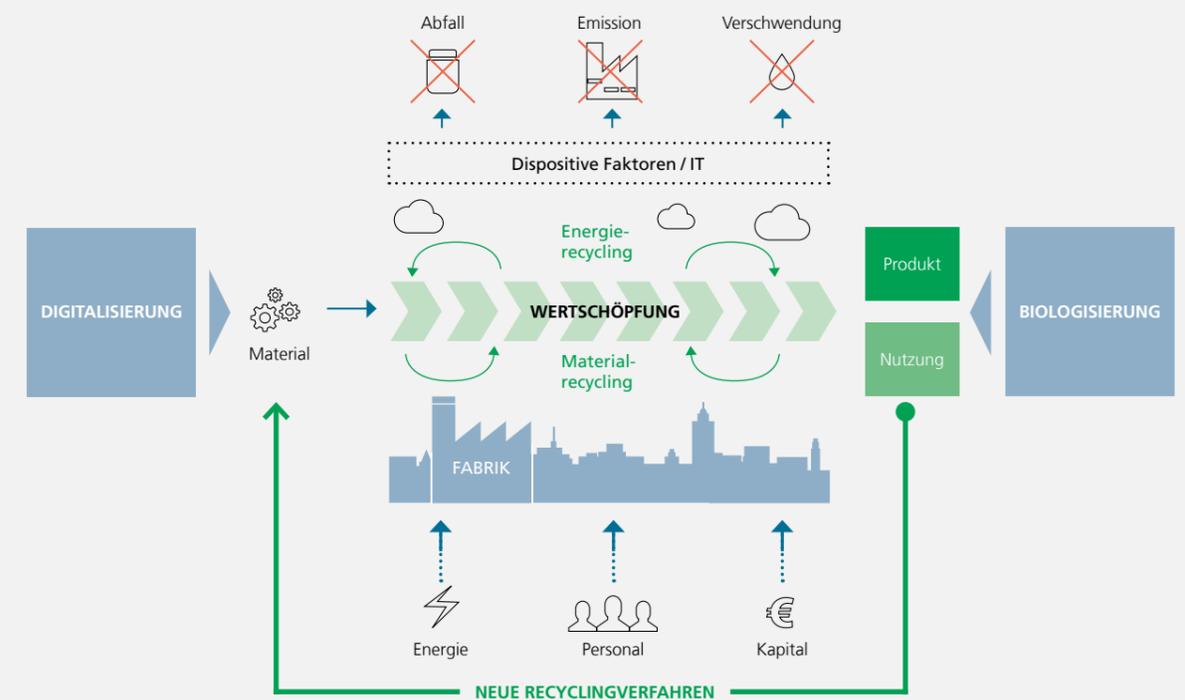
Das vom Fraunhofer IPA erarbeitete Konzept der »ultraeffizienten Fabrik« ist Bestandteil eines Energiesystems, das wesentlich auf erneuerbaren, fluktuierenden Energien beruht. Daher steht hier neben einer Maximierung der Energieeffizienz auch ein möglichst hohes Maß an Energieflexibilität im Fokus. Neben dem Energiebezug aus den klassischen Verteilnetzen ist es das Ziel, die lokale Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung an die örtlichen geographischen und stofflichen Gegebenheiten anzupassen. Eine Rolle spielt hierbei zukünftig einerseits die energetische Nutzung regionaler biologischer Reststoffe – also Biogas oder Kondensatoren-Brennstoff-

zellen-Kombination auf biologischer Basis –, andererseits auch die dezentrale biobasierte Energieversorgung durch Bakterien oder Photosynthese auf Kleinleistungsebene, beispielweise zur Energieversorgung dezentraler Sensoren. Die ultraeffiziente Fabrik betrachtet darüber hinaus den Menschen als wesentlichen Bestandteil. Technische und organisatorische Maßnahmen, die im Wesentlichen auf bionischen Prinzipien beruhen, berücksichtigen die biologischen Bedürfnisse der Menschen auf optimale Weise. Auch die Physiologie und Gesunderhaltung der Mitarbeiter wird dabei einbezogen. Neuartige Ansätze verwenden Algorithmen, die auf natürlichen Prozessen beruhen – etwa die Schwarmintelligenz, Evolutionsalgorithmen oder auch Neuronale Netze – und optimieren somit die Organisation von Produktionssystemen. Zur Reduzierung von Emissionen und Abfällen werden neben prozessintegrierten biobasierten Ansätzen auch sogenannte End-of-Pipe-Lösungen verfolgt, um die Belastung der Umwelt zu minimieren. Hierzu zählen beispielsweise biologische Filtermechanismen in Form von Bakterien, Pflanzen oder auch die aktive Nutzung von Abfällen und Emissionen in intelligenten Dachgewächshäusern. Die Produktions-»Abfälle« werden in Bioraffinerien wiederverwendet.

### Bessere Umweltwirkung und neue Kommunikationssysteme

Bereits heute verbessern einige dieser Technologien die Umwelt- und Klimawirkung erheblich, beispielsweise in der

### Ultraeffizienzfabrik – die Produktion der Zukunft



Nahrungsmittelherstellung und Prozessindustrie. Für eine flächendeckende Integration in das verarbeitende Gewerbe sind die bestehenden Technologien jedoch noch weiter zu überprüfen und anzupassen. Eine biobasierte Führung von Stoffkreisläufen ermöglicht es zudem, Lösungen zur Bindung potenziell gefährlicher Substanzen zu entwickeln – etwa im Sinne einer organischen Abfallnutzung oder der Einsatz von CO<sub>2</sub> als Rohstoff.

Massives Potenzial weist darüber hinaus das Verschmelzen von Nano- und Biotechnologie im Produktionsumfeld auf. Das Ziel: Biologische oder biobasierte Materie soll mit technischen Komponenten kommunizieren. Auf dieser Basis ist die Entwicklung eines smarten Kommunikationssystems denkbar, welches

beispielsweise die Interaktion zwischen Industrie-4.0-fähigen Fertigungstechnologien und Recyclaten – also wiederverwertbaren Kunststoffen – ermöglicht. Wichtig ist dies vor allem im Umgang mit Recyclaten, bei denen die chemische Zusammensetzung unklar ist und die daher nur schwer wiederverwendet werden können. Im Konzept der Ultraeffizienzfabrik steht die Produktion in einem symbiotischen Verhältnis zu ihrer Umgebung. Das heißt: Arbeitswege, Wegzeiten und Umweltwirkung werden reduziert, zudem integriert sich die Fabrik ästhetisch in das städtische Umfeld.

Prof. Alexander Sauer, Robert Mieke  
Fraunhofer IPA, [www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)



## OPTIMIEREN STATT MAXIMIEREN – DER ABSCHIED VOM LINEAREN DENKEN

Biologische Transformation und Digitalisierung bedingen einander. Sie können als konvergierende und sich gegenseitig verstärkende Prozesse verstanden werden, die das menschliche Wirken in seinem Kern und in allen Bereichen der Nachhaltigkeit verändern. Denn die biologische Transformation bringt ein neues Denken mit sich: Vernetzung statt Linearität, Optimierung statt Maximierung. Kurzum: Gehen biologische Transformation und Digitalisierung Hand in Hand, entsteht im aristotelischen Verständnis ein Ganzes, das mehr ist als die Summe seiner Teile.

Lineares Denken und einseitige Ergebnismaximierung des menschlichen Wirkens gefährden die Ökosysteme unseres Planeten. Betrachtet man die globalen Auswirkungen des menschlichen Handelns – die sich im Wesentlichen auf Umwelt und Natur beziehen –, wird deutlich: Viele grundlegende, überregionale bis weltweite Probleme sind menschengemacht. Durch lineares Denken und einseitige Output-Optimierung hat der Mensch massive Klimaveränderungen ausgelöst, die seine eigene Lebensgrundlage bedrohen. Auch der Anstieg von Zivilisationskrankheiten, der Ausbruch von Seuchen und das globale Artensterben sind das Ergebnis eines linearen statt eines vernetzten Denkens.

### Einseitige Optimierung schafft zahlreiche Probleme

Beispiele für eine solch einseitige Optimierung gibt es viele. So etwa in der Landwirtschaft: Indem versucht wird, den landwirtschaftlichen Ertrag zu maximieren, werden fruchtbare Böden vernichtet – durch einseitige Ertragssteigerungen und Übernutzung in Monokulturen. Die Biodiversität geht drastisch zurück, Trinkwasser wird knapper, da es aus nicht regenerierbaren Quellen entnommen oder mit Nitraten kontaminiert wird. Übermäßige Tierhaltung führt zur Emission von Treibhausgasen, neue landwirtschaftliche Nutzflächen werden

aufgebrochen. Ein weiteres Beispiel liegt in der Maximierung der Produktion und des Konsums. Sie schädigt das Klima, verunreinigt die Luft durch schädliche Emissionen wie Kohlendioxid, Feinstaub, Stickoxide etc., führt zu Verschmutzung, Überfischung, Übersäuerung der Weltmeere. Palmölplantagen, Biotreibstoffe und Co. führen zum Raubbau am weltweiten Waldbestand. Auch übermäßige Tierhaltung und Fleischkonsum bedrohen das Klima. Städtebau und Megacities tun ihr Übriges. Hier werden nicht erneuerbare Ressourcen wie Sand und Metalle verbraucht, Flächen versiegelt und Ökosysteme wie Moore und Sümpfe vernichtet.

Werfen wir einen Blick auf weite Teile der Menschheitsgeschichte, so reichte lineares Denken zumeist aus, die Komplexität war überschaubar. Überregionale Folgen waren selten oder wurden nicht als solche erkannt – der Einfluss des Menschen auf seine Umwelt war zu gering. Allerdings finden Historiker auch hier immer mehr Gegenbeispiele: Beispielsweise die Tötung der riesigen Urrindherden mit nachfolgender Verwaldung offener Weideflächen. Oder die Entwaldung des Mittelmeerraums durch die Römer, die eine überregionale Klimaveränderung nach sich zog. Die Einflüsse der heutigen menschlichen Eingriffe sind allerdings um mehrere Größenordnungen höher. Durch Hochleistungstechnologie verkürzen sich die »Wirkzeiten« bis zum Eintreten der Veränderungen

radikal. Zum Teil werden sie erst durch die Nutzung digitaler Technik erfassbar – insbesondere durch die Analyse großer Datenmengen, das Stichwort lautet hier Big Data.

### Die Natur vernetzt sich ganzheitlich

Im Gegensatz zum linearen Menschen organisiert sich die Natur als ganzheitliches und vernetztes System: Sie arbeitet mit Gleichgewichten, ausbalanciert mit ineinander verschachtelten Regelkreisen mit negativen Rückkopplungen, Fehlertoleranzen und hierarchisch strukturierten Vernetzungen. Eines der Prinzipien der Natur ist die multifunktionelle Optimierung: Das heißt, Organismen oder Organe sind immer an mehrere Randbedingungen gleichzeitig angepasst, sprich optimiert. Damit ist klar, dass jede dieser physiologischen Leistungen unterhalb der maximalen bleibt – zugunsten eines globalen Optimums, das die Überlebensfähigkeit des Gesamtorganismus und das der Nachkommen sicherstellt.

Hier findet sich ein wesentlicher Unterschied zu technischen Lösungen, die auf einen oft zeitlich begrenzten Hauptzweck hin maximiert wurden – etwa den Output – und bei der nur eine kleine Anzahl der Abhängigkeiten Berücksichtigung finden. Auch deswegen, weil technische Lösungen nicht selten monodisziplinär entwickelt werden. Zeitlich versetzt und räumlich getrennt treten dann etwaige negative Folgen zutage – aufgrund nicht beachteter Parameter und Zusammenhänge. Reflexartige Reparaturversuche basieren meist ebenfalls auf monokausalem Denken, das wiederum nicht den Ansprüchen einer vernetzten Problemstellung entspricht.

### Biologische Transformation heißt: Vernetzung

Wie die Natur sind auch biologisch transformierte Systeme durch vernetzte Stoffkreisläufe statt durch Linearität gekennzeichnet – ebenso wie durch Optimierung im Sinne des Systems statt durch Maximierung des Ertrags von Einzel-

prozessen. Sie bedienen alle drei Säulen der Nachhaltigkeit: Sie sind ökologisch, indem sie verschiedene Parameter in Richtung eines Systemoptimums ausbalancieren, ökonomisch, indem sie das Naturprinzip der Ressourceneffizienz und der Stoffkreisläufe nutzen, und sozial, indem sie die menschlichen Grundbedürfnisse wie Ernährung, Gesundheit und Mobilität schützen. Damit lassen sich die Ziele der biologischen Transformation gut in die sogenannte Maslow'sche Bedürfnispyramide einordnen.

In den vergangenen Jahren wurden in den Lebenswissenschaften und der Informationstechnologie derartige Fortschritte erzielt, dass komplexe Vorgänge in der Natur bis hin zum molekularen Level verstanden, simuliert und für die menschliche Technik adaptiert werden konnten. Dem heutigen Menschen stehen damit bislang nicht gekannte Werkzeuge zur Verfügung, sein eigenes Handeln zu verstehen, die Komplexität der zahlreichen Handlungsstränge zu erkennen und sie in Richtung eines Systemoptimums zu beeinflussen.

Dr. Oliver Schwarz  
Fraunhofer IPA, [www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

# PHARMAWIRKSTOFFE VOM FELD – VOM ACKER IN DIE APOTHEKE

Böden versalzen, in Grund- und Oberflächenwasser sammeln sich Stickstoffe, neue Schädlinge und Krankheiten mindern den Ertrag. Kurzum: Die Landwirtschaft sieht sich mit zahlreichen Problemen konfrontiert. Soll sich daran etwas ändern, ist Umdenken gefragt. Statt wie bisher auf einige wenige Pflanzen zu setzen, sollte das Ziel sein, die regionalen Bedingungen zu berücksichtigen und eine möglichst große Vielfalt an Pflanzen anzubauen. Satteln Landwirte auf Nischenpflanzen um, bringt das nicht nur die Umwelt voran, sondern kann auch ihre Kasse klingeln lassen. Schließlich lassen sich aus diesen Pflanzen verschiedene Wirkstoffe extrahieren. Verarbeitet der Landwirt die Pflanzen auf seinem Hof weiter, steigert er seine Produktvielfalt und kann Marktschwankungen gelassener entgegensehen. Welche Nischenpflanzen sich für welche Böden eignen und welche Wirkstoffe sich aus ihnen extrahieren lassen, untersuchen Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME.

Lässt man seinen Blick über die hiesigen Felder schweifen, so sieht man vor allem Mais, Weizen oder Raps – also die »großen Kulturarten« oder auch Major Crops. Für eine nachhaltige Bioökonomie sind jedoch auch Nischenpflanzen wichtig. Im Zuge der Nachhaltigkeit gilt es daher, genauer zu schauen, welche Bedingungen auf den jeweiligen Äckern vorliegen und – an sie angepasst – wieder mehr Vielfalt auf die Felder zu bringen. Im Fokus liegen dabei vor allem solche Pflanzen, die in jüngerer Vergangenheit an Bedeutung verloren haben.

## Warum Nischenpflanzen?

Doch wie soll man Landwirte dazu bringen, auf Nischenpflanzen umzusatteln? Vor allem, wie so oft, über wirtschaftliche Anreize. Aktuell werden Technologien entwickelt, die alle Teile der Pflanze nutzbar machen. So lässt sich das Korn als Lebens- oder Futtermittel verwenden; aus Blättern, Halmen und Spelzen können Wirkstoffe gewonnen werden, die mittels moderner chemischer Analytik und In-silico-Screening – also Untersuchungen per Computer – identifiziert werden; die Reststoffe lassen sich energetisch nutzen – und die dabei entstehenden Aschereste können als Dünger aufs Feld gebracht werden. Man spricht dabei auch von einer Koppel- oder Kaskadennutzung. Neue Anbausysteme wie Kontur- und Streifenanbau und eine angepasste Fruchtfolge sollen dafür sorgen, dass verschiedene Pflanzenarten gut miteinander in-

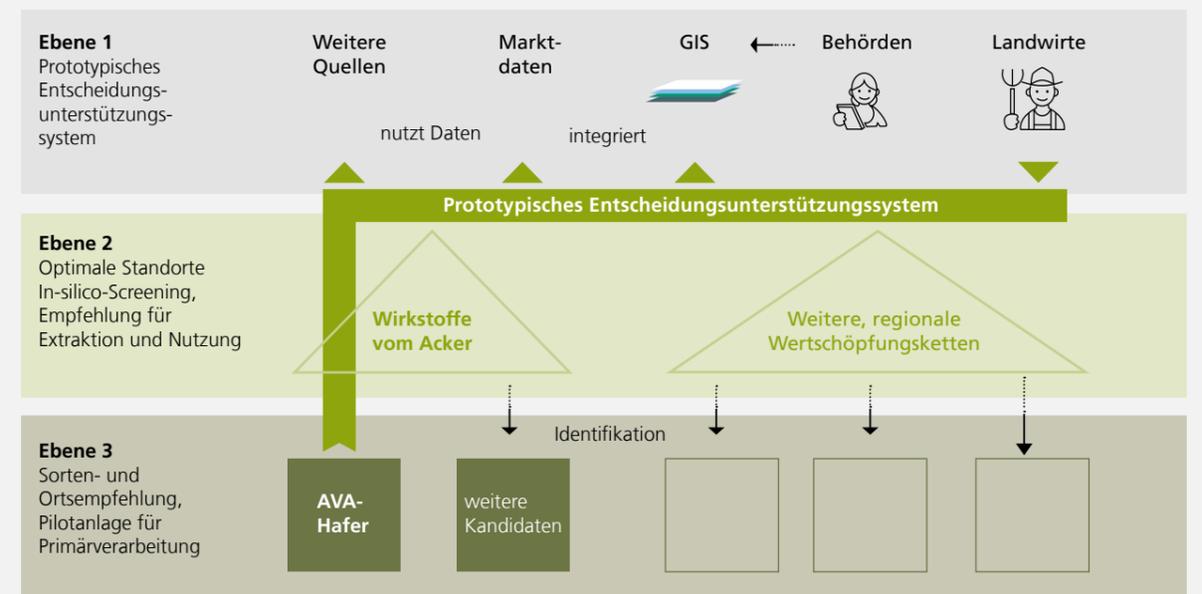
teragieren. Für den Landwirt heißt das: Er kann die Wertschöpfung an seinem Hof steigern, indem er die Primärverarbeitung wie Trocknung, Reinigung und Extraktion direkt auf seinem Betrieb durchführt. Somit steigert er seine Produktvielfalt und ist von Marktschwankungen weniger betroffen. Und die Vielfalt an Pflanzen wiederum bietet Schädlingen und Krankheiten weniger Angriffsflächen und sorgt dafür, dass die Landwirte mit weniger Pflanzenschutzmitteln und mineralischem Stickstoff als Dünger auskommen.

