



Technologien für einen  
gesunden Menschen in  
einer gesunden Umwelt

---

**Jahresbericht 2024/25**

# Profil

---

Das Fraunhofer IGB entwickelt und optimiert Verfahren, Technologien und Produkte in den Geschäftsfeldern Gesundheit, nachhaltige Chemie sowie Umwelt und Klimaschutz. Dabei setzen wir auf eine einzigartige Kombination biologischer und verfahrenstechnischer Kompetenzen, um mit ressourceneffizienten und kreislauforientierten Prozessen, dem Systemansatz der Bioökonomie und bioinspirierten sowie biointelligenten Ansätzen zum Wohlergehen des Menschen, einer nachhaltigen Wirtschaft und einer intakten Umwelt beizutragen.

## **Vision: Wir verbinden Biologie und Technik**

Innovative Verfahren und Produkte erfordern mehr denn je das konstruktive Zusammenspiel verschiedener Disziplinen in Systemansätzen. Durch die Verbindung von Biologie und Technik – in der Bioverfahrenstechnik, aber auch durch genetisches Engineering von Viren und Bakterien, die Kombination von Zellkultur und Grenzflächentechnik oder von DNA-Sequenzierung mit bioinformatischen Algorithmen, ebenso wie durch die Interaktion von biologischem System und technischem Material – eröffnen wir neue Ansätze und zukunftsweisende Lösungen für die industrielle Wertschöpfung.

## **Vom Labor- bis zum Pilotmaßstab – Partner für Industrie und öffentliche Hand**

Unser Ziel ist es, Forschungsergebnisse in wirtschaftlich attraktive und gleichzeitig nachhaltige Verfahren und Produkte für die industrielle Praxis umzusetzen. Unseren Kunden bieten wir Forschung und Entwicklung (FuE) entlang der gesamten stofflichen Wertschöpfungskette, ergänzt durch ein breites Spektrum an Analyse- und Prüfleistungen. Komplettlösungen vom Labor- bis zum Pilotmaßstab und die Demonstration der entwickelten Verfahren gehören dabei zu den Stärken des Instituts.

Damit sind wir ein kompetenter Partner für industrielle Unternehmen, mittelständische oder kleine Firmen unterschiedlicher Branchen, für Kommunen und Zweckverbände sowie für die Vertragsforschung von EU, Bund und Ländern.



► [www.igb.fraunhofer.de/profil](http://www.igb.fraunhofer.de/profil)

Technologien für einen  
gesunden Menschen in  
einer gesunden Umwelt

---

**Jahresbericht 2024/25**

# Inhalt

---

<b>Profil</b> .....	<b>2</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>6</b>
<b>Das Institut in Zahlen</b> .....	<b>8</b>
<b>Highlights 2024</b> .....	<b>10</b>
Preise, Auszeichnungen und Stipendien .....	10
Veranstaltungen .....	12
<b>Präzisionsmedizin</b> .....	<b>15</b>
Krankheitsmodelle .....	17
Innovative Tumordiagnostik für die Präzisionsmedizin .....	18
Virus-basierte Therapien VBT .....	20
Therapeutische Viren – Hoffnungsträger für die Präzisionsmedizin .....	22
<b>Kreislaufwirtschaft: Nutzung von Abwasser, Abfall und Abgas</b> .....	<b>27</b>
Fraunhofer IGB – Partner bei der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen als Sekundärrohstoffe .....	28
Entwicklung und Skalierung vom Technikums- bis zum Industriemaßstab .....	29
So arbeiten Sie mit uns zusammen .....	30
Digitalisierung (bio-)verfahrenstechnischer Anlagen .....	33
Digitalisierung Ihrer Prozesse .....	34
Optimierung und Automatisierung Ihrer Prozesse .....	35
Pilotanlagen zur Demonstration von Abfall- und Abwasser-Bioraffinerien .....	36
Projekt RoKka wandelt Kläranlagen in Bioraffinerien .....	37
InBiRa – die Insektenbioraffinerie .....	41
BW2Pro – Biowaste to Products .....	44
SmartBioH <sub>2</sub> -BW .....	45
KoalAplan .....	50
H <sub>2</sub> Wood – BlackForest .....	51