## Mit Fraunhofer zurück zu den Nischenpflanzen

Forschende am Fraunhofer IME arbeiten daher daran, landschaftsökologische Standortfaktoren im Detail zu bewerten. Eignen sich die Böden für entsprechende Nischenpflanzen? Welche Vor- und Nachteile würde ihr Anbau mit sich bringen? Auf einer ersten Ebene wollen sie flächenbezogene Daten – etwa zum Standort oder der Infrastruktur – sowie aktuelle Marktdaten zur Verfügung stellen. Diese sollen analysiert und in einem System aufbereitet werden, das insbesondere kleine und mittelständische Landwirte bei ihrer Entscheidung unterstützt. Je nach den Anbaubedingungen und Pflanzenarten können sich auf diese Weise neue regionale Clusterstandorte entwickeln, die sowohl die gekoppelte Produktion und Verarbeitung als auch die Inwertsetzung von Nahrungs-, Energie- und Wirkstoffpflanzen umfassen.



## Gesamtkonzept mit den drei Arbeitsebenen



Auf der zweiten Arbeitsebene werden die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler exemplarisch die Wertschöpfungskette »Wirkstoffe vom Acker« betrachten. Das heißt: Sie werden spezifische Pflanzeninhaltsstoffe untersuchen. Welche Wirkungen haben diese in puncto ökologischer Pflanzenschutz, Kosmetik oder Gesundheit? Die Forscher identifizieren ausgewählte Nischenpflanzen mit interessanten Inhaltsstoffen, beschreiben optimale Anbaubedingungen und -regionen und zeigen ihre Wirkpotenziale auf. Als Beispiel für eine solche Wertschöpfungskette »Wirkstoffe vom Acker« dient Hafer. Schließlich ist Hafer eine traditionelle Nahrungs- und Futterpflanze, die in letzter Zeit jedoch kaum noch auf den Feldern zu sehen ist. Kernpunkt dabei bilden sogenannte Avenanthramide, die sich aus dem Hafer gewinnen lassen. Wie wirken sich die Anbaubedingungen auf die Produktion der Avenanthramide in verschiedenen Hafersorten aus? Wie lassen sich diese pflanzlichen Wirkstoffe im Pflanzenschutz und in

der Pharmazie verwenden? Dies sind nur einige der Fragen, mit denen sich das Fraunhofer IME beschäftigt. Die Forscher tragen auf diese Weise dazu bei, regional neue Produktionslinien zu entwickeln – vom züchterischen Ziel bis zum Absatzmarkt – und fördern den Haferanbau mit seinen positiven Fruchtfolgeeffekten. Dafür gilt es, Anbieter verschiedener Agrarprodukte mit den Abnehmern zusammenzubringen, also beispielsweise mit den verschiedenen Anbietern von Verarbeitungstechnologien. Vernetzen sich hoch spezialisierte Betriebe des verarbeitenden Gewerbes engmaschig und vielfältig mit Agrarbetrieben, die auf deren Bedarfe reagieren, steigt die regionale Wertschöpfung. Gleichzeitig ist ein engmaschiges Netz unterschiedlicher Wertschöpfungsketten resilient gegenüber Krisen, da flexible Anpassungen möglich sind.

Dr. Kristina Bette, Prof. Christoph Schäfers  
Fraunhofer IME, [www.ime.fraunhofer.de](http://www.ime.fraunhofer.de)



## PILZE ALS PRODUZENTEN – WASCH- UND REINIGUNGSMITTEL AUS DEM FERMENTER

Das Pariser Klimaabkommen soll der Erderwärmung Einhalt gebieten. Doch wie kann die angestrebte, nahezu CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft funktionieren? Dies ist erst in Ansätzen bekannt. Klar ist: Werden Chemikalien auf Basis nachwachsender Rohstoffe – also auf biotechnologischem Weg – produziert, ist schon mal ein großer Schritt getan. Denn beim Rohstoff Erdöl bringt man seit Jahrtausenden gebundenes CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre ein, was bei nachwachsenden Rohstoffen nicht der Fall ist. Die Produktvielfalt hinsichtlich der nachwachsenden Rohstoffe kennt keine Grenzen, schließlich hat die Natur einen unerschöpflichen Fundus an möglichen Produktionsorganismen zu bieten. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer-Instituts für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB widmen sich der biotechnologischen Herstellung von Biotensiden, die als Waschmittel, Emulgatoren, kosmetische und pharmazeutische Wirkstoffe sowie Pflanzenschutzmittel Verwendung finden. Dafür nutzen sie Pilze – genauer gesagt Hefen, Brand- und Schimmelpilze.

Überzieht ein blaugrüner Film von Schimmelpilzen Brot, Obst oder andere Lebensmittel, landet das Nahrungsmittel zu Recht in der Mülltonne. Schließlich sind diese Pilze gesundheitsschädlich. In den Laboren des Fraunhofer IGB in Stuttgart allerdings sind unterschiedlichste Pilze, auch die Schimmelpilze sehr beliebt, genauer gesagt die Schimmelpilze der Gattung *Aspergillus*, sowie die Gruppe der Brandpilze (*Ustilaginomycotina*) und natürlich Hefen: Denn mit ihnen lassen sich verschiedene Substanzen auf CO<sub>2</sub>-neutralem Wege produzieren – die Umsetzung der Beschlüsse des Pariser Klimaabkommens rückt damit ein Stück näher. Und das ist dringend nötig, denn bislang steht die CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft noch am Anfang.

Pilze sind dabei nur einer der möglichen Wege, die man beschreiten kann, um Chemikalien auf Basis nachwachsender Rohstoffe zu produzieren. Allerdings ein hochinteressanter: Denn sie bieten den Vorteil, dass einige von ihnen – anders als die meisten Mikroorganismen – Zuckerringe mit fünf Kohlenstoffringen verwerten können. Das heißt: Der Pilz kann auch Xylose, einen wesentlichen Bestandteil von Holz, nutzen – also einen Rohstoff, der für Menschen keine Nahrung darstellt. Der Tank-Teller-Konflikt tritt hier daher nicht auf. Die Frage, ob auf

den Äckern Nahrungsmittel oder Rohstoffe für Chemie oder Kraftstoffe angebaut werden, stellt sich hier also nicht.

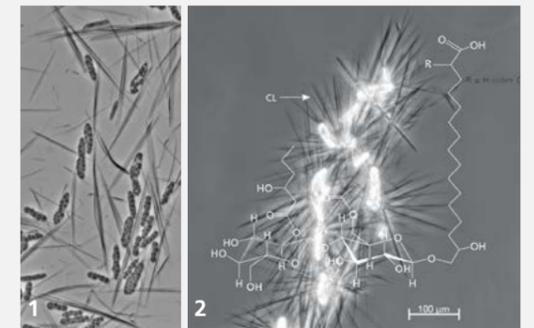
### Biotenside produzieren – aus nachwachsenden Rohstoffen

Ein Produkt, das sich mithilfe der Brandpilze herstellen lässt, sind Biotenside, aus denen wiederum Waschmittel, Emulgatoren, kosmetische und pharmazeutische Wirkstoffe sowie Pflanzenschutzmittel produziert werden können. Äpfelsäure gehört zum Produktportfolio der Schimmelpilze. Für diese gibt es einen stetig wachsenden Markt: So sorgt sie unter anderem für den sauren Geschmack in Produkten wie Marmeladen und Säften, auch verbessert sie die Haltbarkeit von Backwaren. Zudem kann sie als Baustein für biobasierte Polyester eingesetzt werden. Die Biotenside oder Apfelsäure werden ähnlich hergestellt wie Bier: Zucker oder Pflanzenöle werden mit den Mikroorganismen fermentiert und dabei umgewandelt. Bei der Bierherstellung machen das die Hefen mit dem Malzzucker der Gerste. Im Labormaßstab funktioniert diese Fermentation schon recht gut. Für die industrielle Produktion sind jedoch noch Ver-

besserungen nötig: Die Ausbeute bei der Fermentation kann noch verbessert werden, wie auch die Produktzusammensetzung der Biotenside. Auch Hefepilze stellen interessante Moleküle her – etwa für die Synthese von Kunststoffen wie Polyestern. Allerdings sind sie chemisch schwer herzustellen. Das Fraunhofer IGB konnte bereits ein Verfahren für die Herstellung von Dicarbonsäuren mit der Hefe *Candida viswanathii* etablieren: Aus Ölsäure konnte 18-Octadecendicarbonsäure in wirtschaftlich interessanten Konzentrationen fermentativ erzeugt werden. Um ausreichende Mengen an biobasierten Chemikalien wie den oben beschriebenen Tensiden, Lebensmittelbestandteilen oder Kunststoffen für die Verwertung in den unterschiedlichen Branchenherstellern zu können, müssen Herstellungsverfahren in den großen Maßstab übertragen werden. Die Produktionsmenge von Tensiden beträgt gegenwärtig weltweit etwa 18 Millionen Tonnen im Jahr. Um die Prozesse vom Kilogramm-Maßstab auf den Tonnen-Maßstab zu skalieren, ist viel Ingenieurskunst und Rechenarbeit nötig. Wie lassen sich die Mineralsalzmedien perfekt abstimmen? Welche Fütterungsstrategien sind optimal? Diese Fragen lassen sich im kleinen Maßstab am Fraunhofer IGB beantworten.

### Größerer Maßstab: Fraunhofer-Pilotanlage und -Bioraffinerie

Anschließend werden diese Prozesse im großen Maßstab umgesetzt – beispielsweise am Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP. Die dortige Pilotanlage erlaubt eine Hochskalierung von bis zu zehn Kubikmetern. Für diese großen Mengen an biobasierten Chemikalien ist eine enorme Menge an Rohstoffen nötig, schließlich brauchen die Pilze etwas »zu fressen«. Hier kommen Lignocellulose-basierte Zuckerlösungen, die auch die oben genannte Xylose enthalten, zum Einsatz. Sie werden dem Nährmedium zugefügt. Diese »Holzzucker« können direkt in der Lignocellulose-Bioraffinerie des Fraunhofer CBP gewonnen werden.



1 Zellen des Brandpilzes *Ustilago maydis* im Einzellstadium.  
2 Cellobioselipide als nadelförmige Kristalle (mit Strukturformel).

### Von der Idee zum einsatztauglichen Verfahren

Das Fraunhofer IGB und das Fraunhofer CBP widmen sich damit der Aufgabe, mit den unterschiedlichsten Pilzen Chemikalien zu gewinnen und die dazu notwendigen Prozesse zu optimieren und zu skalieren. Die Kompetenzen des Fraunhofer IGB umfassen dabei die Auswahl und Optimierung der Mikroorganismen, die Entwicklung geeigneter Konversionsprozesse im Labormaßstab und die Übertragung dieser Verfahren über mathematisch-technische Methoden in den Pilot-Maßstab. Das Fraunhofer CBP übernimmt die Umsetzung der Produktion im großen Maßstab. Anders gesagt: Alles, was nötig ist, um aus einer guten Idee im Labor letztendlich einsatztaugliche Verfahren entstehen zu lassen – die wiederum genügend der benötigten Substanz erzeugen, um daraus Produkte für den Markt herzustellen –, sind am Fraunhofer IGB und am Fraunhofer CBP vorhanden.

Prof. Steffen Rupp, Dr. Susanne Zibek  
Fraunhofer IGB, [www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)  
[www.cbp.fraunhofer.de](http://www.cbp.fraunhofer.de)



## VERBINDUNG VON NATUR UND TECHNIK – BIOLOGISCH-TECHNISCHE SCHNITTSTELLEN

Wollen wir von Mensch zu Mensch kommunizieren, so tun wir das über die Sprache. Was die Kommunikation mit technischen Geräten betrifft, benötigt es jedoch die passenden Schnittstellen. Bislang gilt: Der Mensch muss sich anpassen. Die Technik gibt den Weg vor. Künftig soll sich das ändern. Maschinen und Co. werden lernen, auf die mentalen Zustände ihrer Nutzer einzugehen. Welche Präferenzen und Absichten haben die Anwender? Sind sie genervt oder gar überfordert? Neuro-adaptive Schnittstellen können diese Zustände mittels neurophysiologischer Sensoren erfassen. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO arbeiten daran, die Technik für die Nutzerbedürfnisse dadurch sensibel zu machen.

Wagt sich die Sonne hinter den Wolken hervor und lässt es plötzlich heller werden, passt sich die Helligkeit des Bildschirms selbstständig an. Im Fahrzeug erkennt der Abstandsassistent, wenn der Fahrer beim Einparken einem Hindernis zu nah kommt und warnt ihn. Und in Produktionsumgebungen arbeiten die Industrieroboter »Hand in Hand«. Technische Systeme können bereits heute verschiedene Umgebungsbedingungen erkennen, sich an unterschiedliche Situationen anpassen und zunehmend flexibel und selbstständig agieren. Soll intelligente Technik möglichst optimal und gewinnbringend mit Menschen zusammenarbeiten, reicht dies allerdings nicht aus – sie muss über die Umgebungsbedingungen hinaus auch die Präferenzen und Absichten des Nutzers erfassen. Denn Menschen nehmen Technik nur dann als kooperativ und »menschengerecht« wahr – und akzeptieren sie als Hilfestellung oder gar als Partner – wenn sie sensibel, intuitiv und prompt auf ihre Bedürfnisse reagiert. Es gilt also, die mentalen Zustände, wie Emotionen, Konzentrationsveränderungen, Stress oder auch die kognitive Beanspruchung des Nutzers, kontinuierlich zu erkennen und zu berücksichtigen. Und zwar nach Möglichkeit dort, wo diese Regungen entstehen: nämlich im Gehirn. Oder zumindest dort, wo sie sich besonders intensiv zeigen, beispielsweise an der Aktivität des Herzens, der peripheren Muskelanspannung oder den Bewegungen der Augen. Wenn

die Technik mentale Zustände des Menschen auf diese direkte Weise erkennt, kann sie sich genauer darauf einstellen – ohne zusätzlichen Interaktionsaufwand für den Nutzer.

### Lösung: Entwicklung neuro-adaptiver Schnittstellen

Möglich machen es neurotechnologische Schnittstellen: Anhand von Aktivierungsmustern im Gehirn, der Dynamik der Augenbewegungen oder von Erregungen im peripheren Herz-Kreislauf-System ziehen sie Rückschlüsse auf mentale und emotionale Nutzerzustände. Hieraus ergibt sich ein neues Forschungsfeld: neuro-adaptive Mensch-Technik-Schnittstellen, die in einem Mensch-Technik-Regelkreis die neurophysiologischen Echtzeitmaße erfassen, daraus die Nutzerzustände interpretieren und das Systemverhalten entsprechend anpassen. Doch wie kommt man an die benötigten Daten? Hier sind Brain Computer Interfaces (BCI) besonders vielversprechend. Als Messverfahren bietet sich etwa die Elektroenzephalographie (EEG) an. Sie erfasst direkt die elektrische Aktivität von synchronisierten Neuronenpopulationen im Kortex. Oder aber die funktionelle Nahinfrarotspektroskopie, kurz fNIRS – ein optisches Verfahren, das Stoffwechselprozesse misst, die im Zusammenhang mit diesen neuronalen Mustern (EEG) stehen.

### Wo lassen sich neuro-adaptive Schnittstellen anwenden?

Bislang werden neuro-adaptive Schnittstellen überwiegend für medizinische Anwendungen genutzt – etwa wenn es darum geht, mit schwerstgelähmten Patienten zu kommunizieren. Doch bieten sie auch außerhalb des medizinischen Bereichs zahlreiche Potenziale. So sind etwa Fahrerassistenzsysteme denkbar, die auf die Aufmerksamkeit, die mentale Beanspruchung und die Wachsamkeit des Fahrers reagieren. Oder aber personalisierte Assistenzsysteme für das intelligente Wohnen, um Inhalte, Darstellungs- und Interaktionsmechanismen an individuelle Bedürfnisse anzupassen. Auch kollaborative Roboter rücken damit in den Bereich des Möglichen: Diese reagieren sensibel auf Nutzerabsichten, Emotionen und Aufmerksamkeit.

### Fraunhofer forscht an vorderster Front

Das Forschungsfeld neuro-adaptiver Schnittstellen ist noch sehr jung. Soll die angewandte Forschung vorangetrieben und sollen die Ergebnisse in die wirtschaftliche Praxis überführt werden, gilt es, interdisziplinär zusammenzuarbeiten. Die Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IAO arbeiten daran, die erfassten Daten von Störsignalen und Bewegungsartefakten zu befreien und die Zustände des Nutzers kontinuierlich und ohne Zeitverzögerung zu klassifizieren. Wie lässt sich das Systemverhalten – also die Reaktion des technischen Systems auf die erkannten Nutzerzustände – gestalten und steuern? Auch hieran forschen die Wissenschaftler des Fraunhofer IAO. Denn werden neuro-adaptive Schnittstellen im nichtmedizinischen Bereich angewendet, so müssen sie sich konsequent an den Bedürfnissen und ethischen Wertvorstellungen der Nutzer und der Gesellschaft ausrichten.

Dr. Mathias Vukelić  
Fraunhofer IAO, [www.iao.fraunhofer.de](http://www.iao.fraunhofer.de)

### Biodegradierbare Elektronik für aktive Implantate

Elektronische Bauteile, die sich vollständig auflösen, sobald sie ihre Arbeit getan haben? Was klingt wie Science-Fiction, ist in den Laboren bereits Realität: Man spricht dabei von »biodegradierbarer Elektronik«. Diese verringert nicht nur den ökologischen Fußabdruck, sondern eröffnet auch neuartige Anwendungen – etwa im Bereich von Implantaten, aber auch in der Biotechnologie oder der Lebensmittelindustrie. Forscherinnen und Forscher der Fraunhofer-Institute FEP, ENAS, IBMT, ISC und der Projektgruppe Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie des Fraunhofer ISC entwickeln im Fraunhofer-internen Projekt »bioElektron« wesentliche Komponenten für solche zukünftig im Körper abbaubaren elektronischen Bauteile. Dazu gehören Leiterbahnen, Elektrodenkontakte für elektrische Signalableitung oder Stimulation, Dünnschichttransistoren und Schaltungen sowie Barrierschichten als Wasser- und Gasbarriere und elektrische Isolationsschichten – allesamt bioabbaubar, versteht sich.

# ALLESKÖNNER ALGE – IM LICHT EINER NACHHALTIGEN CHEMIKALIENPRODUKTION

Mikroalgen sind einzigartig: Sie brauchen prinzipiell nur Sonne, Wasser und Kohlendioxid, um zu wachsen und Biomasse zu generieren. Die einzelligen Organismen nutzen das Sonnenlicht effizienter als Blumen, Bäume und Gräser. Algen sind daher wie geschaffen, biobasierte Wertstoffe zu produzieren. Kein Wunder also, dass sie derzeit neue, wachsende Märkte erobern – etwa in der Ernährungs- und Pharmabranche.

Einige Tage, ja gar Wochen können Menschen und viele Tiere durchaus auf Nahrung verzichten – wenn sie denn genügend Wasser haben. Langfristig jedoch kommt kein Lebewesen ohne Essen aus. Ähnlich ist es im Pflanzenreich: Bäume, Blumen und Gräser brauchen Licht und Erde mit Nährstoffen, um zu wachsen und zu gedeihen. Nicht so dagegen Mikroalgen. Die Biomasse wird in Frisch- oder Meerwasser aus Sonne, Wasser, Kohlendioxid und anorganischen Nährstoffen aufgebaut. Sie sind daher als Biomasse-Quelle sehr interessant.

## Mikroalgen als neue Rohstoffquelle

Ihre genügsame Art ist bei Weitem nicht der einzige Vorteil, den Mikroalgen zu bieten haben. Denn man braucht nur wenig in sie »hineinzustecken«, damit sie gute Biomasse-Erträge abwerfen: Mikroalgen produzieren bis zu fünfmal mehr Biomasse als Landpflanzen pro Fläche und Zeit. Zudem brauchen sie keine Felder und Wiesen, um zu wachsen – marine Mikroalgen beispielsweise gedeihen, wie der Name schon sagt, im Meerwasser. Auch ist ihre Ernte nicht an spezifische Jahreszeiten gebunden, sie lassen sich kontinuierlich über das ganze Jahr hinweg kultivieren. Sie sind homogen – es ist also jede Zelle gleich und nicht in Blatt, Stängel und Wurzel differenziert – und frei von Lignocellulose. Da ein Lignocellulosegehalt mit einem hohen Energieaufwand für den Biomasseaufschluss und die Verarbeitung einhergeht, heißt das: Sie sind leichter extrahierbar. Ein weiterer Benefit: Für die Kultivierung der Algen können CO<sub>2</sub>-haltige Abgase genutzt werden.

## Mikroalgen haben es in sich

Dabei sind Mikroalgen keineswegs gleich Mikroalgen. Die Anzahl an Algenspezies wird auf mehr als 100 000 geschätzt und bietet ein sehr großes Potenzial an unterschiedlichen Inhaltsstoffen wie Carotinoiden, Phytosterolen oder β-Glucanen, die noch dazu um den Faktor zehn höher konzentriert sind als in Landpflanzen. Wie sich die Algenbiomasse zusammensetzt, lässt sich über gezielte Kultivierungsbedingungen steuern. Allen Mikroalgen gemein ist jedoch: Sie enthalten sehr viele Proteine, mehr als 60 Prozent der Trockenmasse. Je nach Kulturbedingungen können aber auch Lipide bis zu 60 Prozent des Zelltrockengewichts ausmachen. Werden die Bedingungen so eingestellt, dass die Algen nur mäßig wachsen, produzieren viele von ihnen zudem Öl oder Kohlenhydrate als Speicherstoffe. Auch Wertstoffe wie Vitamine und langkettige, mehrfach ungesättigte Fettsäuren lassen sich aus den Algen extrahieren. Die Fettsäuren werden unter anderem als gesundheitsfördernde oder färbende Stoffe genutzt.

## Wertstoffproduktion mit Algen in Photobioreaktoren

Ganz einfach ist das alles jedoch nicht. Denn Algen benötigen spezielle Produktionsbedingungen, sprich geschlossene Photobioreaktoren. Der limitierende Faktor dabei ist das Licht. Sind die Algenkulturen dicht, so beschatten sie sich gegenseitig. Die Algen müssen daher effizient und gerichtet durchmischt werden, sodass alle etwas vom Licht an der Reaktoroberfläche abbekommen. Forschende des Fraunhofer-Instituts für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB haben daher einen Photobioreaktor für die Algenproduktion im Labor und



## Prozesskette für die Gewinnung von Algeninhaltsstoffen in Lebensmitteln



im Freiland entwickelt – er wurde durch die Subitec GmbH, ein Spin-off des Fraunhofer IGB, kommerzialisiert. Einige Stoffe bilden die Algen erst dann aus, wenn die Nährstoffe knapp sind. Die bekanntesten Beispiele hierfür sind Fette und Polysaccharide sowie Carotinoide wie β-Carotin. Die Nährstofflimitierung haben die Forscher des Fraunhofer IGB dabei in einer zweiten Produktionsstufe realisiert. Die zweistufige Kultivierung birgt besondere Herausforderungen, da beide Stufen optimiert und aufeinander abgestimmt werden müssen. In einem dritten Schritt arbeiten die Forschenden die Biomasse gezielt auf – je nach Inhaltsstoffen die extrahiert werden sollen.

## Maßgeschneiderte Algenproduktion im industriellen Maßstab

Um das große Spektrum an Algeninhaltsstoffen wirtschaftlich nutzen zu können, braucht es eine maßgeschneiderte Algenproduktion mit hoher Prozessstabilität im industriellen

Maßstab. Hierzu hat das Fraunhofer IGB Prozesse im Labor entwickelt und auf die Freilandproduktion übertragen. Der Erfolg ließ nicht auf sich warten: Die Gehalte an Omega-3-Fettsäure EPA und Carotinoid Fucoxanthin waren die höchsten, die bisher für den Langzeitbetrieb publiziert wurden. Natürlich vorkommende Carotinoide, Omega-3-Fettsäuren, Proteine und andere gesundheitsfördernde Inhaltsstoffe lassen sich auf diese Weise gezielt produzieren. Auf dem Markt bringen solche natürlichen Extrakte deutlich höhere Preise ein als ihre synthetisch hergestellten Pendanten.

Dr. Ursula Schließmann, Dr. Ulrike Schmid-Staiger  
Fraunhofer IGB, [www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

**1** Freilandanlage am Fraunhofer IGB zur Mikroalgenproduktion mit 30 L-FPA-Reaktoren.



## **NACHWACHSENDE RESSOURCEN FÜR ERNÄHRUNGSSICHERUNG UND GESUNDHEIT**

Effizient und ökologisch: Schmackhafte Nahrungsmittel aus Pflanzeiweiß oder Aquakulturen – die Werkzeuge der Natur eröffnen uns völlig neue Möglichkeiten bis hin zu Hightech-Anwendungen in der Medizin. Das Ziel sind nachhaltige Produkte für neue Märkte.



## SEIDE AUS DEM LABOR – HIGHTECH-FASER FÜR DIE MEDIZINTECHNIK

Zart und zerbrechlich wirken sie, die Fäden eines Spinnennetzes. Doch der Eindruck täuscht gewaltig: Im Verhältnis sind die Fasern reißfester als Stahlseile und zugleich dehnbarer als Nylon. Auch die Seide der Florfliege hat herausragende Eigenschaften, sie überzeugt vor allem mit einer enormen Biegesteifigkeit. Für die Industrie sind diese neuen Materialien hochinteressant – etwa für Leichtbaukunststoffe im Bereich Verkehr oder biokompatible Seidenbeschichtungen von Implantaten im Bereich der Medizintechnik. Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP entwickeln neuartige Biofasern aus einem Seidenprotein der Florfliege und arbeiten daran, dieses in großen Mengen biotechnologisch im Labor herzustellen. In einem eigenen Forschungsbereich, den das Fraunhofer IAP vor zwei Jahren gegründet hat, nutzen die Forscher zudem auch andere Proteine, zum Beispiel für den Einsatz als Filter zur chiralen Stofftrennung.

Spinnenseide ist ein faszinierendes Material: Ihre Fasern sind im Verhältnis reißfester als Stahlseile – und dabei dehnbarer als Nylon. Sie können dreimal mehr Energie aufnehmen als die synthetische Faser Kevlar, bevor der Faden reißt. Möglich machen es die zugrunde liegenden Proteinstrukturen. Auch andere Seidenarten verfügen über ausgezeichnete Eigenschaften: etwa die Seide aus dem Kokon des Maulbeerspinners, eines grau-gelben Nachtschmetterlings. Sie wird seit etwa 5000 Jahren genutzt und erfreut sich auch heutzutage noch großer Beliebtheit. Aufgrund ihrer hohen Reißfestigkeit wird sie als Hochleistungsmaterial eingesetzt, beispielsweise als Gewebe für Fallschirme. Die Seide der Florfliege wiederum beeindruckt mit einer enormen Traglast und hohen Biegesteifigkeit. Das ist auch nötig, schließlich lagern Florfliegen ihre Eier auf der Unterseite von Blättern ab – auf der Spitze eben dieser seidigen Fäden. Auf diese Weise ist ihr Nachwuchs sicher vor bodennahen Fressfeinden. Die »Eierstiele« sind nur etwa 15 Mikrometer dick und halten das Gewicht der Eier problemlos.

### Seidenmaterialien für Hochleistungsfasern und -folien

Kein Wunder, dass diese feinen Proteinfasern auch für industrielle Anwendungen interessant sind. So könnte die Spinnenseide beispielsweise im Medizinproduktebereich genutzt werden, als Wundabdeckung, chirurgisches Nahtmaterial oder Knorpel- und Sehnenimplantat. Weitere mögliche Einsatzbereiche liegen im Bereich der Kosmetik, Papierprodukte, Kleber. Die Faser der Florfliegenseiden dürfte auch für den Leichtbau interessant sein: Die biegesteifen Seidenfasern könnten in Komposit-Materialien die Glasfaser-Komposite ersetzen. Dies würde unter anderem das Recycling deutlich vereinfachen. Denn während herkömmliche Glasfaser-Komposite beim Verbrennen einen Glasfaserrückstand aufweisen, können Produkte mit biegesteifen Florfliegen-Seidenproteinen kompostiert oder rückstandsfrei und CO<sub>2</sub>-neutral verbrannt werden.

### Florfliegen-seide künstlich herstellen

Bisher war es jedoch nicht möglich, die Seidenproteine der Florfliege in ausreichender Menge und Reinheit herzustellen. Das möchten Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IAP ändern. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit der Firma AMSilk GmbH arbeiten sie daran, Florfliegen-Seidenproteine mithilfe von Bakterien in großen Mengen herzustellen – über einen biotechnologischen Prozess. Die molekularbiologischen Vorarbeiten fanden am Lehrstuhl Biomaterialien der Universität Bayreuth statt: Hier wurde eine spezielle Gensequenz konstruiert, welche Bakterien befähigt, das Seidenprotein herzustellen. Am Fraunhofer IAP wird das Herstellungsverfahren so optimiert, dass das Seidenprotein kostengünstig in industrierelevanten Mengen hergestellt werden kann. Das Fraunhofer IAP kombiniert Biotechnologie und Polymerforschung unter einem Dach und bietet damit beste Voraussetzungen für die Herstellung von Fasern aus Florfliegen-seide. So verfügt es über ein Spinnertechnikum, in dem technische Fasern entweder aus einer Lösung oder aus einer Schmelze im industriennahen Maßstab hergestellt werden können.

### »Spiegelverkehrte« Moleküle durch Membranen abtrennen

Die Forscher am Fraunhofer IAP widmen sich jedoch nicht nur der Spinnenseide, sondern nutzen auch andere Proteine. Aminosäuren, also die Bausteine von Proteinen, und andere kleine Moleküle liegen häufig als ein chirales Gemisch vor. Das heißt: Ihre verschiedenen Varianten bestehen zwar aus genau den gleichen Atomen, jedoch sind sie räumlich wie Bild und Spiegelbild angeordnet. Damit unterscheiden sich auch ihre chemischen Eigenschaften – ihre Düfte beispielsweise können verschieden sein. Diese beiden Varianten voneinander zu trennen ist technisch anspruchsvoll und je nach Substanz auch sehr teuer. Am Fraunhofer IAP wird gemeinsam mit der

Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen an neuartigen Membranen gearbeitet, die solche Gemische einfach mittels Filtration trennen können. Der Clou: In die ultradünnen Polymermembranen sind natürliche Proteinkanäle – lediglich drei bis vier Nanometer breit – integriert, in die wiederum funktionelle Gruppen eingebracht werden. Und zwar auf eine Weise, dass nur eines der beiden Spiegelbilder durch den Kanal hindurchpasst. Die Anwendungsbreite solcher Membranen ist immens: Mehr als die Hälfte aller heutigen pharmazeutischen Wirkstoffe haben spiegelbildliche Strukturen und müssen entsprechend aufgereinigt werden.

Prof. Alexander Böker  
Fraunhofer IAP, [www.iap.fraunhofer.de](http://www.iap.fraunhofer.de)



## GESCHMACK OHNE REUE – PFLANZENEIWEISS FÜR NACHHALTIGKEIT UND GENUSS

Die Weltbevölkerung steigt: Leben momentan 7,5 Milliarden Menschen auf der Erde, sollen es Prognosen zufolge 2050 bereits 9,7 Milliarden sein. Diese ausreichend mit sicheren und hochwertigen Lebensmitteln zu versorgen ist eine wesentliche Herausforderung unserer Zeit – schließlich sind die Ressourcen wie landwirtschaftlich nutzbare Flächen, Wasser und Düngemittel begrenzt. Werden momentan noch große Mengen an Fleisch, Eiern, Milch und Fisch verzehrt, sind langfristig nachhaltige Alternativen auf Pflanzenbasis gefragt. Denn die Produktion von Fleisch ist wenig effizient: Es wird ein Vielfaches an Nährstoffen benötigt. Im Sinne der globalen Ernährungssicherung gilt es daher, proteinhaltige und nahrhafte Lebensmittel zu entwickeln, die eine schmackhafte Alternative zu Fleisch bilden. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer-Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV arbeiten daran.

Heizt man an einem warmen Sommertag den Grill an, so gilt es in vielen Familien- und Freundeskreisen, auch Gemüse für Vegetarier oder Veganer anzubieten. Die meisten Menschen allerdings wollen auf ihr Grillfleisch im Sommer ebenso wenig verzichten wie auf den Gänsebraten zu Weihnachten. Auf Dauer jedoch wird das so nicht weitergehen können. Denn um ein Kilogramm tierisches Eiweiß zu produzieren, müssen drei bis zehn Kilogramm pflanzliche Futtermittel wie Getreide oder Soja verfüttert werden. Fleisch zu verzehren ist also alles andere als umweltfreundlich: Seine Produktion verbraucht viel Wasser, Energie und Agrarflächen, zudem entlassen die Nutztiere verdauungsbedingt erhebliche Mengen an Treibhausgasen in die Luft. Das Ausmaß des Fleischkonsums ist enorm – schon heute landen mehr als 60 Prozent des Gemüses, Getreides und Co., die auf den Äckern angebaut werden, in den Futtertrögen der Tiere. Bis 2050, so erwartet die »Food and Agriculture Organization FAO of the United Nations (FAO)«, wird der Verzehr an Fleisch, Eiern, Milch und Fisch durch den Zuwachs der Weltbevölkerung und deren Wohlstands um 70 Prozent zunehmen. Man braucht keine

ausgeprägten Mathematikkennnisse, um zu realisieren: Das kann nicht funktionieren.

Nun braucht niemand zu fürchten, demnächst nur noch vegane Würstchen auf den Grillrost legen zu dürfen. Doch müsste der Fleischkonsum in Deutschland von derzeit 88 Kilogramm pro Kopf und Jahr auf die Hälfte gesenkt werden, um die Gesamtmenge der jährlichen Fleischerzeugung zumindest konstant zu halten. Keine Frage, das kann nur dann klappen, wenn es attraktiven Ersatz auf Pflanzenbasis gibt. Bislang verfügbare Fleischalternativen wie Tofu werden von vielen Konsumenten jedoch nicht akzeptiert – was insbesondere an der Textur der Produkte liegt. Es gilt daher, hochwertige pflanzliche Fleischalternativen zu entwickeln, die die fleischtypische Faserstruktur aufweisen.



### Schnitzel und Rouladen aus Pflanzenfasern

Ziel dabei ist es, hochwertige vegetarische Fleischalternativen zu entwickeln – hierbei kommt es vor allem auf Geschmack, Saftigkeit und Bissfestigkeit an. Am Fraunhofer IVV werden daher geeignete proteinreiche Rezepturen hergestellt, charakterisiert und ihr Verhalten im Herstellungsprozess untersucht. Hierbei kommt eine spezielle Ausgestaltung des Extrusionsverfahrens zum Einsatz. Diese ermöglichen es, Zutaten gleichzeitig zu mischen, zu kneten, unter Druck innerhalb kurzer Zeit zu erhitzen und anschließend in einer speziellen Düse abzukühlen. Verarbeitet man dabei Rohmassen mit geringem Feuchtegehalt, entstehen Granulate, die zu Hackfleisch-ähnlichen Lebensmitteln verarbeitet werden können. Werden dagegen wasserreiche Rohmaterialien gekocht und anschließend langsam abgekühlt, bilden sich gerichtete, faserartige und somit fleischähnliche Proteinstrukturen aus. Diese konnten anschließend zu bekannten Produktformen wie Schnitzel, Rouladen und Steaks weiterverarbeitet werden.

### Vegane Wurstprodukte mit Lupinenproteinen und Ballaststoffen

Im Bündnis PlantsProFood hat sich das Fraunhofer IVV mit zehn Unternehmen und drei weiteren Forschungseinrichtungen zusammengeschlossen, um Lebensmittelzutaten aus den Samen heimischer Blauer Süßlupinen zu gewinnen. Diese bringen gleich mehrere Vorteile mit sich: Lupinenfasern und -proteine schmecken neutral, haben sehr gute funktionelle Eigenschaften und sind ernährungsphysiologisch wertvoll. Sie eignen sich daher insbesondere für vegane Wurstprodukte und Aufstriche. Die Forscherinnen und Forscher entwickelten einen passenden Gewinnungsprozess sowie geeignete Rezepturen. Mit Erfolg: Die hergestellten Produkte haben hervorragende sensorische Eigenschaften und eine verbesserte Streich- bzw. Schnittfestigkeit. Selbst die Farbe der Produkte entspricht in etwa der von herkömmlichen Produkten.



### Was bringt es der Industrie?

Die Lebensmittelindustrie ist die wichtigste Branche des produzierenden Gewerbes in Europa, in Deutschland werden rund 40 Prozent des Umsatzes mit der Herstellung und Verarbeitung tierischer Produkte generiert. Mögliche künftige Rohstoffengpässe und steigende Preise für tierische Lebensmittel bergen somit große Risiken für die Branche. Mit einer Neuausrichtung der Unternehmen auf innovative Produkte aus pflanzlichen Proteinquellen werden sich für die Branche neue Perspektiven eröffnen. So zeigen aktuelle Studien, dass sich der Trend in Richtung veganer Produkte zum »Mainstream« entwickelt. Bislang dominieren international tätige Unternehmen diesen Markt. Wenn es mithilfe der genannten Forschungsanstrengungen auch für kleine und mittlere Unternehmen in Deutschland möglich wird, wohlschmeckende vegane Produkte anzubieten, könnte diese Unternehmen national und international neue Marktanteile erschließen und ihre Wettbewerbsfähigkeit deutlich steigern.