<b>Biopolymere – Materialbausteine der Zukunft</b> .....	<b>53</b>
Unsere Lösungsansätze für nachhaltige Biokunststoffe .....	55
Biopolymere und biobasierte Polymere .....	59
Polymere aus biobasierten Monomeren .....	60
Mikrobielle Biopolymere .....	62
Native Biopolymere .....	63
Fraunhofer-Leitprojekt SUBI <sup>2</sup> MA – nachhaltige biobasierte und biohybride Materialien ..	66
<b>Publikationen</b> .....	<b>70</b>
Dissertationen .....	71
<b>Impressum</b> .....	<b>72</b>
<b>Information</b> .....	<b>73</b>

# Vorwort

---



## **Liebe Leserinnen und Leser,**

die Welt ist im Umbruch und wir sind mittendrin. Trotz der zunehmenden geopolitischen und wirtschaftlichen Unsicherheiten sind die meisten Menschen, Unternehmen und auch die Politik weiterhin überzeugt, dass die Transformation hin zu einer zirkulären Wirtschaftsweise notwendig ist. Auch das Fraunhofer IGB trägt mit seinen innovativen Lösungen unverändert dazu bei, auf diesem Weg voranzuschreiten und damit auch die Resilienz des deutschen und europäischen Wirtschaftsstandorts zu erhöhen.

Die Exzellenz unseres Instituts wurde im vergangenen Jahr durch eine Vielzahl von Veranstaltungen auch in der Öffentlichkeit verstärkt wahrgenommen. Hervorheben möchte ich die Verleihung von zwei Auszeichnungen im Geschäftsfeld Gesundheit: Dr. Kai Sohn erhielt in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern des Universitätsklinikums Essen sowie der Noscendo GmbH, einer Ausgründung des Fraunhofer IGB, den Wissenschaftspreis des Stifterverbandes »Forschung im Verbund« 2024 für eine optimierte Erregeridentifikation mittels Next-Generation Sequencing. Die Forschungsarbeit von Dr. Anke Burger-Kentischer und ihrem Team wurde ebenfalls gewürdigt. Gemeinsam mit Partnern der Beiersdorf AG erhielten sie für die Entwicklung eines Reporterhautmodells für die Risikobewertung von Kosmetika den Hamburger Forschungspreis für Alternativen zum Tierversuch im Herbst des vergangenen Jahres.

Nachdem wir bereits im Oktober 2023 die Unterstützung des Landes Baden-Württemberg zum Aufbau der neuen Außenstelle »Virus-basierte Therapien« erhielten, freut es mich sehr, von den aktuellen Fortschritten berichten zu können. Die Räume der Außenstelle in Biberach sind inzwischen bezogen und wir begrüßten bis heute bereits 10 neue Mitarbeitende, welche sich in diesem vielversprechenden Themenfeld engagieren.

Das Geschäftsfeld Umwelt und Klimaschutz feierte letztes Jahr den erfolgreichen Abschluss der vom Land Baden-Württemberg und der EU seit 2021 geförderten Projekte des EFRE-Förderprogramms »Bioökonomie Bio-Ab-Cycling« zur Entwicklung modularer Bioraffinerien unter Beteiligung hochrangiger Persönlichkeiten aus Politik und Wirtschaft. Das Beispiel der Kläranlage der Stadt Erbach zeigt die erfolgreiche Zusammenarbeit: Mit innovativen Pilotanlagen ist es gelungen, Nährstoffe für die Düngemittelproduktion zurückzugewinnen, CO<sub>2</sub> aus dem Faulgas als Rohstoff für neue Produkte zu nutzen und Lachgasemissionen, ein potentes Klimagas, auf der Kläranlage zu reduzieren.