Dr. Peter Eisner  
Fraunhofer IVV, [www.ivv.fraunhofer.de](http://www.ivv.fraunhofer.de)

1 Extruder am Fraunhofer IVV.

# (R)EVOLUTION IN DER MEDIZIN – BIOLOGISIERTE THERAPIEN UND IMPLANTATE

In der Wirtschaft ist ein Wandlungsprozess zu beobachten: Zunehmend erobern Prinzipien der Natur Produktionshallen und Co. Man spricht dabei auch von »Biologisierung«. Befeuert wird dieser Prozess durch Erkenntnisse aus den Lebenswissenschaften, insbesondere der Biotechnologie. Doch was genau kann man nun unter diesem Begriff verstehen? Die Palette ist breit: Biologische Funktionsabläufe, wie sie in Zellen und Geweben natürlicher Organismen vorkommen, helfen bei der Entwicklung neuartiger medizinischer Therapien. Künstliche Neuronale Netze haben das Potenzial, Produktionsabläufe zu optimieren.

Biologische Systeme, ebenso wie wir Menschen, sind seit Millionen von Jahren evolutiven Anpassungs- und Optimierungs-Prozessen unterworfen. Obwohl wir die Grundprinzipien einigermaßen zu verstehen glauben, fällt das Verständnis sehr komplexer biologischer Systemoptimierung noch immer schwer – beispielweise des menschlichen Gehirns oder hoch differenzierter Abwehrsysteme. Das Potenzial, solche evolutiven Prozesse und ihre Resultate für medizinische Anwendungen zu nutzen, ist außerordentlich groß, wie die folgenden ausgewählten Beispiele aus der Fraunhofer-Forschungswelt zeigen.

## Regenerative Medizin:

### Von der Wundheilung bis zur Pflanzenmedizin

Die Vielfalt bei der Entwicklung neuer Therapieverfahren nimmt stetig zu. Neben technisch-physikalischen Lösungen wie neuen Bestrahlungsverfahren oder ausgeklügelten Prothesen für Gelenke und Extremitäten treten dabei zunehmend auch neuartige biologische Verfahren in den Fokus. Diese setzen auf biologische Funktionsabläufe, wie sie auch in Zellen und Geweben natürlicher Organismen vorkommen. Möglich wird dies durch jüngste methodische Durchbrüche auf den Gebieten Gen- und Zelltherapie und Tissue Engineering. Das angestrebte Ziel, nämlich die biologische Wiederherstellung gesunder Funktionen, wird durch den Terminus »Regenerative Medizin« beschrieben. Eine Variante: Organgerüste werden durch Enzyme von ihren Zellen befreit – und anschließend mit Körperzellen des Patienten besiedelt. Am Fraunhofer-

Institut für Chemische Technologie ICT arbeiten erfahrene Biologinnen und Biologen daran, auf diese Weise die Gefäße von Organen zu versorgen und Organe somit außerhalb des Körpers wachsen zu lassen. Das menschliche Immunsystem schützt uns nicht nur vor Infektionen, sondern schränkt auch die Verbreitung von Krebszellen ein. Am Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI in Leipzig werden im Auftrag internationaler Pharma- und Biotechnologie-Unternehmen klinische Prüfpräparate für neuartige Zelltherapien entwickelt. Bei diesen Therapien werden die natürlichen Aktivierungsstrategien des gesunden Immunsystems sowohl verstärkt als auch spezifisch gesteuert. Dies gelingt, indem Rezeptoren gentechnisch in Immunzellen des Patienten eingefügt werden. Diese Antigen-Rezeptoren erkennen charakteristische Oberflächenmerkmale von Krebszellen. Werden die so veränderten Immunzellen über eine Infusion wieder in den Patientenkörper gebracht, vernichten sie die entarteten Krebszellen sehr effektiv. Die Forscherinnen und Forscher an der Fraunhofer-Einrichtung für Marine Biotechnologie und Zelltechnik EMB widmen sich dagegen der Wundheilung. Sie haben ein Verfahren entwickelt, mit dem sich aus den Schweißdrüsen von Patienten auf ambulantem Weg Stammzellen gewinnen lassen. Gibt man diese Stammzellen auf die Wunde, bilden sie Hautzellen und managen den Heilungsprozess. Da die Zellen vom Patienten stammen, stößt der Körper sie nicht ab. Wie wirken sich pflanzliche Grundstoffe auf die menschliche Gesundheit und insbesondere auf den Verlauf von Krankheiten aus? Dies untersuchen Heilkundige schon seit Jahrhunderten. Der Erfahrungsschatz liegt allerdings noch recht zerstreut vor und ist vielfach nur unzulänglich wissen-



schaftlich bewertet. Gemeinsam mit Wissenschaftlern von der Makerere-Universität in Uganda untersucht eine Arbeitsgruppe am Fraunhofer IZI traditionelle Extrakte aus ostafrikanischen Pflanzen, die beispielsweise zur Behandlung der Auszehrung bei Krebserkrankungen einsetzbar sind. Zudem könnten diese Wirkstoffe es ermöglichen, den Antibiotikaeinsatz in der Massentierhaltung signifikant zu senken.

## Künstliche Neuronale Netze basieren auf der Vernetzung im Nervensystem

Auch in puncto Netzwerke können wir viel vom biologischen Vorbild lernen. Schließlich sind die Neuronen in unserem Nervensystem miteinander verbunden, um so einer bestimmten Funktion zu dienen. Man spricht daher auch von Neuronalen Netzen. In der Informatik, Informationstechnik und Robotik bilden Forscher solche Strukturen in künstlichen Neuronalen Netzen nach, mitunter in abgewandelter Form. Anwenden lassen sich solche Neuronalen Netze in zahlreichen Bereichen. Ein Beispiel aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT ist das Fräsen. Bei diesem Bearbeitungsvorgang bündelt sich oft die gesamte Prozessenergie auf einem kleinen Bereich der Werkzeugschneide, das Werkzeug verschleißt daher schnell. Im Forschungsprojekt OptiWear wurde ein künstliches Neuronales Netz entwickelt, das diejenigen Abschnitte der Werkzeugschneide genau analysiert, für die ein besonders hoher Werkzeugverschleiß zu erwarten ist. Das Netz lernt dadurch, den Werkzeugverschleiß beim Fräsen präzise vorherzusagen und die Werkzeugbahnen so anzupassen, dass sich der Verschleiß auf einen großen Bereich der Schneide verteilt. Im Bereich der Computational Neurosciences nutzt man solche Neuronalen Netze, um das menschliche Gehirn genauer zu verstehen und bessere medizinische Behandlungsmöglichkeiten zu entwickeln. Im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das »Bernstein-Netzwerk« errichtet, dem mittlerweile bundesweit über 200 Arbeitsgruppen an mehr als 25 Standorten angehören. Beteiligt war auch das damalige

Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik FIRST als Arbeitsgruppe für Intelligente Datenanalyse und das Neurolab am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Im Neurolab beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem mit folgenden Fragen: Fühlen sich die Nutzer bei der Techniknutzung wohl oder sind sie gestresst? Wie hoch ist die kognitive Belastung während der Arbeitstätigkeit? Wie kann man durch Technikgestaltung eine positive User Experience hervorrufen?

## Design ökologischer Prozesse zur Produktion biologischer Produkte

Seit Beginn der industriellen Revolution entnimmt der Mensch den biologischen Systemen von Jahr zu Jahr immer mehr Produkte – die biologischen Gleichgewichte werden nachhaltig gestört. Es wird daher immer wichtiger für die modernen Produktionsverfahren, die biologischen Systeme zu verstehen und ihre Stoffkreisläufe und Kausalketten gezielt nachzubilden. Die landbasierte integrierte multitrophische Aquakulturanlage (IMTA), die Forscherinnen und Forscher an der Fraunhofer EMB entwickelt haben, zielt genau darauf ab. In einer solchen IMTA werden verschiedene Ebenen des Ökosystems nachgebildet, sprich es werden gleichzeitig beispielsweise Fische, Muscheln und Algen gezüchtet. Das bietet mehrere Vorteile: Das Wasser wird mehrfach verwendet, biologische Abfallstoffe werden als Nahrungsquelle genutzt. Zudem können mehrere Produkte parallel auf den Markt gebracht werden, was die Effizienz dieser Kreislaufsysteme steigert.

Prof. Frank Emmrich  
Fraunhofer IZI, [www.izi.fraunhofer.de](http://www.izi.fraunhofer.de)

Prof. Charli Kruse  
Fraunhofer EMB, [www.emb.fraunhofer.de](http://www.emb.fraunhofer.de)

1 *Aufzeichnung neurophysiologischer Daten.*

# LOKAL, SMART, URBAN – DIE ZUKUNFT DER NAHRUNGSMITTELPRODUKTION



Die Äpfel kommen aus Neuseeland, die Tomaten aus Spanien: Die Versorgung mit frischen Lebensmitteln ist das Ergebnis einer globalen Arbeitsteilung. Doch weltweit sind die nachhaltig zu bewirtschaftenden Agrarflächen begrenzt – besonders rund um Ballungsgebiete und Megacities. Hier geht die Landwirtschaft in die dritte Dimension: »Vertical Farming« nutzt zum Beispiel mehrstöckige Gebäude innerhalb von städtischen Ballungsgebieten. »Vertical Farming« - Ansätze werden derzeit intensiv weiterentwickelt, um die Effizienz von Energie- und Ressourcennutzung zu steigern – zum Beispiel über die Nutzung von Stoffkreisläufen. Auch die Herstellung von Pharmawirkstoffen in Pflanzen gelingt in der Vertikalen. Fraunhofer-Forscherinnen und -Forscher arbeiten an entsprechenden Lösungen.

Gemüseanbau mitten in der Stadt? Die Idee, Gemüse und Kräuter, die im Supermarkt verkauft werden, zum Beispiel auf dessen Dach oder an Fassaden der anliegenden Bürogebäude anzubauen, anstatt sie von weit her zu transportieren, findet viele Befürworter. Idealerweise liegt die Ware – morgens geerntet – dann frisch in den Regalen, ohne Einbußen an Geschmack und Vitaminen und ohne hohe Transportkosten verursacht zu haben.

## Gemüseanbau in der Stadt für die Stadt

Eine lokale Nahrungsmittelversorgung wird künftig immer wichtiger. Zum einen wächst die Weltbevölkerung – Experten befürchten, dass es schon um das Jahr 2050 zu einer Lebensmittellücke kommen könnte. Zum anderen verlangen Kunden zunehmend nach lokalen Produkten. Doch gerade in Metropolregionen und Megacities sind die Anbauflächen begrenzt, sodass die Nachfrage an Obst, Gemüse und Getreide bereits heute nicht gedeckt werden kann. Es sind daher innovative, systemische Ansätze notwendig, um zukünftig eine nachhaltige Versorgung mit Nahrungsmitteln sicherzustellen. Solche sind das »Urban Farming«, bei dem Gemüse in Gewächshäusern auf Gebäudedächern angebaut wird, und das »Vertical Farming«, also der vertikale Anbau von Pflanzen und Gemüse an Gebäudefassaden oder über mehrere Ebenen in Gebäuden. Diese Ansätze stoßen derzeit in zahlreichen Ländern auf großes Interesse. Denn Licht, Wasser, Wärme und Nährstoffe,

also alles, was Pflanzen zum Wachsen benötigen, sind im urbanen Raum verfügbar. Das Einsparpotenzial ist hierbei durch intelligente Verknüpfung von (Rest-)Stoff- und Energieströmen mit der Gebäudeinfrastruktur sogar erheblich.

Platz für »Urbane Farmen« gibt es ausreichend. Berücksichtigt man allein die Flächen, die sich auf Flachdächern auf Nicht-Wohngebäuden in Deutschland bieten, kommt man auf mehr als eine Billion Quadratmeter. Rund ein Drittel davon kann für den Anbau von Pflanzen in Dachgewächshäusern genutzt werden. Damit könnten ca. 3,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr gebunden werden – das entspräche etwa 10 Prozent der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der industriellen Betriebe in Deutschland. Was in der Theorie einfach klingt, muss in der Praxis jedoch ökonomisch effizient in puncto Produktionsgeschwindigkeit und -kosten sowie Skalierbarkeit optimiert werden. Der Ansatz, hochwertige Produkte wie etwa pharmazeutisch aktive Substanzen in Pflanzen herzustellen und damit die Wertschöpfung pro Quadratmeter Anbaufläche zu erhöhen, ist hier ein interessanter Ansatz.

## Urban Farming: inFarming®-Konzept des Fraunhofer UMSICHT

Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT entwickeln im inFarming®-Konzept Ansätze für gebäudeintegrierte Landwirt-

schaft auf Gebäudedächern und optimieren entsprechende Techniken und Anbauprozesse. Konkret heißt das: Auf dem Flachdach eines fünfgeschossigen Bürogebäudes soll ein Gewächshaus zur Gemüsezüchtung entstehen. Darüber hinaus kann Moos die Gebäudefassade künftig vollständig bewachsen und damit Feinstaub binden. Wasser wird in geschlossenen Kreisläufen genutzt und aufbereitet. Abfall findet Verwendung entweder als Nährstoff- oder Energiequelle für Licht oder Wärme. Einen Prototyp für das inFarming® entwickeln die Forscherinnen und Forscher mit ihrem amerikanischen Partner BrightFarm Systems am Fraunhofer-inHaus-Zentrum in Duisburg.

Zudem entsteht in Oberhausen aktuell auf etwa 1200 Quadratmeter das erste Anwendungszentrum für gebäudeintegrierten Gartenbau nach dem inFarming®-Konzept.

Prof. Görge Deerberg, Hans-Jürgen Körner  
Fraunhofer UMSICHT, [www.umsicht.fraunhofer.de](http://www.umsicht.fraunhofer.de)

Dr. Johannes Buyel, Andreas Reimann  
Fraunhofer IME, [www.ime.fraunhofer.de](http://www.ime.fraunhofer.de)

## »Next Generation Vertical Farming« am Fraunhofer IME

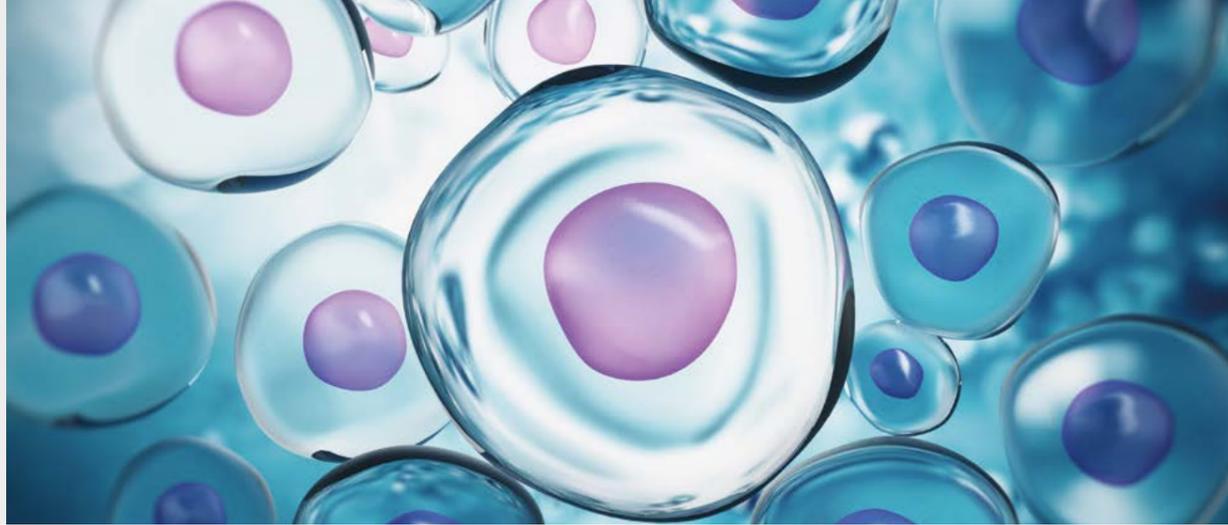
Welche Anforderungen liegen dem »Vertical Farming« zugrunde? Dieser Frage widmen sich Experten des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Hierbei dient eine automatisierte Pflanzenproduktionsanlage mit zentraler »Vertical Farming«-Einheit als Hightech-Versuchsfeld. Die »Vertical Farming«-Einheit besteht aus acht Ebenen mit einer effektiven Kultivierungsfläche von etwa 550 Quadratmetern. Je nach Spezies und Produktionsmodus können so bis zu 100 Kilo Pflanzenbiomasse pro Woche oder entsprechend bis zu 10 000 Pflanzen produziert werden. Ein automatisiertes Logistiksystem erlaubt wahlweise die kontinuierliche oder chargenweise Pflanzenproduktion: Von der Aussaat über die Kultivierung bis hin zur Ernte, an welche sich für die optionale Aufreinigung von Wirkstoffen aus dem Pflanzenmaterial eine Extraktion in zwei 100-Liter-Homogenisatoren anschließt. Integrierte Pflanzenscanner des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS erfassen während des gesamten Pflanzenszyklus anhand verschiedener Parameter,

wie die Pflanzen wachsen und gedeihen und bilden so neben der Pflanzenqualitätsüberwachung auch die Basis für Pflanzenzüchtungsansätze. Die neuartige »Vertical Farming«-Pflanzenproduktionsanlage am Fraunhofer IME wird die Bewertung und Entwicklung zukunftsfähiger Innovationskonzepte unter realen Produktionsbedingungen ermöglichen und einen entscheidenden Beitrag für die biobasierte Wirtschaft von morgen leisten.



1 Kultivierung von Tabakpflanzen.

2 Winterweizen in Prototyp Vertical Farming unter LED-Licht in Pflanzenwachstums-kammer.



## ZELLEN UND STAHL – AUTOMATISIERTE ZELLPRODUKTION

Die medizinische Forschung – sei es in der Pharmaindustrie, in Biotech-Start-ups oder in Kliniken – benötigt aussagefähige Modellsysteme, um neue Medikamente zu entwickeln und zur Zulassung zu bringen. Tiermodelle haben nur eine begrenzte Aussagekraft und kommen daher für umfangreiche künftige Entwicklungsprojekte weniger in Betracht. Zudem ist es das ausgesprochene Ziel von Gesellschaft und Politik, die Zahl von Tierversuchen zu reduzieren. Die Zukunft scheint vielmehr in patientenspezifischen Zellen zu liegen, genauer gesagt in induziert pluripotenten Stammzellen. Bislang mangelt es jedoch an geeigneten Automatisierungstechniken für die Vermehrung der Zellen. Das Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik IBMT arbeitet daran.

Bevor ein neues Medikament einen Platz in den Regalen der Apotheke findet, muss es umfangreiche Zulassungen durchlaufen. Zeigt es den erwarteten Effekt? Und, ganz wichtig: Stellt es keine Gefahr für den Patienten dar? Um solche und ähnliche Fragen zu klären und Medikamente zur Zulassung zu bringen, brauchen Forscherinnen und Forscher Modellsysteme, an denen sie die Medikamente testen können. Langfristig liegt das Ziel darin, die Therapien möglichst genau auf den Patienten zuzuschneiden und den individuellen Therapieverlauf verfolgen zu können.

Tierversuche haben nur eine begrenzte Aussagekraft: Zum einen sind sie ethisch umstritten, zum anderen ist ihre Aussagekraft begrenzt. Auch sind sie teuer. Die Zahl der Tierversuche soll daher gesenkt werden. Zellsysteme, wie sie derzeit in den Laboren verwendet werden, helfen in puncto individuelle Therapien nur wenig. Der Grund: Die Zellen werden im Labor verändert, damit sie sich in Kulturen langfristig vermehren. In dem Moment jedoch, in dem sie »unsterblich« gemacht werden – Experten sprechen von der Immortalisierung –, verhalten sie sich nicht mehr wie körpereigene Zellen.