Weitere positive Ergebnisse können aus dem Geschäftsfeld Nachhaltige Chemie berichtet werden: Als Partner der Modellregion »Digitalisierung pflanzlicher Wertschöpfungsketten« in Sachsen-Anhalt sind wir an mehreren Projekten beteiligt. Das Verbundvorhaben fördert den Strukturwandel im Mitteldeutschen Revier und etabliert die Region als Vorreiter für digitalisierte Bioökonomie. Ein Fokus in Straubing ist die Umsetzung der »Grünen Chemie«. Auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen werden natürliche oder modifizierte Biopolymere aufgrund ihrer passfähigen Chemie und Materialeigenschaften in einem völlig neuen Kontext genutzt. Diese Kenntnisse fließen auch in das Fraunhofer-Leitprojekt SUBI<sup>2</sup>MA (Sustainable Biobased and Biohybrid Materials) ein, welches die »Biotransformation« der Kunststofftechnik vorantreibt.

Wie unsere Forschungsergebnisse zeigen, ist eine Transformation zu einer nachhaltigen und zirkulären Bioökonomie nicht nur theoretisch möglich, sondern bereits in der Umsetzung. Allerdings müssen noch einige Steine aus dem Weg geräumt werden. Die entsprechenden Empfehlungen an die Politik greift das Positionspapier der Initiative Bioökonomie auf. Als führende Expertinnen und Experten unterstreichen wir darin acht notwendige Schritte, welche jetzt umgesetzt werden müssen, damit die deutsche Wirtschaft weiterhin im Wettbewerb mithalten kann. Die eindeutige Botschaft lautet: Wer die Bioökonomie stärkt, stärkt den Wirtschaftsstandort Deutschland.

Ich danke unseren Kunden und Partnern für die gute Zusammenarbeit und das Vertrauen, mit uns gemeinsam die Transformation der Wirtschaft voranzutreiben.

Insbesondere danke ich auch allen Mitarbeitenden des Fraunhofer IGB für ihr Engagement, ihre Kreativität und ihr Durchhaltevermögen. Mit ihrer großen Motivation haben sie den Zusammenhalt und Erfolg des Instituts möglich gemacht.

Ich wünsche eine informative Lektüre und freue mich auf die weitere Zusammenarbeit.

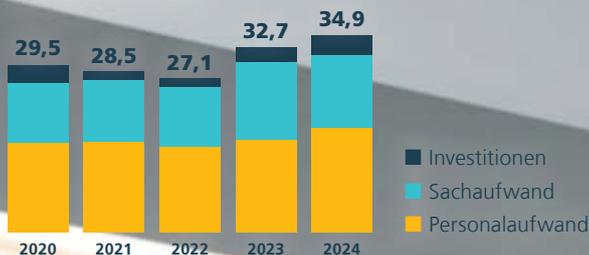


Markus Wolperdinger  
Institutsleiter

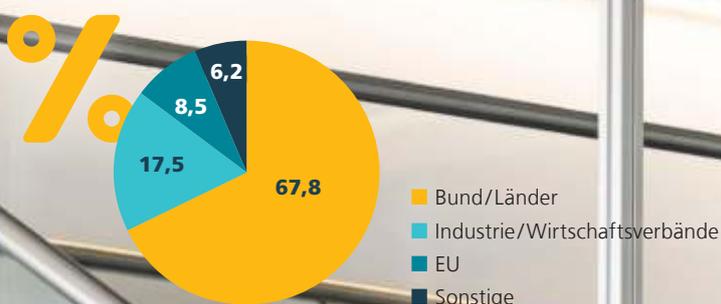
# Das Institut in Zahlen

## Entwicklung des Gesamthaushalts

Mio €



## Herkunft der eigenen Erträge 2024



## Dissertationen



## Hochschularbeiten

43

- 32 Masterarbeiten
- 7 Bachelorarbeiten
- 4 Praktikumsberichte

## Lehrtätigkeiten

76

## Projekte

# 261

- 4 Fraunhofer-Leitprojekte
- 27 Fraunhofer-interne Projekte
- 63 von Bundesministerien geförderte Projekte
- 21 Projekte mit Universitäten und Kommunen oder von Stiftungen gefördert
- 12 von Bundesländern geförderte Projekte
- 14 EU-Projekte
- 120 Industrieprojekte

## Neu erteilte Schutzrechte



# 6

## Wissenschaftliche Veröffentlichungen



# 46

## Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Gesamtzahl zum 31.12.2024



## Frauenanteil

# 52 %

## Personalstruktur

zum 31.12.2024



## Nationalitäten

# 22

# Highlights 2024

## Preise, Auszeichnungen und Stipendien



### In-vitro-Diagnostik des IGB erhält Wissenschaftspreis 2024 des Stifterverbandes

Eine schnelle und präzise Erkennung von Krankheitserregern rettet Leben von Intensivpatienten – etwa bei einer Sepsis, bei der es auf jede Minute ankommt. Forschenden des IGB ist es nun gemeinsam mit Verbundpartnern gelungen, ein neu gedachtes Nachweisprinzip mithilfe von Next-Generation Sequencing zu etablieren. Anhand von DNA-Spuren kann das neuartige Verfahren in kürzester Zeit Erreger zuverlässig und genau identifizieren. Diesen medizinischen Meilenstein würdigte der deutsche Stifterverband mit seinem Wissenschaftspreis 2024. Die Auszeichnung nahm Dr. Kai Sohn, Leiter der In-vitro-Diagnostik am IGB, gemeinsam mit den beteiligten Partnern entgegen, der Fraunhofer-Ausgründung Noscendo GmbH und dem Universitätsklinikum Essen.

► [www.igb.fraunhofer.de/ings-wissenschaftspreis2024](http://www.igb.fraunhofer.de/ings-wissenschaftspreis2024)

### Hamburger Forschungspreis 2024 für Reporterhautmodell als Tierversuch-Alternative

In der Abteilung Zell- und Gewebetechnologien haben IGB-Forschende ein neues Reporter-epidermismodell zum Nachweis von hautsensibilisierenden Wirkungen von Substanzen entwickelt. Mit dieser »künstlichen Haut« lassen sich Pharmazeutika, Kosmetika, Pflanzenschutzmittel, Biozide oder andere Chemikalien ohne Tierversuche zuverlässig und präzise testen. Dafür erhielt das Team um Dr. Anke Burger-Kentischer zusammen mit den beteiligten Projektpartnern der Beiersdorf AG im September 2024 den mit 30.000 Euro dotierten Forschungspreis für Alternativen zum Tierversuch der Hansestadt Hamburg.

► [www.igb.fraunhofer.de/hamburger-forschungspreis-2024](http://www.igb.fraunhofer.de/hamburger-forschungspreis-2024)





### EUSAAT-Kongress 2024: IGB-Wissenschaftlerin Hanna Glasebach gleich zweifach ausgezeichnet

Die European Society for Alternatives to Animal Testing, kurz EUSAAT, hat auf ihrem Jahreskongress 2024 die Forschungsarbeit von IGB-Wissenschaftlerin Hanna Glasebach mit zwei Preisen gewürdigt. Den »Young Scientist Travel Award« (YSTA) erhielt sie für ihre Forschungen an dem 3D-In-vitro-Hautmodell für Psoriasis, das am IGB als Alternative zu Tierversuchen entwickelt wurde. Mit dem Preis und den damit verbundenen Fördermitteln werden Reisetätigkeiten von wissenschaftlichen Nachwuchstalenten im Rahmen ihrer Arbeit unterstützt. Beim EUSAAT-Kongress konnte Glasebach dann außerdem mit einem Fachvortrag derart überzeugen, dass sie dafür gleich auch noch den »YSTA Best Talk Award« mit nach Hause nehmen konnte.