Ein Modellsystem der Zukunft scheinen patientenspezifische Zellen zu sein, genauer gesagt menschliche induziert pluripo-

tente Stammzellen. Das sind Stammzellen, die sich zu jedem Zelltyp eines Organismus entwickeln können. Um diese Zellen zu erhalten, werden »erwachsene« Zellen – also solche, die hoch spezialisiert und auf ihre jeweilige spezielle Funktion hin ausgerichtet sind – beispielsweise der Haut des Patienten entnommen. Werden spezifische genetische Faktoren in die Zellen geschleust, geschieht etwas fast schon Wundersames: Die spezialisierten Zellen erhalten wieder Fähigkeiten, die eigentlich nur Zellen aus einem Embryo besitzen – sie können sich unbegrenzt teilen und in alle Zellen des menschlichen Körpers entwickeln. Mehr noch, sie können sogar mit den Eigenschaften versehen werden, die die Zellen bei verschiedenen Krankheitsbildern aufweisen würden. Insbesondere die Pharmaindustrie hat diesen Zelltyp als geeignetes Testsystem entdeckt, um neue Wirkstoffe zu entwickeln.

### Bioökonomischer Engpass

Um diese Zellquelle für die biomedizinische Forschung verfügbar zu machen, hat die Europäische Kommission zusammen mit der Europäischen Vereinigung der Pharmaindustrie (EFPIA) zwei große Programme gestartet – StemBANCC und »European Bank for induced pluripotent Stem Cells (EBiSC)«. In diesen

Programmen wurde die Infrastruktur für die Herstellung und Verteilung der Stammzellen etabliert. Doch um die Industriebedürfnisse zu erfüllen, müssen parallel viele Stammzelllinien in ausreichender Menge produziert und auch in die entsprechenden Zielzellen, beispielsweise Herzmuskelzellen, umgewandelt werden. Diese müssen zudem ihre natürliche Funktion auch in der technischen Umgebung zuverlässig erfüllen. Die nötigen Prozessschritte dazu müssen bislang manuell durchgeführt werden. Das ist eine personal- und kostenintensive Angelegenheit. Der Ansatz, Automatisierungstechniken und -prozesse aus der Fertigung von Konsumprodukten zu übertragen, ist an der Komplexität der Natur gescheitert: Die Anlagen sind deutlich weniger effizient als die Mitarbeiter. Sprich: Benötigt werden autonome Systeme, die das »implizite Wissen« eines erfahrenen wissenschaftlichen oder technischen Operateurs »gelernt haben« und auf dieser Basis kontextbasierte Entscheidungen für den weiteren Prozess treffen können.

### Schritte in Richtung Automatisierung

Die Technologien, die für solche autonomen Systeme nötig sind, haben die Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer IBMT bereits entwickelt. Waren bisher zimmergroße Automaten nötig, die die Arbeitsschritte nur nacheinander abarbeiten konnten, so haben die Fraunhofer-Forscher nun ein kleines, parallel und redundant arbeitendes System entwickelt. Über »bioaktive« Materialien, auf denen die Stammzellen gut anhaften können, schaffen die Wissenschaftler Bedingungen, die denen im menschlichen Körper ähneln. Und: Die Mikroskope erfassen einfache Vorgänge – etwa »Zellen teilen sich« oder »Herzmuskelzellen schlagen« – erstmals automatisch. In einem nächsten Schritt wollen die Forscher Technologien der Künstlichen Intelligenz integrieren. Möglich wird dies über künstliche neuronale Netzwerke. Zwar sind solche bereits auf dem Markt erhältlich, allerdings mangelt es an den entsprechenden Lerninhalten und Beispieldaten, um den Ansatz der Künstlichen Intelligenz in die Produktion menschlicher Zellen zu überführen. Denn ohne diese Daten wird es keine

autonomen Zellproduktionssysteme geben – ebenso wenig, wie es autonome Fahrzeuge ohne Kartendaten und gespeicherte Fahrsituationen geben wird. Es muss eine gemeinsame Kraftanstrengung sein, diese Daten zu erzeugen. Hier setzt das Fraunhofer IBMT an.

Prof. Heiko Zimmermann  
Fraunhofer IBMT, [www.ibmt.fraunhofer.de](http://www.ibmt.fraunhofer.de)



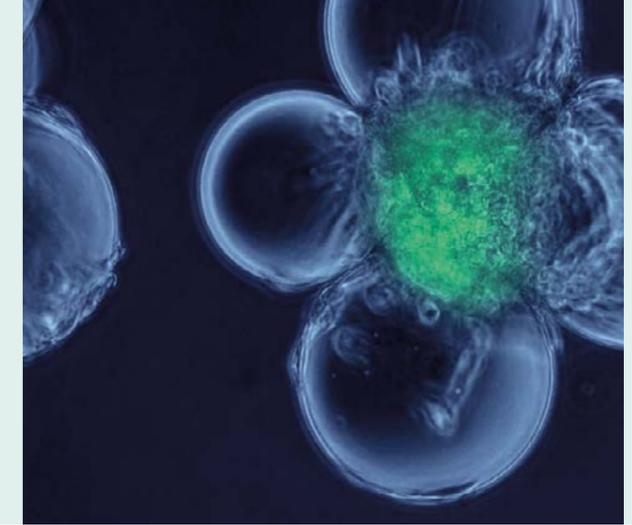
## AQUAKULTUREN – TEIL EINER NACHHALTIGEN NAHRUNGSMITTELPRODUKTION

Die Zucht von Fischen in Aquakulturen hat einen rasanten Aufschwung genommen. Prognosen deuten an, dass sich die Menge des weltweit produzierten Fisches zwischen 1980 (4,6 Millionen Tonnen) und 2020 (73,8 Millionen Tonnen) nahezu um den Faktor 20 vervielfachen wird. Sicher ist, bereits heute übersteigt die Menge des Fisches aus Aquakulturen Studien zufolge die weltweit gefangene Menge an Wildfang. Nachhaltiges Wachstum ist allerdings limitiert. Die Verfügbarkeit von Wasser in guter Qualität, die Gesunderhaltung der Fische sowie die Konkurrenz durch alternative Nutzungsformen an optimalen Standorten, ungenügende Investitionen in die Infrastruktur, Verfügbarkeit von Setzlingen und Futter und andere Herausforderungen schränken das Potenzial ein. Durch die Entwicklung neuer Technologien in der Aquakultur können jedoch zukünftige Märkte bedient werden. Daran arbeitet die Fraunhofer-Einrichtung für Marine Biotechnologie und Zelltechnik EMB in Lübeck.

Aquakulturen werden heutzutage hauptsächlich in offenen Gewässern betrieben, zum Beispiel in offenen Netzkäfigen im Meer. Das limitiert die Standortwahl. Außerdem entweichen Abwässer und chemische Verschmutzungen – wie Ausscheidungen, Futter und Medikamente – unkontrolliert aus der Anlage und machen die Fische anfällig für Parasiten. Hier kommen landbasierte Anlagen ins Spiel, in denen geschlossene Wasserkreisläufe zur Zucht der Organismen genutzt werden und lediglich 5 bis 10 Prozent des Prozesswassers pro Tag durch Frischwasser ersetzt werden müssen. Diese Anlagen erlauben zudem eine kontrollierte Aufzucht des Fisches ohne den Einfluss schädlicher Substanzen. Solange sie mit Wasser versorgt werden können, sind diese Aquakulturen standortunabhängig und können zum Beispiel auch in der Nähe von Megacities betrieben werden. Darüber hinaus sind sie einfacher zu schützen als offene Anlagen oder Netzkäfige im Meer. Nach dem Vorbild in der Natur werden derzeit ökologische Alternativen für die Zucht von Fischen und anderen aquatischen Organismen entwickelt, die Kreisläufe und Nebenstoffströme nutzen und mit erhöhter Effizienz arbeiten – etwa indem Fische, Algen und Muscheln gemeinsam gehalten werden. Die Aufrechterhaltung eines solchen, sehr stark vereinfachten Ökosystems bringt zahlreiche Herausforde-

rungen mit sich, die bisher noch unzureichend untersucht sind. Dem Fraunhofer EMB steht die größte Forschungsanlage für landbasierte multifunktionale Aquakulturen in Deutschland zur Verfügung. Hier werden Fragen zu Stoffströmen, zur Kombination verschiedener Organismen für die optimale Nutzung der verfügbaren Ressourcen, zu neuen Mess-, Steuer- und Regeltechniken, zu Sensoren und anderen Technologien gelöst. Ein weiteres wichtiges Forschungsfeld in der Aquakultur ist das Tierwohl. Bei aquatischen Organismen steht die Wissenschaft noch am Anfang, da bisher selbst die Messung des Stresspegels der Tiere durch geeignete Indikatoren problematisch ist. Die zuvor genannten Forschungsbeispiele bilden nur einen kleinen Teil der Themen ab, die zu einer optimierten, ökologisch und ökonomisch langfristig verträglichen Entwicklung der Aquakultur als wichtigen Teil einer zukünftigen weltweiten Ernährungssicherung beitragen werden. Zukünftig werden sich in der Aquakultur eigenen Industriezweige entwickeln, die sich mit Fischzucht, Fischgesundheit, Anlagenentwicklung und -bau sowie Futtermittelentwicklung beschäftigen.

Dr. Marina Gebert  
Fraunhofer EMB, [www.emb.fraunhofer.de](http://www.emb.fraunhofer.de)



### Zellen als biologischer Rohstoff

Zellen werden im Zentrum der biologischen Transformation stehen. Sie sind der wichtigste Baustein einer Vielzahl biotechnologischer Prozesse, molekularbiologischer Diagnostik und zelltherapeutischer Verfahren. Und sie sind ein nachwachsender Rohstoff. Forscherinnen und Forscher der Fraunhofer EMB haben eine universelle Plattformtechnologie entwickelt, mit der insbesondere adhärenz wachsende Zellen vermehrt werden können. Über 90 Prozent aller Zelltypen sind adhärenz wachsend, das heißt, sie benötigen zwingend eine Oberfläche, um sich zu vermehren und ihre Funktion zu erfüllen.

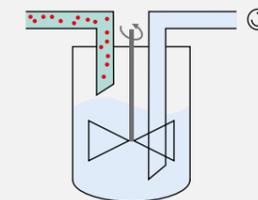
In dem Fraunhofer-Verfahren werden die Zellen zunächst in einem Hydrogel verkapselt. Haben die Zellen sich so weit vermehrt, dass die Kapsel komplett gefüllt ist, wird das Kapselmateriale aufgelöst und die darin gewachsenen Zellen bzw. die Zellsuspension erneut in Kapseln abgefüllt und dort vermehrt. Mittlerweile ist das Verfahren durch die Fraunhofer EMB patentiert. Sobald Zellen preiswert und in großen Mengen, bei hohen Dichten erzeugt werden können, eröffnen sich ganz neue Geschäftsfelder und Märkte. Dazu zählen nicht nur die Nahrungsmittelindustrie, sondern auch die Kosmetik und die Medizin. So lassen sich mit zellbasierten Modellsystemen beispielsweise neue Stoffe charakterisieren und ihre Produktsicherheit gewährleisten.

Mithilfe solcher komplexer Zellsysteme ist es unter anderem möglich, auf Patienten zugeschnittene Immun- oder Gewebetherapien auf den Weg zu bringen. Diese Modellsysteme helfen dabei, die Zahl der Tierversuche zu reduzieren.

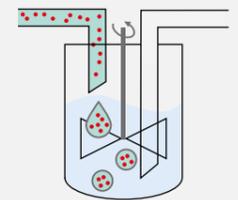
Dr. Daniel Rapoport  
Fraunhofer EMB, [www.emb.fraunhofer.de](http://www.emb.fraunhofer.de)

### Zyklische Prozessführung

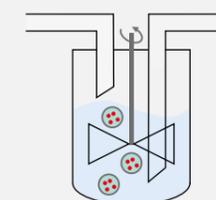
**Phase 1: Vorlegen**  
Vorlegen von Zellen (oben) und Medium + Vernetzer (Rührkessel)



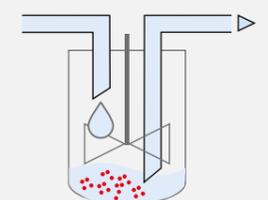
**Phase 2: Verkapselung**  
Eintropfen der Zellsuspension; Bildung von Kapsel-Carriern



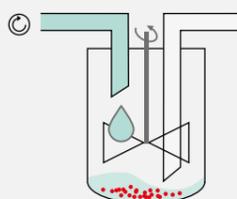
**Phase 3: Expansion**  
Wachstum der Zellen in Kapsel-Carriern; Vermehrung ca. Faktor 10 (zellabhängig)



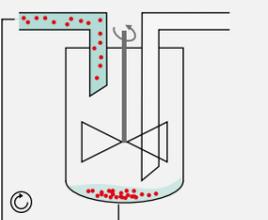
**Phase 4: Kapselauflösen**  
Auflösen der Kapsel-Carriern; Freilegen der Zellen; Waschen der Zellen



**Phase 5: Resuspension**  
Resuspendieren der Zellen im Gelbildner



**Phase 6: Zellernte**  
Umpumpen der Zellen und Wiedervorlage für Schritt 1





## BIOINSPIRIERTE WUNDAUFLAGEN – HEILEN WIE DIE NATUR

Im Hinblick auf die demographische Entwicklung und den zunehmenden Kostendruck im Gesundheitswesen spielen moderne Wundbehandlungen eine immer größere Rolle. Darüber hinaus stellen besonders schlecht heilende Hautverletzungen – wie zum Beispiel chronische und großflächige Wunden – eine medizinische Herausforderung dar. Auch bei den jährlich weltweit mehr als 6 Millionen schweren Verbrennungen bedarf es geeigneter Verbände für einen umgehenden Wundverschluss, um Infektionen, Flüssigkeits- und Elektrolytverlusten entgegenzuwirken, Schmerzen zu lindern und Amputationen zu verhindern. Mit biologischen Wundauflagen kann dieser hohe medizinische Bedarf gedeckt werden.

Hautgewebe menschlicher und tierischer Herkunft stehen für die Wundversorgung nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung. Zudem bringt patientenfremdes Spendergewebe immer ein Infektionsrisiko mit sich. So kommen derzeit vor allem Gerüststrukturen aus synthetischen Polymeren zur Wundabdeckung zum Einsatz. Diese Materialien können jedoch nur für eine kurze Zeit auf der Wunde verbleiben. Sie sind zudem nicht so elastisch wie die unversehrte Haut, weshalb es zu Kontraktionen und Spannungen kommt. Das ist nicht nur unangenehm für den Patienten, sondern beeinträchtigt nicht selten auch die Wundheilung.

Am Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS werden neuartige Biomaterialien für dermale Anwendungen entwickelt. Die Materialien sind biologisch kompatibel und immunologisch verträglich. Je nach Anwendungsgebiet besitzen sie die entsprechende biologische und mechanische Stabilität. Inspiriert werden diese Materialien von der Biologie – insbesondere den Faserproteinen Elastin und Kollagen. Dass Haut, Lungen, Blutgefäße oder Knorpel zugleich so elastisch, robust und widerstandsfähig sind und die Belastungen eines ganzen Lebens bewältigen, ist in erster Linie dem Zusammenspiel dieser beiden Proteine zu verdanken: Fasern aus Kollagen weisen eine hohe Zugfestigkeit auf und verleihen auf diese Weise den Geweben mechanische

Stabilität. Elastin besitzt dazu komplementäre Eigenschaften und garantiert als Hauptbestandteil elastischer Fasern die Dehnungsfestigkeit vieler Gewebe. Die Wundauflagen können vom Körper vollständig abgebaut werden und widerstehen doch physikalischen Beanspruchungen.

Neben ihren günstigen mechanischen Eigenschaften können die bioinspirierten Wundauflagen nach dem Vorbild der Natur funktionalisiert werden: So besitzen die Hautfasern aus dem Labor die Fähigkeit, überschüssige Enzyme zu binden, die neu entstehendes Gewebe in unerwünschter Weise abbauen. Darüber hinaus unterstützen die Fasern die Neubildung von Geweben, indem sie die Ansiedlung von Hautzellen im Wundgrund ermöglichen.

Im Labor werden die Proteine biotechnologisch hergestellt oder aus tierischem Gewebe gereinigt. Anschließend werden die Eiweiße zu Fasern weiterverarbeitet. In der Entwicklung befindet sich ein Verfahren, das Eiweiße elektrisch zu Nanofasern »spinnt«. Auf diese Weise lassen sich Composite in Form von Vliesen herstellen. Der Vorteil: Es lassen sich große Mengen an Fasern herstellen.