► [s.fhg.de/eusaat-ysta](https://s.fhg.de/eusaat-ysta)

### »Ehrung der Besten« – Auszeichnung für IGB-Azubi Max Witte

Nach erfolgreichem Abschluss seiner Ausbildung zum Chemielaboranten konnte sich Max Witte über eine besondere Anerkennung freuen: Im Rahmen der Fraunhofer-Veranstaltung »Ehrung der Besten« im Januar 2024 wurde er für seine hervorragenden Leistungen während seiner Ausbildung ausgezeichnet. Zuvor hatte er seine Abschlussprüfungen mit 92 von 100 Punkten und somit mit der Note »Sehr gut« bestanden. Neben Witte (auf dem Foto links) selbst wurden auch seine Ausbilderin Melanie Dettling und sein Kollege Tobias Götz gewürdigt, die ihn während seiner Ausbildung in der Abteilung Membranen begleitet und betreut haben.

► [www.igb.fraunhofer.de/ausbildung](https://www.igb.fraunhofer.de/ausbildung)



### DBU-Promotionsstipendium für Simon Krake

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) vergibt zwei Mal jährlich Promotionsstipendien für Doktorandinnen und Doktoranden, die an Lösungsansätzen für den Umwelt- und Naturschutz arbeiten. Dafür hat sich 2024 auch Simon Krake erfolgreich beworben. Der studierte Biotechnologe befasst sich im Rahmen seiner Doktorarbeit mit umweltfreundlich und nachhaltig hergestellten Treibstoffen. Konkret forscht er dabei am IGB in der Abteilung Industrielle Biotechnologie an mikrobiellen Verfahren für die Herstellung von Wasserstoff. Die DBU fördert Krakes Arbeit nun über einen Zeitraum von drei Jahren mit einer monatlichen Grundfinanzierung und einem Zuschuss für Sachmittel.

► [www.igb.fraunhofer.de/smartbioh2](https://www.igb.fraunhofer.de/smartbioh2)

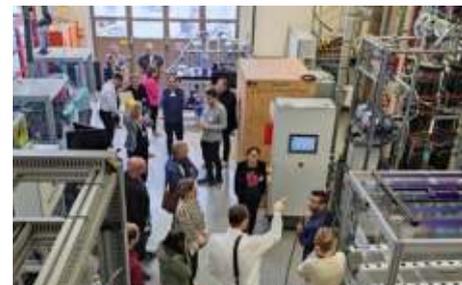
## Veranstaltungen

### Forschungstransfer: Online-Reihe »break2innovate« im Februar 2025 gestartet



Nach dem Motto »Unsere Kompetenz ist Ihre Lösung!« hat das Fraunhofer IGB die monatliche Online-Reihe »break2innovate« ins Leben gerufen. Dabei stellen Expertinnen und Experten des Instituts ihre Forschungs-, Entwicklungs- und Serviceleistungen vor, mit denen sie Prozesse und Produkte von Kunden aus der Industrie verbessern können. Die Online-Reihe richtet sich insbesondere an klein- und mittelständische Unternehmen. Inhaltlich liegt der Fokus darauf, in nur 30 Minuten innovative Lösungen für branchenspezifische Herausforderungen aufzuzeigen – fokussiert, kurz und kompakt. Dabei decken die IGB-Fachleute die komplette Prozesskette einschließlich innovativer Analyse- und Testmethoden ab. Die Themen von break2innovate sind je Veranstaltungstermin branchen- und zielgruppengenau ausgeschrieben. Los ging es am 26. Februar 2025 mit der ersten Ausgabe zum Thema »Kreislaufführung von Prozesswasser: Behandlungsoptionen on-site«.

► [www.igb.fraunhofer.de/break2innovate](http://www.igb.fraunhofer.de/break2innovate)



### Abwaskolloquium: Hochlastfäulung und Nutzung von Gärresten

Im Oktober 2024 lud das Fraunhofer IGB zu seinem inzwischen 23. Kolloquium zur Abwasser- und Abfallbehandlung ein. Diese Veranstaltungsreihe richtet sich an kommunale Verwaltungen, Betreiber von Kläranlagen, Politikerinnen und Politiker, Mitarbeitende aus Behörden sowie Interessierte aus der Wirtschaft. Der thematische Schwerpunkt lag diesmal auf der Hochlastfäulung und der Nutzung von Gärresten. Die Expertinnen und Experten des IGB sowie Projektpartner des Instituts stellten den Teilnehmenden anhand von konkreten Anwendungsbeispielen Lösungsansätze und Verfahrensentwicklungen für Kläranlagen vor und gaben einen Einblick in aktuell laufende Projekte.

► [www.igb.fraunhofer.de/abwaskolloquium](http://www.igb.fraunhofer.de/abwaskolloquium)

## Regionale Workshops zum Projekt »urban BioÖkonomieLab«

Das »urban BioÖkonomieLab« ist ein Fraunhofer-Reallabor, das Städten den Weg zu einer nachhaltigen Bioökonomie aufweisen soll. Die beteiligten Akteure und potenziellen Anwender tauschten sich im Rahmen regionaler Workshops aus. Sie diskutierten Maßnahmen zur bioökonomischen Transformation ihrer jeweiligen Regionen. Die erste Ausgabe im Januar 2024 richtete den Blick auf den Großraum Stuttgart, die zweite im Juli 2024 befasste sich mit der Region Karlsruhe. Den Abschluss bildete der Workshop für die Region Rhein-Neckar im November 2024. Dabei wurden relevante Forschungsergebnisse vorgestellt sowie mögliche Zukunftsszenarien entworfen und konkrete Maßnahmen aus diesen abgeleitet. Das Ziel war, eine individuelle Bioökonomie-Roadmap für die jeweilige Region auszuarbeiten.

► [www.igb.fraunhofer.de/urban-biooekonomielab](http://www.igb.fraunhofer.de/urban-biooekonomielab)





**Sind die molekularen Ursachen einer Erkrankung erkannt, ermöglicht dies die exakte Diagnose der Erkrankung und schafft die Basis, die der Erkrankung zugrunde liegenden Fehlfunktion(en) zu korrigieren.«**

**Prof. Dr. Steffen Rupp**  
Koordinator Geschäftsfeld Gesundheit



# Präzisionsmedizin

## Zielgerichtete Therapien durch Erkennen der molekularen Ursachen von Erkrankungen

Technologische Fortschritte bei der Identifizierung krankheitsspezifischer molekularer Merkmale und bei der biotechnologischen Manipulation von Zellen und Organismen aller Art schaffen die Grundlage, Krankheiten auf molekularer Ebene zu verstehen. Damit wird es möglich, neue spezifische Therapeutika zu entwickeln und Behandlungsstrategien gezielt auf den einzelnen Patienten auszurichten. Am Fraunhofer IGB entwickeln wir die Technologien für eine solche Präzisionsmedizin.

### Biomarker – Schlüssel für die Präzisionsmedizin

Der enorme Zuwachs an wissenschaftlichen Erkenntnissen der letzten zwei Jahrzehnte in den Life Sciences hat unser Wissen über die molekularen Ursachen von Erkrankungen erheblich verbessert. Sind die molekularen Ursachen einer Erkrankung erkannt, so kann nach Möglichkeiten gesucht werden, die der Erkrankung zugrunde liegenden Fehlfunktionen zu korrigieren.

Erkrankte Zellen oder Gewebe zeichnen sich durch bestimmte molekulare Merkmale aus, sogenannte Biomarker, die sie von gesunden Zellen und Geweben unterscheiden. Die Präzisionsmedizin, auch individualisierte oder personalisierte Medizin genannt, macht sich das Wissen um diese charakteristischen molekularen Merkmale zunutze. In der Klinik werden die Biomarker, beispielsweise des Tumors eines Patienten, durch unterschiedliche diagnostische Verfahren bestimmt und für die Therapieplanung genutzt.