Dr. Christian Schmelzer  
Fraunhofer IMWS, [www.imws.fraunhofer.de](http://www.imws.fraunhofer.de)

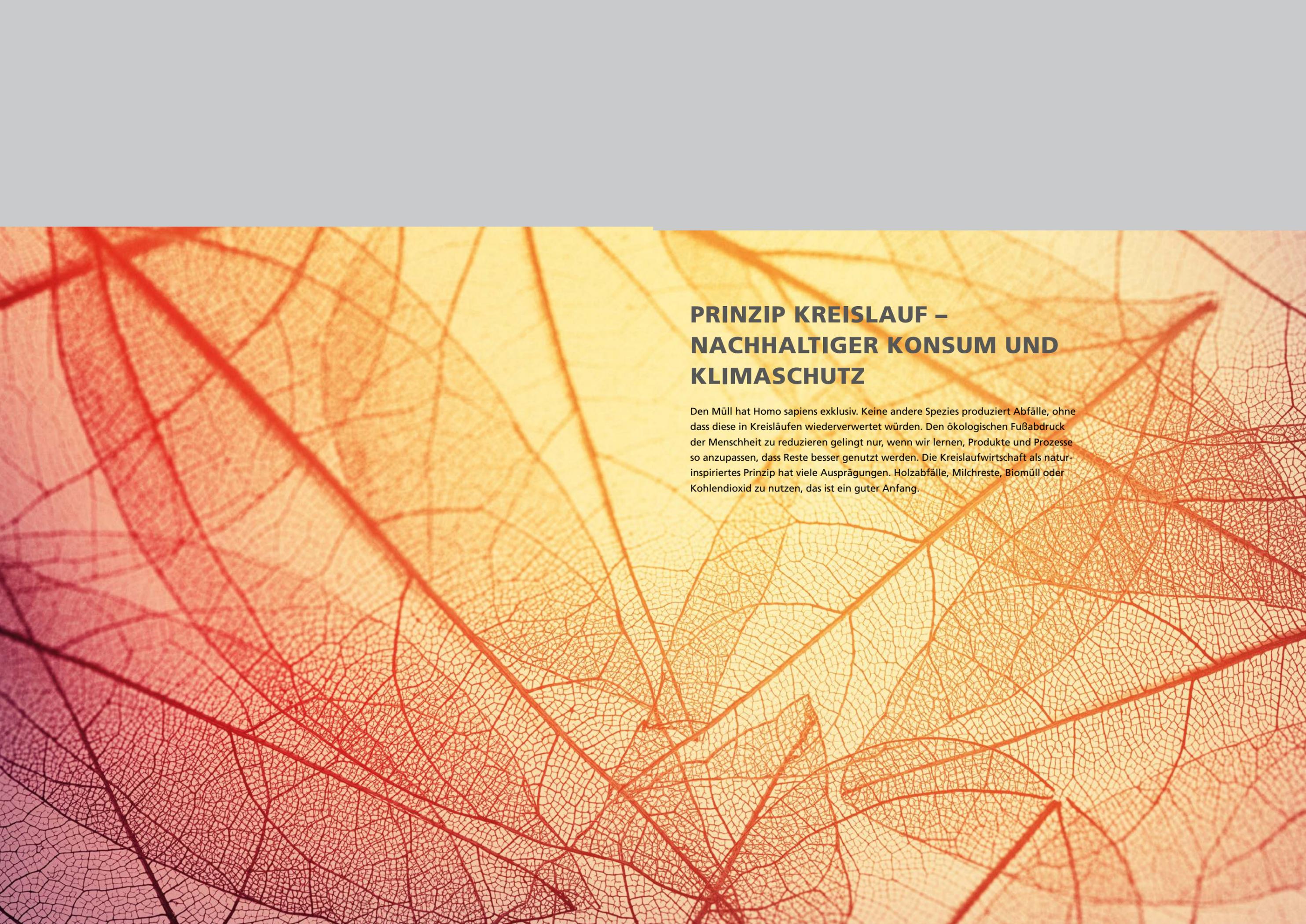
## OBERFLÄCHEN: BESEITIGUNG VON BIOLOGISCHEM BEWUCHS

Mikroorganismen aus dem Meerwasser brauchen konstante Lebensbedingungen: Sie wachsen in einem durch den Salzgehalt des Meeres bestimmten pH-Wert-Bereich und bilden auf dem Schiffsrumpf einen sogenannten Biofilm. Für die Schifffahrt ist dieser Bewuchs, sogenanntes Biofouling, problematisch: Durch die zunehmende Oberflächenrauheit nimmt der Strömungswiderstand zu. Der Treibstoffverbrauch schnell in die Höhe. Ein nachhaltiger Schutz vor Biofouling ist deshalb mit Blick auf den Treibstoffverbrauch und die Emission von Treibhausgasen ökonomisch und ökologisch wichtig. Das Fraunhofer IMWS hat eine nachhaltige Methode entwickelt, mit der Schiffsrümpfe dauerhaft und ohne den Einsatz giftiger Farben oder Lacke geschützt werden können. Dabei machen die Forscherinnen und Forscher sich die Kenntnis der Lebensumstände der Meeresorganismen zunutze: Aus der Meeresmikrobiologie ist bekannt, dass Meerwasser-Mikroorganismen in Süßwasser nicht mehr weiter wachsen und absterben. Auf derselben Oberfläche siedeln sich im Süßwasser jedoch rasch andere Mikroorganismen an – und umgekehrt. Grund dafür ist eine Änderung des pH-Werts, die mit dem Salzgehalt des Wassers korreliert. Basierend auf diesen grundlegenden Kenntnissen zur Biofilmbildung wurde ein elektrochemisches Antifouling-System entwickelt, das zyklisch den pH-

Wert verändert und damit die Lebensbedingungen für Mikroorganismen deutlich verschlechtert. Es reicht dabei aus, nur direkt an der Oberfläche des Schiffs den pH-Wert zu verändern, um die Biofilmbildung deutlich zu verringern. Mit einer elektronischen Steuerung lässt sich einstellen, wie häufig der pH-Wert-Wechsel rund um das Schiff erfolgen soll. Auch bei der Herstellung des Lacks wurde auf die Umweltverträglichkeit der Lackkomponenten geachtet. Fossile Rohstoffe werden durch ökologische Produkte aus Lignin ersetzt, ein Abfallprodukt aus der Papierindustrie.

Prof. Andreas Heilmann  
Fraunhofer IMWS, [www.imws.fraunhofer.de](http://www.imws.fraunhofer.de)





## **PRINZIP KREISLAUF – NACHHALTIGER KONSUM UND KLIMASCHUTZ**

Den Müll hat Homo sapiens exklusiv. Keine andere Spezies produziert Abfälle, ohne dass diese in Kreisläufen wiederverwertet würden. Den ökologischen Fußabdruck der Menschheit zu reduzieren gelingt nur, wenn wir lernen, Produkte und Prozesse so anzupassen, dass Reste besser genutzt werden. Die Kreislaufwirtschaft als naturinspiriertes Prinzip hat viele Ausprägungen. Holzabfälle, Milchreste, Biomüll oder Kohlendioxid zu nutzen, das ist ein guter Anfang.



## FASERN AUS FRÜCHTEN – MULTITALENTE AUS DEM BIOMÜLL

Produktverpackungen aus Kunststoff gelten nicht gerade als umweltfreundlich. Trotzdem geht bislang kaum ein Weg an ihnen vorbei, denn sie sind in puncto Hygiene, Haltbarkeit und Verfügbarkeit bis dato kaum zu übertreffen. Forscher des Fraunhofer-Instituts für Silicatforschung ISC und dessen Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS) arbeiten an Alternativen: Sie entwickeln biologisch abbaubare Verpackungsmaterialien, für die unter anderem auch biogene Abfallstoffe verwendet werden. Mit der Analyse nachgelagerter Recyclingprozesse wollen sie den Kreislauf künftig schließen.

Ein einziger Einkauf im Supermarkt – und der Mülleimer quillt über. Schon lange gibt es Ansätze, Kunststofffolien und Co. aus fossilen Rohstoffen durch bioabbaubare Verpackungen zu ersetzen. Allerdings sind diese durchlässig gegenüber Sauerstoff, Wasserdampf und Aromastoffen – sie können also die Mindesthaltbarkeit von Lebensmitteln nicht gewährleisten. Schwierig ist dabei insbesondere die Verpackung feuchter Produkte wie frischer Fisch, Fleisch, Käse und von Wurstwaren.

### Funktionsbeschichtung bioORMOCER®

Mit der Entwicklung sogenannter bioORMOCER®e haben Forscherinnen des Fraunhofer ISC bioabbaubare Funktionsbeschichtungen geschaffen, die Biokunststoffe mit den notwendigen Eigenschaften für Verpackungsmaterialien ausstatten. bioORMOCER®e sind anorganisch-organische Hybridpolymere – eine Werkstoffklasse, die gute Barrieren gegenüber Gasen und Dämpfen aufweist und sich deshalb bestens als Ausgangsmaterial für die Entwicklung biodegradierbarer Verpackungen anbietet. bioORMOCER®-Beschichtungen eignen sich sowohl für Biokunststoffe als auch für Papier und können dazu beitragen, auch bei beschichteten Papierverpackungen etwa für To-go-Produkte die Umweltfreundlichkeit des Papiers zu

erhalten. bioORMOCER®-Beschichtungen sind der wesentliche Baustein, der Biokunststoffe für die Industrie als Verpackungsmaterial attraktiv macht. Damit ist die Grundlage für einen erfolgreichen Marktzugang gelegt, sollen Kunststoffverpackungen und papierbasierte Verpackungen zukünftig umweltfreundlicher werden.

### Lebensmittelabfälle für bioabbaubare Verpackungen nutzen

Um Wertstoffe im Kreislauf zu halten, sind neue Ideen gefragt. Für bioORMOCER®e werden momentan nachwachsende Rohstoffe eingesetzt. Diese können aus Reststoffen der Lebensmittelverarbeitung gewonnen werden. Damit beschäftigen sich die Forscherinnen und Forscher der Fraunhofer-Projektgruppe: Sie erschließen faserreiche Nebenprodukte der Lebensmittelverarbeitung, insbesondere aus der Früchteverarbeitung, als Rohstoff für die Bio-Verpackung. Im Fokus stehen die darin enthaltenen langkettigen verzweigten Zucker aus der vielfältigen Stoffgruppe der Hemicellulosen, die in der menschlichen Verdauung nicht zerlegt und somit nicht als Energiequelle genutzt werden können. Hemicellulosen haben Eigenschaften, die sie für Sauerstoff- und Aromabarrieren interessant



machen. Aktuell wird in der Projektgruppe an der Identifizierung geeigneter Ausgangsmaterialien sowie an passenden Extraktionsverfahren gearbeitet. Zielsetzung ist, Moleküle zu gewinnen, die auf dem Rohstoffmarkt mit Erdöl-basierten Rohstoffen für Beschichtungen konkurrenzfähig sind. Um die Technologie forciert voranzutreiben, steht eine Technikumsanlage zur Verfügung: Sie stellt ausreichend große Mengen der verzweigten Zuckermoleküle her, um daraus Beschichtungen und Lacke produzieren zu können, und kann als Bioraffinerie-Modul in kleinen Agro-Bioraffinerien und Biogasanlagen zum Einsatz kommen.

### bioORMOCER®:

#### Ein Material mit vielfältigen Potenzialen

Bioabbaubare Beschichtungen bieten auch in anderen Bereichen zahlreiche Vorteile. So können biobasierte und »vegane« Textilfasern auf Cellulosebasis – also Baumwolle oder Viskose – über eine solche Schicht neue Funktionalitäten erhalten: etwa Wasser abweisen, gute Haftung in Kunststoffen, genauer gesagt in Bioverbundwerkstoffen, gewährleisten oder UV-Strahlen abblocken. Hier sind noch zahlreiche Forschungsfelder offen, um innovative Material- und Produktideen im Sinne nachhaltiger Kreislaufwirtschaft zu entwickeln.

Für die Beschichtung von Textilien haben die Forscher am Fraunhofer ISC bereits eine Lösung entwickelt: Lacke namens InnoSolTEX®, die verschiedene Funktionen in einer Rezeptur realisieren: antimikrobiell, antistatisch, flammhemmend, wasserabweisend oder -anziehend oder waschbeständig. Nachwachsende Rohstoffe auch für solche Funktionsbeschichtungen einzusetzen und so bei Textilien aus Naturfasern trotz hoher Funktionalisierung eine vollständige biologische Abbaubarkeit zu erreichen, wird Gegenstand weiterer Forschung sein.

### Intelligentes Recycling für geschlossene Wertstoffkreisläufe

Neben der Materialentwicklung arbeiten Forscher des Fraunhofer ISC und der Projektgruppe intensiv an intelligenten Recyclingverfahren. Hochselektive Trennverfahren, eine innovative Pilot-Sortieranlage und die recyclinggerechte Konzeption von Werkstoffen und Produkten – das »Design for Recycling« – schaffen die Grundlage für die spätere einfache, ressourcenschonende und rentable Recyclierung.

Dr. Stefan Hanstein  
Fraunhofer-Projektgruppe (IWKS), [www.iwks.fraunhofer.de](http://www.iwks.fraunhofer.de)

Dr. Sabine Amberg-Schwab  
Fraunhofer ISC, [www.isc.fraunhofer.de](http://www.isc.fraunhofer.de)

# MEHR AUS WENIGER – NÄHRSTOFFMANAGEMENT IN DER LANDWIRTSCHAFT

Keine Frage, Pflanzen brauchen Nährstoffe, um zu wachsen. Doch mineralische Düngemittel, im Überschuss oder unspezifisch ausgebracht, belasten die Umwelt. Daher ist auch Gülle alles andere als optimal. Problematisch ist vor allem die Überdüngung: Dann gelangen die Nährstoffe in Grundwasser und Oberflächengewässer, reichern sich hier an und schädigen die damit verbundenen Ökosysteme. Soll in Zukunft die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung weiter verbessert werden, ohne die Umwelt zu schädigen, müssen die Kreisläufe der Natur wieder geschlossen werden. Es gilt, die Nährstoffe, die den Feldern mit der Ernte entnommen wurden, gezielt und in pflanzenverfügbarer Form wieder zurückzuführen. Hier setzt das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB mit seinen Forschungen an.

Die Ähren wogen sanft im Wind – und bieten einen idyllischen Anblick. Um wachsen und gedeihen zu können, brauchen Korn und Gemüse Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor, Kalium, Kalzium und Schwefel, die sie über ihre Wurzeln aus dem Boden aufnehmen. Nach der Ernte werden die Pflanzen als Futtermittel, Nahrungsmittel oder Industrierohstoff genutzt oder auch als Ausgangsstoff für Bioenergie. Ergo: Die Nährstoffe, die in den Pflanzen gespeichert waren, gehen dem Boden verloren. Nur ein Teil landet in Form von Mist, Gülle oder Kompost wieder direkt auf dem Feld, was jedoch wegen der fehlenden Umweltverträglichkeit durch starke Überdüngung sehr streng reglementiert wurde. Da sich Mastbetriebe und Pflanzenbau meist jedoch in unterschiedlichen Regionen befinden, werden die Nährstoffe dabei sehr ungleich verteilt. Um den entstehenden Nährstoffmangel in Gebieten mit intensivem Pflanzenbau auszugleichen, greifen die Landwirte daher zu industriell hergestellten, mineralischen Düngemitteln.

## Herkömmliche Nährstoffgewinnung

Bislang basieren industrielle Mineraldünger auf nicht erneuerbaren Ausgangsstoffen. Phosphordünger beispielsweise stammen hauptsächlich aus abgebauten Rohphosphaten. Die Lagerstätten sind allerdings zunehmend mit Schwermetallen wie Uran oder Cadmium verunreinigt. Stickstoff dagegen ist in der Atmosphäre nahezu unbegrenzt verfügbar – der gasförmige Stickstoff aus der Luft wird in Ammoniak überführt. Doch

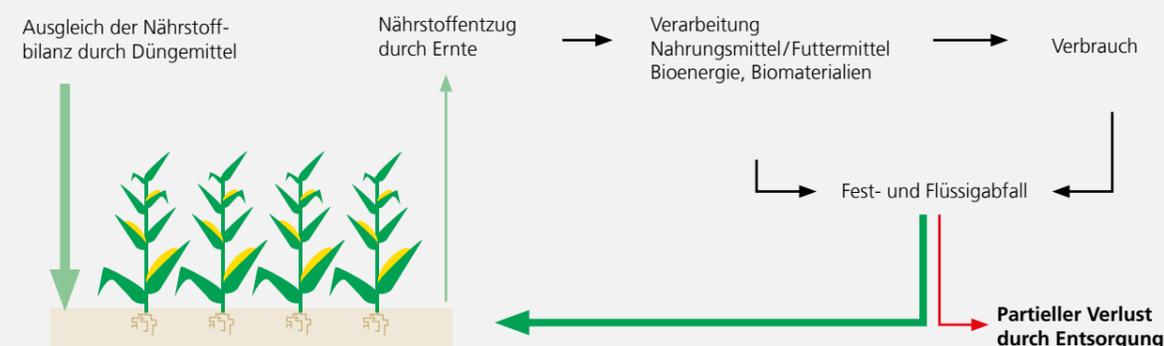
auch hier gibt es einen Haken: Es ist viel Energie nötig, um synthetisch Ammoniak als Ausgangsstoff für die Synthese von Stickstoffdüngern herzustellen – genauer gesagt etwa 2 Prozent der Welt-Primärenergieerzeugung. Für die Herstellung von Stickstoffdünger werden pro Jahr rund 5 Prozent des weltweiten Erdgases verbraucht.

## Nährstoffe gehen verloren

Die mit der Ernte entnommenen Nährstoffmengen gehen derzeit im Wesentlichen über die Abwasser- und Abfallsysteme verloren. In den meisten kommunalen Kläranlagen beispielsweise werden Stickstoffverbindungen wie Ammonium und Nitrat mithilfe von biologischen Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen entfernt und – unter hohem Energieverbrauch – in gasförmigen Stickstoff umgewandelt, der in die Luft entweicht. Phosphat wird typischerweise mithilfe von Aluminium- oder Eisensalzen chemisch aus dem Wasser gefällt. Die Phosphatsalze, die dabei entstehen, landen auf Mülldeponien, da sie nicht pflanzenverfügbar sind und Eisen sowie Aluminium in Konzentrationen freisetzen können, die für die Pflanzen toxisch sind. Schätzungen zufolge gehen auf diese Weise weltweit etwa 4,3 Millionen Tonnen Phosphor pro Jahr verloren.



## Nährstoffflussbild für nachhaltiges Kreislaufsystem



## Problem Überdüngung

In Gegenden mit intensiver Tierhaltung verfügen die Böden wegen der langjährigen Ausbringung von Gülle sogar oft über zu viele Nährstoffe. Werden Mineraldünger falsch oder in zu großer Menge aufgebracht, werden sie aus dem Boden ausgewaschen und landen im Grundwasser oder in Oberflächengewässern, wo sie sich anreichern und die Ökosysteme verändern. Auch das Düngen mit Gärresten aus der Biogasproduktion kann nachteilig sein: Denn die Nährstoffzusammensetzung dieser Dünger mit Stickstoff, Phosphor und Kalium entspricht nicht dem jeweiligen Bedarf der Pflanzen. In der Praxis der Düngung mit diesen Reststoffen wird der Nährstoffbedarf nur auf einen Nährstoff, üblicherweise Stickstoff, bezogen. Im Umkehrschluss heißt das: Die anderen Nährstoffe werden überdosiert. Dies kann insbesondere in Gebieten mit intensiver Tierhaltung dazu führen, dass der Boden mit Nährstoffen übersättigt ist und die Umwelt geschädigt wird.

## Nachhaltiges Nährstoffmanagement

Soll in Zukunft die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung weiter verbessert und gleichzeitig die Grenzen der Natur geachtet werden, müssen die Kreisläufe der Natur wieder geschlossen und die Nährstoffe vom Feld nach der Ernte wieder gezielt zurückgeführt werden. Das Fraunhofer IGB entwickelt daher nachhaltige, kosteneffiziente Technologien und Strategien für ein integriertes Ressourcenmanagement und setzt diese entsprechend um. Der Schwerpunkt liegt auf innovativen Technologien und neuartigen Prozessen, mit denen sich Nährstoffe aus Abwasser und organischen Reststoffen wie Gülle und Gärresten zurückgewinnen lassen.

Mit Erfolg: In neuartigen Prozessen werden die Nährstoffe so gewonnen, dass sie als vollwertige Produkte durch Industriepartner vermarktet und direkt in der Landwirtschaft eingesetzt werden können. Die Produkte sind anwendungsspezifisch und lassen sich je nach Pflanzenart oder Bodenbeschaffenheit mischen oder formulieren. Sie werden sowohl als Feststoff als auch in flüssiger Form hergestellt und vertrieben.

Dr. Iosif Mariakakis  
Fraunhofer IGB, [www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

## DIE MILCH MACHT'S – CHEMIKALIEN AUS MOLKE

Bei der Käseherstellung fallen große Mengen Molke an. Stofflich genutzt werden davon bisher nur etwa 40 Prozent. Die restlichen 60 Prozent samt der enthaltenen wertvollen Peptide und Proteine werden nicht verwendet. Dies ist vor allem den heute verfügbaren Fraktionierungsverfahren zuzuschreiben: Sie sind aufwendig und ineffizient. Es lohnt sich schlichtweg nicht, die restliche Molke aufzubereiten. Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB arbeiten Forscherinnen und Forscher an technologischen Lösungen, um derartig komplexe Stoffgemische mit kompakter und effizienter Technik selektiv trennen zu können. Sie vereinen die Vorteile einer Filtration mit elektrophoretischen Effekten. Ein vielversprechender Ansatz ist die Elektromembranfiltration. Mit ihr können bisher ungenutzte Wertstoffe wirtschaftlich für hochwertige Produkte in den Bereichen Medizin sowie Pharma-, Lebensmittel- und Bioprozessindustrie gewonnen werden.

### Proteine und Peptide aus Molke mit interessanten Eigenschaften

Dabei hätte die Molke durchaus einiges zu bieten: Denn neben Milchzucker und Mineralstoffen enthält sie hochwertige Molke-Proteine und Peptide, die beispielsweise in der Bioprozessindustrie und in der Lebensmittelindustrie zur Anwendung kommen können. Einige Peptide wie Casein-Makropeptid, kurz CMP, sind darüber hinaus auch für den Medizinbereich relevant: Sie hemmen Viren und Bakterien und mildern die Beschwerden, die diese verursachen. So schränkt CMP beispielsweise die Bildung von Plaque und Karies ein. Andere Wertstoffe aus Molke wiederum eignen sich hervorragend für Säuglings- und Sportnahrung sowie für die klinische Ernährung. Die Proteine aus der Molke können zudem als natürlicher, umweltschonender Ersatz für künstlich hergestellte Schaumbildner, Emulgatoren, Geliermittel oder Wasserbinder dienen. Aktuelle Verfahren für die Fraktionierung und Konzentrierung von Proteinen sind jedoch sehr aufwendig, es sind mehrere Prozessstufen nötig. Eine weitere Problematik: Die Prozessstufen erfordern häufig eine erhöhte Temperatur,

teilweise müssen auch Säuren, Lösungsmittel oder Puffer zugegeben werden. Es werden also zum einen entsprechend viel Chemikalien und Energie verbraucht, zum anderen leidet die Proteinstruktur bei diesem Prozedere – mitunter kann sie gar zerstört werden.

### Schlüssel zur wirtschaftlichen Fraktionierung: Elektromembranfiltration

Eine Möglichkeit, die Wertstoffe aus Molke auf wirtschaftliche Art und Weise herauszulösen, ist die Elektromembranfiltration (EMF). Das Verfahren trennt die Peptide und Proteine zum einen über eine mechanische Membran, zum anderen über ein elektrisches Feld. Die Wertstoffe werden daher nicht nur über ihre Molekülgröße, sondern auch über ihre elektrische Ladung getrennt. Die Selektivität ist daher sehr hoch – was sich wiederum in einer guten Wirtschaftlichkeit niederschlägt. Auch in ökologischer Hinsicht ist das Verfahren attraktiv, denn es sind keinerlei Chemikalien nötig.

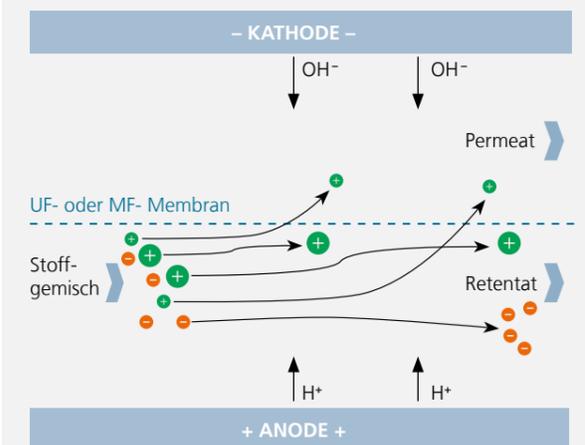
Welches Potenzial in der Elektromembranfiltration steckt, konnten Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer IGB bereits mit einer noch nicht industriell optimierten Demonstrationsanlage zeigen – am Beispiel des Casein-Makropeptids (CMP), das sie aus Molkeabfällen der Mozzarella-Produktion gewannen. Das Ergebnis: In der erhaltenen Substanz machte das CMP 81 Prozent des Gesamt-Proteingehalts aus. Dies ist bereits vergleichbar mit bereits verfügbaren Formulierungen, bei denen der CMP-Anteil zwischen 75 und 85 Prozent liegt. Das Verfahren ist also dazu geeignet, ein kommerziell vermarktbare Produkt zu gewinnen. Doch damit nicht genug: Das Verfahren lässt sich auch anwenden, um ungeladene Moleküle wie Lactose abzutrennen. Auf diese Weise können lactosefreie Lebensmittel hergestellt werden – ein Gewinn für Allergiker.

Die Elektromembranfiltration setzt mit der Membranfiltration und dem elektrischen Feld auf eine zweifache Trennwirkung. Dabei sind beide Trenneffekte separat steuerbar – das Verfahren lässt sich daher gut an die Anforderungen von Kunden oder Produkten anpassen. Das Potenzial ist hoch: Wertstoffe, die bisher ungenutzt blieben, mausern sich zu Rohstoffen, gleichzeitig werden hochwertige Produkte für den Lebensmittel-, Futtermittel-, Medizin-, Pharma- oder Bioprozessbereich erschlossen.

Nach den Basisuntersuchungen im Labormaßstab entwickelten die Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer IGB ein EMF-System, dessen Herzstück aus einer EMF-Zelle besteht. Das EMF-System arbeitet derzeit noch im Semibatch-Modus (»feed and bleed«), die Zulaufmenge beträgt bis zu 1000 Liter pro Stunde – je nach eingestelltem Transmembrandruck. Momentan arbeiten die Forscher daran, das System aufzuskalieren, es kontinuierlich zu betreiben und mit weiteren Stoffquellen zu validieren.

Dr. Carsten Pietzka, Dr. Ana Lucía Vásquez-Caicedo, Siegfried Egner  
Fraunhofer IGB, [www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

### Wirkprinzip der EMF



*Im dargestellten Fall (Kathode auf der Permeatseite) können negativ geladene Stoffe durch das elektrische Feld zurückgehalten werden, auch wenn ihre Molekülgröße unter der Porengröße der Filtrationsmembran liegt. Dies ermöglicht eine höhere Selektivität als bei konventioneller Ultrafiltration.*

## ZU SCHADE FÜR DEN KAMIN – HOLZRESTE ALS ROHSTOFFQUELLE

Holz und verholzte Biomasse wie Stroh haben auch jenseits der Heiz-, Bau- und Möbelindustrie sowie der Landwirtschaft viel zu bieten: So eignen sie sich etwa als Rohstoffe für die chemische Industrie. Anders als etwa Mais oder Raps treten sie dabei nicht in Konkurrenz zu Lebensmitteln, da sie vom Menschen nicht verdaut werden können. Jedoch ist der Transport der frisch geernteten verholzten Biomasse bislang meist wenig effizient. Auch ist es schwierig, minderwertiges Altholz als möglichst hochwertigen Rohstoff zu nutzen und nicht nur zu verbrennen. Bis dato lassen sich Cellulose und Lignin (als Lignin-sulfonat) leicht aus dem Holz isolieren und als Rohstoff weiterverwenden. Doch auch andere Bestandteile wie Hemicellulose und Lignin (nicht als Sulfonat) sind wertvolle Rohstoffe, die sich in zahlreichen Anwendungen einsetzen lassen würden. Fraunhofer-Forscherinnen und -Forscher arbeiten an Lösungen für diese Herausforderungen.

Von der Sonne verwöhnte Standorte in der Nähe des Äquators wie etwa Brasilien können Chemikalien ohne jahreszeitliche Schwankungen günstig und nachhaltig aus Biomasse gewinnen. Für die chemische Industrie in Deutschland und Europa heißt das, mit Innovationen sowie effizienter und nachhaltiger Produktionen zu punkten, um sich im Wettbewerb behaupten zu können. Bislang speist sich die hiesige Produktion größtenteils aus der Nutzung fossiler Energieträger. Hier sind nachhaltige Alternativen gefragt. Dieser Wunsch kommt auch von den Verbrauchern, die zunehmend Einfluss auf die chemische Industrie haben: Sie möchten umweltfreundliche Produkte, deren Inhaltsstoffe sich nicht negativ auf die Umwelt auswirken – sprich solche, die aus nachhaltigen Rohstoffen produziert wurden. Eine Alternative zum Rohöl bietet Holz, das sich in industriellen Bioraffinerien in seine Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin zerlegen lässt. Diese Fraktionen können dort auch weiterverarbeitet und somit für verschiedene Anwendungen nutzbar gemacht werden. Dies kann dazu beitragen, den Klimawandel abzuschwächen und die wachsende Nachfrage an Chemikalien und Materialien zu stillen.

### Konditionierung von Biomasse durch Trocknung oder Torrefizierung

Sollen halmgutartige oder andere verholzte (Rest-)Biomassen – beispielsweise Stroh – genutzt werden, gilt es zunächst einmal, diese Rohstoffe wirtschaftlich und nachhaltig transportieren zu können. Derzeitige Forschungen beschäftigen sich jedoch vor allem mit der Frage: Wie lässt sich solche Biomasse energetisch und stofflich nutzen? Die Entfernungen zwischen den Regionen in Europa, die die notwendige Menge an Holz-Biomasse bereitstellen können – unter anderem Skandinavien und Osteuropa – und den zentralen Industriestandorten, an denen die Biomasse verarbeitet und genutzt wird, wird dabei jedoch außer Acht gelassen. Bislang mangelt es an einem Konzept, wie speziell feuchte und leicht verderbliche Biomasse dezentral vorkonditioniert und somit effizient transportiert werden kann.

Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB wollen diese

Lücke nun schließen. Ihr Ziel: Lignocellulosehaltige Rohstoffe – etwa Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft – sollen mit mobilen Anlagen direkt in der Region ihrer Entstehung so konditioniert werden, dass sie optimal transportiert, gelagert und verwertet werden können. Möglich machen soll es ein flexibler Torrefizierungsprozess. Dabei wird die Biomasse in einer inerten Atmosphäre aus reinem, überhitztem Wasserdampf bei Umgebungsdruck für eine bestimmte Prozesszeit erhitzt. Die Prozesstemperatur liegt jedoch unterhalb des Werts, ab dem eine Karbonisierung (Pyrolyse) zu Kohle stattfindet. Der Torrefizierungsprozess am Fraunhofer IGB basiert auf dem bereits etablierten Prozess der Trocknung mit überhitztem Wasserdampf bei Atmosphärendruck.

In verschiedenen Technikumsanlagen konnte das Fraunhofer IGB das Verfahren bereits demonstrieren. Die Vorteile dieses Konzepts: Anders als bei der herkömmlichen Torrefizierung wird die Biomasse nicht durch Abgase verunreinigt oder durch Oxidation mit Luftsauerstoff degradiert. Somit sind auch die gewonnenen Inhaltsstoffe von hoher Reinheit und hochwertig nutzbar. Der Prozess lässt sich zudem kontinuierlich führen und ist so flexibel ausgelegt, dass er auch für den saisonabhängigen Einsatz mit verschiedenen Ausgangsmaterialien geeignet ist. Die Technologie ist auch in der Skalierung nicht limitiert, sodass sowohl kleine, spezifische Anlagen als auch große Durchsatzmengen realisiert werden können. Am Ende dieser Torrefizierung steht ein hydrophobes Material mit einem auf das Transportgewicht bezogen sehr hohen Brennwert, das beispielsweise für die weitere Nutzung sehr leicht vermahlbar ist. Das heißt: Für die weitere Aufarbeitung kann leicht eine große Reaktionsoberfläche hergestellt werden. Als Weiteres werden neben dem Feststoff die volatil gewordenen Stoffe spezifisch kondensiert. Hier handelt es sich im Wesentlichen um hochpreisige organische Säuren, die direkt als Plattformchemikalien genutzt werden können.

Das zentrale Ziel der Forscher ist es, eine wirtschaftlich nutzbare Technologieplattform zu schaffen. Sie bauten in dem Projekt SteamBio daher einen semimobilen Demonstrator, der etwa

150 Kilogramm verholzte Biomasse pro Stunde durchsetzt. An mehreren Einsatzorten in Deutschland und Spanien werden dabei mindestens sechs verschiedene land- und forstwirtschaftliche Reststoffe torrefiziert, unter anderem Nadelholz, Eiche und Rebschnitt. Die Eingangsmaterialien und die daraus gewonnenen Produkte werden ökonomisch und stofflich charakterisiert, um hieraus dann Geschäftsmodelle zu entwickeln.

### Von minderwertigem Altholz zu hochwertigen Chemikalien

Seit jeher verwendet man Holz, um damit Möbel zu bauen, Papier zu machen oder zu heizen. Doch bioökonomisch gesehen ist Holz generell zu kostbar zum Verbrennen. Nutzungskaskaden sollen Abhilfe schaffen: Der wertvolle Rohstoff soll zunächst hochwertig genutzt werden. Nur was sich nicht für die (werk-)stoffliche Nutzung eignet, soll energetisch genutzt, sprich verbrannt werden. Der Beginn einer solchen Holzverwertungskette liegt zum Beispiel im Organosolv-Verfahren. Mit ihm werden die Holzinhaltsstoffe bei erhöhten Temperaturen mit organischen Lösungsmitteln verfügbar gemacht – in Lignocellulose-Bioraffinerien. Auf diese Weise lassen sich wichtige Rohstoffe für die chemische Industrie herstellen, beispielsweise Milchsäure, Furfural, Aromaten oder Faserstoffe für neue Werkstoffe.

Die Fraunhofer-Institute für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI und für Chemische Technologie ICT sowie das Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP bilden solche Herstellungsprozesse bis zum Pilotmaßstab ab. Mit den gewonnenen Daten und Mustern können die Forscherinnen und Forscher die Wirtschaftlichkeit analysieren und die Nachhaltigkeit ganzheitlich bilanzieren. Dabei untersuchen sie auch Altholz – und erschließen so neue Sekundär-Rohstoffquellen aus dem Altholzrecycling für Bioraffinerieprozesse. Das Fraunhofer WKI bewertet die Stoffströme, in denen Altholz stofflich oder energetisch genutzt wird, in ökologischer Hinsicht. Das Fraunhofer ICT kümmert sich um die verfahrens-



technische Entwicklung verschiedener Aufschlussprozesse, Trenn- und Extraktionsverfahren im Technikumsmaßstab. Und am Fraunhofer CBP werden die Laborentwicklungen zum Aufschluss und zur Fraktionierung der verschiedenen Holzqualitäten zusammengeführt und im Pilotmaßstab weiterentwickelt. Die Pilotanlage liefert zudem Mustermengen im Multi-Kilogramm-Maßstab: Mit diesen lassen sich Anwendungen in den Bereichen Fermentation und Ligninverwertung testen.

#### **Auch Lignin und Hemizellulose lassen sich isolieren**

Bisher wird nur die Zellulose in Prozessen der Zellstoffindustrie aus dem Holz zu Materialanwendungen isoliert. Was die Gewinnung von Lignin und Hemizellulose angeht, mangelt es bislang an Verfahren, und diese Komponenten werden minderwertig zur Energieerzeugung genutzt. Die Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer CBP haben das Organosolv-Verfahren so weiterentwickelt, dass sich mit diesem – getrennt voneinander – auch Lignin und Hemicellulose gewinnen und für weitere Zwecke nutzen lassen. Die notwendigen Prozesse sind am Fraunhofer CBP bereits im Pilotmaßstab etabliert. In aktuellen Forschungsvorhaben optimieren die Forscherinnen und Forscher einzelne Verfahrensschritte, dabei stehen besonders die Einsparung von Prozessmedien und die weitere Integration der Verfahrensschritte im Vordergrund. Aus den gewonnenen Fraktionen können in weiteren Verarbeitungsstufen biobasierte Plattformchemikalien gewonnen werden. So bieten Lignine als Intermediate zur Herstellung von Polymerbausteinen immenses Potenzial, an dem Fraunhofer ebenfalls forscht. Beispiele sind Polyurethanklebstoffe oder EPI-Klebstoffe, die in Verbundvorhaben mit der Industrie zu praxistauglichen Produkten verarbeitet werden. Ein weiteres Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung von Lignin-basierten Druckfarben für den Rollen-Offsetdruck.

Siegfried Egner, Dr. Antoine Dalibard  
Fraunhofer IGB, [www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

Dr. Stefan Friebe  
Fraunhofer WKI, [www.wki.fraunhofer.de](http://www.wki.fraunhofer.de)

Gerd Unkelbach, Dr. Moritz Leschinsky, Dr. Katja Patzsch,  
Dr. Daniela Pufky-Heinrich  
Fraunhofer IGB, [www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)



Lignocellulose  
Bioraffinerie-Anlage.

## VOM KLIMAKILLER ZUM ROHSTOFF – CO<sub>2</sub> IN DER CHEMISCHEN PRODUKTION

Sollen die Ziele der UN-Klimakonferenz in Paris erreicht werden, so reicht der Umstieg auf erneuerbare Energien und Elektroautos allein nicht aus – auch die industrielle Produktion braucht nachhaltige Lösungen. Vor allem solche Produktionen, die verfahrensbedingt viel CO<sub>2</sub> in die Luft entlassen. Ein vielversprechender Ansatzpunkt ist, das entstehende CO<sub>2</sub> als Ausgangssubstanz für die chemische Industrie zu nutzen – und so den CO<sub>2</sub>-Kreislauf der Natur nachzuahmen. Das hat gleich zwei Vorteile: Das Klimagas entweicht nicht mehr in die Atmosphäre, und das bisher als Rohstoff genutzte Erdöl wird ersetzt.

Mit jedem Atemzug stoßen Menschen und Tiere Kohlenstoffdioxid aus. Langfristig wäre das ein Desaster für Natur, Umwelt und Lebewesen, wenn hier nicht die Pflanzen ins Spiel kämen. Denn sie filtern das CO<sub>2</sub>, genauer gesagt spalten es in Kohlenstoff und Sauerstoff auf. Den Kohlenstoff nutzen sie, um zu wachsen und Holz zu produzieren, den Sauerstoff geben sie in die Luft ab, wo wir ihn wiederum atmen können.

Könnte man dieses Prinzip des Kohlenstoffkreislaufs auf die Abgase von Industrien übertragen und somit dem Klimawandel Einhalt gebieten? Sprich: Liebe sich das CO<sub>2</sub>, das Industriebetriebe in die Luft pusten, als Rohstoff nutzen? Die Antwort lautet: Ja, doch das erfordert Energie und neuartige Verfahren der Gasaufbereitung sowie der Prozess- und Systemtechnik. Hierbei hat die chemische Industrie bereits ein Stück weit Erfahrung: Im 19. Jahrhundert und im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts spielte die Kohle in dieser Industrie als Rohstoff eine wesentliche Rolle. Man entwickelte daher Technologien zur chemischen Konversion von Synthesegas, das durch Kohlevergasung entsteht, und führte diese zu einer gewissen Reife.

### Vom Abfallprodukt zum Rohstoff

Werfen wir zunächst einen Blick auf die Stahlindustrie. Die Anlagen werden nah am technisch möglichen Optimum betrieben, die CO<sub>2</sub>-Emission der Stahlproduktion lässt sich also kaum weiter senken. Schließlich muss – thermodynamisch bedingt – eine erhebliche Mindestmenge an Kohle eingesetzt werden, um Stahl mit den gewünschten Eigenschaften herzustellen. Dennoch lassen sich auch in traditionellen Verfahren die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringern: Und zwar indem man die kohlenstoffhaltigen Restgase aus dem Hüttenwerk katalytisch zu Chemieprodukten umwandelt. Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung der chemischen Industrie, welche bis dato zu etwa 90 Prozent auf fossilen Rohstoffen basiert, ließe sich auf diese Weise verringern. Schließlich lässt sich CO<sub>2</sub> für viele chemische Prozesse als Ausgangsstoff nutzen – fossile Rohstoffe wie Erdöl ließen sich teilweise auf diese Weise ersetzen. Statt das CO<sub>2</sub>-haltige Kuppelgas, das in Stahl- und Energieerzeugung zentral anfällt, also in die Atmosphäre zu entlassen, würde es nahezu vollständig stofflich genutzt und in chemische Produkte umgewandelt. Um die Kohlendioxid-Kreisläufe auf diese Weise technisch zu schließen, braucht es jedoch neuartige Technologien der Gasreinigung, Katalyse und Prozesstechnik. Das heißt:

In den nächsten 20 Jahren sind tief greifende Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsaktivitäten nötig. Hier setzt das Verbundprojekt Carbon2Chem<sup>®</sup> an, an dem auch das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT beteiligt ist. Dabei sollen nicht einzelne Prozessschritte oder Anlagen – etwa das Hüttenwerk oder der Chemieprozess – isoliert optimiert werden, vielmehr kommt es auf das Gesamtoptimum des Verbunds an. Eine mögliche Option ist die kohlebasierte Chemie.

### Unterschiedliche Akteure rücken zusammen

Soll dieser Ansatz gelingen, ist die Zusammenarbeit von Stahlindustrie, chemischer Industrie, Prozessindustrie und Anlagenbau unerlässlich. Ein Beispiel: Um CO<sub>2</sub> in chemische Produkte umzuwandeln, werden große Mengen an Wasserstoff benötigt. Dieser kann mithilfe der Elektrolyse von Wasser und Strom aus erneuerbaren Energien umweltfreundlich produziert werden. Die thyssenkrupp AG hat dazu in Voruntersuchungen bereits erste Konzepte erarbeitet, wie das bestehende Hüttenwerk in Duisburg mit Chemieanlagen kooperieren könnte. Das Ergebnis: Eine solche Kooperation ist machbar.

Um Kooperationen solcher Art voranzutreiben, engagieren sich Unternehmen aus den genannten Industrien daher im Verbundprojekt Carbon2Chem<sup>®</sup>. Das Ziel sind nachhaltige Verbundstandorte, in denen sowohl die Stahl- als auch die Chemieproduktion integriert sind und die auf erneuerbare Energien setzen. Technologien, die zum Gelingen der Energiewende beitragen und die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren, sollen dabei so weit vorangetrieben werden, dass daraus nachhaltige Produktionsprozesse gestaltet und diese industriell sicher implementiert werden können. Damit, so das Ansinnen, soll man den Kreisläufen etwas näherkommen, die die Natur uns aufzeigt – und CO<sub>2</sub> als Rohstoff betrachten statt als Abfallstoff.

Prof. Görgo Deerberg, Dr. Torsten Müller  
Fraunhofer UMSICHT, [www.umsicht.fraunhofer.de](http://www.umsicht.fraunhofer.de)

## TREIBSTOFFE AUS ALTEN KLEIDERN – DIE MÖGLICHKEITEN DER INSEKTEN- BIOTECHNOLOGIE

Kühe und Schweine fressen mittlerweile mehr, als die Äcker hergeben. Immer mehr Regenwälder werden daher gerodet, um auf der frei gewordenen Fläche Soja für die Futtertröge anbauen zu können. Eine Alternative bieten Insekten. Dabei lösen sie gleich mehrere Probleme auf einmal. Sie können organische Abfälle wie Trester verwerten, die sonst teuer entsorgt werden müssen. Verarbeitet zu Proteinen, ernähren sie Kühe und Schweine auf nachhaltige Weise. Und gesund für die Nutztiere ist dieses Futter dazu.

Steak, Rinderroulade oder Schweinelendchen? In welcher Form das Fleisch auch immer auf unseren Tellern landet:

Seine Produktion verursacht zahlreiche Probleme. Denn die Rinder und Schweine brauchen Nahrung, und zwar erheblich mehr, als sie selbst in Form von Fleisch abwerfen. Um diesem steigenden Bedarf nachzukommen, werden weltweit Regenwälder gerodet – allein in Brasilien fielen zwischen 2002 und 2012 156 000 Quadratkilometer Regenwald dem Sojaanbau zum Opfer. Kurzum: Es klafft zunehmend eine Lücke zwischen der prognostizierten Produktion und dem Bedarf an Proteinen für den Tierfuttermarkt, die in der Literatur als »protein gap« bezeichnet wird. Experten schätzen, dass der Bedarf an Proteinen für die Ernährung von Menschen und Nutztieren das Angebot im Jahr 2025 um 100 Millionen Tonnen und im Jahr 2050 um 300 Millionen Tonnen übersteigen wird.

Auch der Bedarf an Ölen und Fetten übertrifft die Menge, die sich nachhaltig produzieren lässt. Was pflanzliche Fette angeht, so ist die Ölpalme inzwischen der wichtigste Lieferant. Der großflächige Anbau von Ölpalmen lässt den Regenwald in Indonesien und Malaysia dramatisch zurückgehen. Dies bedroht die Biodiversität immens und verschärft darüber hinaus den Klimawandel.

### Lösung: Futtertröge mit Proteinen aus Insekten füllen

Eine Lösung für all diese Probleme können Insekten bieten, vielmehr die Insektenbiotechnologie. Das heißt: Es werden biotechnologische Methoden entwickelt, mit denen Insekten – oder ihre Moleküle, Zellen, Organe oder assoziierten Mikroorganismen – in Produkte umwandelt werden. In Insektenreaktoren vermehrt man Insekten wie die Schwarze Soldatenfliege (*Hermetia illucens*) im Tonnenmaßstab, als Nahrungsmittel dienen dabei organische Abfälle. Aus diesen Insekten gewinnt man wiederum Proteine, Lipide und andere Wertstoffe, mit denen Nutztiere und Fische in Aquakulturen ernährt werden können. Dieses Insect Farming prosperiert weltweit und ist ein Zukunftsmarkt mit enormem ökonomischem Potenzial.

### Insektenproteine bieten zahlreiche Vorteile – für Umwelt, Landwirte und Tierhaltung

Das Insect Farming ist kosten- und energieeffizient und dabei ausgesprochen nachhaltig. Denn Insekten bieten zahlreiche Vorteile gegenüber dem landwirtschaftlichen Anbau von Futtermitteln. Einer davon betrifft die benötigte Fläche: Auf

einem Hektar Fläche lässt sich etwa eine Tonne Soja produzieren – oder aber bis zu 150 Tonnen Insektenprotein. Besonders wichtig: Die Insekten können mit organischen Abfällen gefüttert werden, die in großen Mengen anfallen – in den Tropen etwa mit Pflanzenresten aus der Palmölindustrie. Und die Exkremente der Insekten wiederum geben einen hervorragenden organischen Dünger ab. Insekten übertragen weder für Menschen oder Nutztiere gefährliche Krankheiten noch gefährden sie die Biodiversität. Sowohl kleinbäuerliche Betriebe als auch industrielle Produktionsanlagen können vom Insect Farming profitieren: Es ist skalierbar, es lässt sich also in beliebigen Maßstäben durchführen. Auch für die Rinder und Schweine hat die Verfütterung von Insektenproteinen, aufgrund ihres hohen Nährwerts, Vorteile: Sie wirkt sich positiv auf die Gesundheit der Nutztiere aus. Industrielle Ansätze, die auf Insekten basieren, bieten daher Lösungen für globale Probleme und Chancen für innovative Wertschöpfungen.

### Pioniere der »Insekten-Technologie«

Die Projektgruppe Bioressourcen des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME gehört zu den Pionieren bei der Entwicklung neuer »Insekten-Technologien« und forscht auch mit Industriepartnern wie Alternative Protein Corp. im Bereich Insect Farming. Im Projekt AIM-Biotech, das von der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft gemeinsam gefördert wird, erforschen die Wissenschaftler beispielsweise Mikroben, die mit Insekten assoziiert sind. Welche industriellen Anwendungen lassen sich daraus generieren? Weiterhin erforscht die Fraunhofer-Projektgruppe, wie sich der Ertrag der pflanzlichen Produktion mithilfe der Exkremente der Schwarzen Soldatenfliege steigern lässt – wie sich die Ausscheidungen der Insekten also als Dünger bzw. als »Biofertilizer« einsetzen lassen.

Die Entwicklung von Technologien und Industrieanlagen, die auf dem Einsatz von Insekten basieren, steht jedoch erst am Anfang. Aktuelle Forschungsfragen, mit denen wir uns befassen,

betreffen daher sowohl die Insektenreaktoren, in denen die Insekten industriell vermehrt werden, also auch die industrielle, automatische Verarbeitung von Insekten-Rohstoffen.

Prof. Andreas Vilcinskas  
Fraunhofer IME, [www.ime.fraunhofer.de](http://www.ime.fraunhofer.de)

# LACKE, UND FARBEN AUS PFLANZENÖL – GLANZ FÜR DEN NACHHALTIGEN KONSUM

Die Wünsche der Konsumenten ändern sich: Ökologie und Nachhaltigkeit stehen zunehmend hoch im Kurs. Bei einigen Produkten lässt sich vergleichsweise leicht auf Holz, Kork oder andere ökologische Materialien umsteigen. Schwieriger ist es jedoch bei Lacken, Klebstoffsystemen und Dämmschichten, den Anforderungen der Nachhaltigkeit zu genügen. Zwar gibt es bereits erste Ansätze, das gängige Ausgangsmaterial der Epoxidharze auf Basis von Pflanzenölen herzustellen. Doch bei den natürlichen Ölen variieren die Zusammensetzungen mitunter sehr stark. Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS untersuchen daher die genauen Eigenschaften der ökologischen Harze und entwerfen nachhaltige Materialkonzepte.

Das Klima wandelt sich, die Umwelt wird verschmutzt, der Müll nimmt stetig zu. Viele Menschen möchten dem entgegenwirken, indem sie nachhaltige Produkte kaufen. Auch Hersteller haben diesen Trend zum Ökologischen erkannt. Dabei ist es allerdings nicht damit getan, Kunststoffe durch Materialien wie Holz oder Kork zu ersetzen. Denn sollen die Produkte wirklich nachhaltig sein, müssen auch die Klebstoffe, Lacke und Schäume aus biobasierten Rohstoffen bestehen.

## Epoxidharze:

### Ein gängiges Material für Klebstoffe und Schäume

Das herkömmliche Rohmaterial für Lacke, Klebstoffe und Schäume sind duroplastische Epoxidharze – also Kunstharze, die nach ihrer Erwärmung nicht mehr verformt werden können. Als Ausgangsstoff für diese Epoxidharze dienen Monomere. Wird ein Härter hinzugegeben, vernetzen sich die Einzelmoleküle zu einem festen Kunststoff, der sich nicht mehr aufschmelzen lässt. Über zugegebene Funktionsstoffe lassen sich die Eigenschaften der Epoxidharze an die jeweiligen Anwendungen anpassen. So können sie die Epoxidharze färben, sie gegenüber Hitze und Sonne beständig werden lassen, sie vor Feuer schützen oder dafür sorgen, dass sie sich besser verarbeiten lassen. Über Füllstoffe lassen sich die Materialkosten senken.

## Die nachhaltige Variante:

### Pflanzenölepoxide mit naturbasierten Additiven

Doch lassen sich solche Epoxidharze auch auf ökologische Weise herstellen. Die Klebstoffhersteller sind in puncto Nachhaltigkeit bereits sehr aktiv. Ihre Devise: Neue Produkte müssen nicht nur besser und preiswerter sein als ihr Vorgängerprodukt, sondern auch möglichst nachhaltig. Kurzum: Die Hersteller betreiben einen großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, um Lösungsmittelklebstoffe durch lösungsmittelfreie Dispersionsklebstoffe zu ersetzen.

Einen neuartigen Ansatzpunkt gibt es daher bereits: Die Pflanzenölepoxide, also die ökologische Variante der herkömmlichen Epoxidharze. Basis bilden Pflanzenöle, die einen hohen Anteil an ungesättigten Fettsäuren haben. Diese Fettsäuren werden epoxidiert, also mit einem Drei-Ring aus zwei Kohlenstoffatomen und einem Sauerstoffatom versehen. Diese Pflanzenölepoxide werden mit gesundheitlich unbedenklichen naturbasierten Additiven kombiniert – das Resultat sind hochbelastbare Kunststoffe. Indem die Zusammensetzungen variiert werden, lassen sich die Harze an verschiedenste Einsatzbereiche anpassen. Nachhaltige Klebstoffe, Lacke oder auch Schaumharze rücken somit in den Bereich des Möglichen. Doch wie so oft hat die Sache ihre Tücken: Die chemische Zusammensetzung von natürlichen Rohstoffen kann stark schwanken, schließlich werden sie aus der Saat von Ölpflanzen extrahiert. Dies stellt Produzenten vor große Herausforderungen.

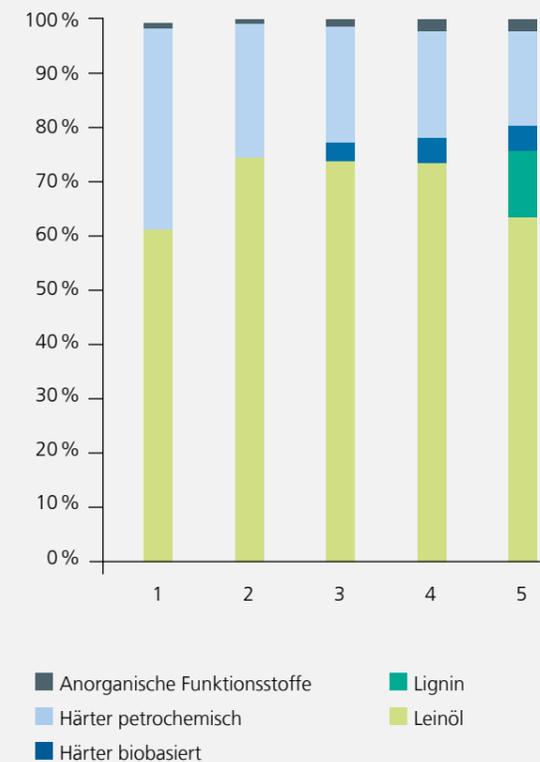


## Ökologische Klebstoffe mit optimalen Eigenschaften

Die Eigenschaften neu entwickelter biogener Harze werden daher am Fraunhofer IMWS genau überprüft – und zwar von der Mikro- bis zur Makroebene. Wie wirken sich die variierenden Inhaltsstoffe auf die Harze aus? Ist dieser erste Schritt getan, optimieren die Forscherinnen und Forscher die Harze und passen sie an die Verarbeitungsverfahren an. Partner aus der Industrie übertragen diese Verarbeitungsprozesse schließlich vom Labor- in den Industriemaßstab. Zudem entwickeln die Fraunhofer-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler aus den Pflanzenölepoxiden unter anderem neuartige Klebstoffformulierungen. Welche Härter sind optimal, um die Harze an die verschiedenen Einsatzbereiche anzupassen? Welche Füll- und Funktionsstoffe bieten welchen Nutzen? Ein solcher wäre beispielsweise eine hohe elektrische Leitfähigkeit: Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung lässt sich die Klebschicht von innen heraus aufheizen – und härtet somit schnell und gezielt aus. Ein weiterer Vorteil der entwickelten Klebstoffformulierungen: Sie sind vollkommen frei von Lösungsmitteln.

Auch wenn es um Schäume geht, ist das Fraunhofer IMWS ein kompetenter Ansprechpartner. Schäume kommen unter anderem in Dämmschichten von Gebäuden zum Einsatz. Ebenso wie die Klebstoffe lassen auch sie sich aus pflanzenölbasierten Kunststoffen herstellen. Dabei stellt sich allerdings die Frage: Welche Harze sind für welche Herstellungsverfahren optimal? Das Fraunhofer IMWS entwickelt gemeinsam mit Partnern aus der Industrie detailliert abgestimmte Zusammensetzungen von epoxidierten Leinölen und Härttern – mit kurzen Aushärtezeiten und niedriger Viskosität. Die Herausforderung liegt vor allem darin, den biogenen Anteil zu erhöhen und gleichzeitig die Verarbeitbarkeit sowie die Materialeigenschaften zu verbessern. Momentan erreichen die Fraunhofer-Forscher bei den Schäumen einen biogenen Massenanteil von 80 Prozent. Als Funktionsstoff dient Lignin, ein Abfallstoff aus der Zellstoffproduktion, von dem jährlich schätzungsweise etwa 20 Milliarden Tonnen anfallen.

## Erhöhung des biogenen Anteils im Reaktivharzsystem in 5 verschiedenen Testsystemen



Andreas Krombholz  
Fraunhofer IMWS, [www.imws.fraunhofer.de](http://www.imws.fraunhofer.de)

1 Aufgeschäumtes Leinöl-epoxid mit Farbpigmenten.

---

## Impressum

---

### Redaktion

Dr. Patrick Dieckhoff (V.i.S.d.P.), Roman Möhlmann,  
Janine van Ackeren

### Gestaltung, Layout

Silke Schneider

### Lektorat

Eva Bachmann

### Kontakt

Fraunhofer-Gesellschaft  
Dr. Patrick Dieckhoff  
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2  
10178 Berlin  
Telefon +49 30 6883 759-1603  
patrick.dieckhoff@zv.fraunhofer.de

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde auf die durchgängige  
gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprach-  
formen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten  
gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

### Bildquellen

Titel, Rückseite: Gettyimages  
Seite 5: K. C. Wong  
Seite 7: Zeitz / Fraunhofer  
Seiten 13, 25, 31, 37, 4145, 46, 59 und 65: Fraunhofer  
Seite 25: Shutterstock  
Seite 34: Pixabay  
Seite 39, links: Ludmilla Parsyak / Fraunhofer IAO  
Seite 43: Wolf-Dieter Gericke  
Seite 46: Shutterstock  
Alle übrigen Abbildungen: iStockphoto

© Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., München 2018

[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)