Ziel der Präzisionsmedizin ist es, die medizinische Versorgung von Patienten möglichst spezifisch auf ihre Erkrankung auszurichten, um diese effektiver und zugleich nebenwirkungsärmer behandeln zu können. Neue Technologien ermöglichen es dabei, sowohl präzisere Diagnosen in der Klinik zu stellen als auch präzisere Therapien für Erkrankungen zu konzipieren. An der Entwicklung dieser Technologien und der Umsetzung in die Praxis arbeitet das Fraunhofer IGB.

Für eine Reihe von Erkrankungen existieren heute bereits präzise Behandlungsmöglichkeiten, die eine Genesung auch in Fällen ermöglichen, die bislang nicht denkbar war. So bestimmt in vielen klinischen Zentren die systematische molekulare Analyse maligner Tumoren auf spezielle Biomarker mittels Genetic Profiling mittlerweile die primäre Diagnostik, die Vorhersage der Reaktion maligner Zellen auf Krebsmedikamente sowie die Prognoseabschätzung und Therapieplanung.

## Präzisionsdiagnostik als essenzieller Schritt

Für die Präzisionsmedizin essenziell ist eine umfassende Diagnostik, welche die Biomarker, die für die Erkrankung kennzeichnend sind, bestimmen kann. Da diese Diagnostik immer am individuellen Patienten vorgenommen werden muss, wird auch häufig der Begriff personalisierte Medizin verwendet, obwohl die Therapieplanung auf bekannte Therapeutika mit der besten Prognose für beispielsweise den analysierten Tumor zurückgreift.

Oftmals werden die charakteristischen Marker für die Tumorbehandlung in klinischen Studien identifiziert, bei der auf genomweiter Ebene nach auffälligen Veränderungen bei verschiedenen Patientengruppen im Vergleich zu Gesunden gesucht wird. Hier kommen immer häufiger

Methoden der künstlichen Intelligenz zum Einsatz, die prädestiniert sind, diese Veränderungen bzw. Biomarker zu identifizieren.



Am Fraunhofer IGB entwickeln wir bioinformatische und biochemische Methoden, mit denen sich charakteristische Biomarker für die Tumordiagnostik eindeutig bestimmen lassen. So nutzen wir am Institut die Technologie des Next-Generation Sequencing, um neue Biomarker für eine verbesserte Diagnostik von beispielsweise Prostatakrebs oder pankreatobiliären Krebsformen auf Nukleinsäure-Ebene zu identifizieren.



## Zielgerichtete therapeutische Viren

Unser Wissen über die Tumorentstehung und dessen Verteidigungsmechanismen gegenüber unserem Immunsystem ermöglicht die Entwicklung neuer immunonkologischer Therapieformen. Am Fraunhofer IGB entwickeln wir immunmodulierende onkolytische Viren zur Bekämpfung von Krebs.

Onkolytische Viren sind Viren, die – direkt oder indirekt – Tumorzellen töten. So können sie Tumorzellen infizieren und lysieren sowie durch die entstehende Entzündungsreaktion eine Immunantwort gegen spezifische Tumorantigene erzeugen. Über diese unmittelbare Wirkung hinaus können sie auch genutzt werden, um sogenannte Tumorsuppressorgene in Tumorzellen einzubringen. Diese Gene führen dazu, dass das Immunsystem die aberranten Zellen wiedererkennt und in der Folge eliminiert.

## In-vitro-Krankheitsmodelle für eine effizientere Wirkstoffentwicklung

Auch die Entwicklung von immer besseren In-vitro-Krankheitsmodellen ermöglicht eine effizientere Wirkstoffentwicklung und Therapieplanung. Bisher eingesetzte Tiermodelle sind für hochpräzise Therapeutika häufig nicht geeignet, da die Unterschiede zwischen Tier und Mensch meist zu groß sind. Die Nachbildung eines erkrankten Gewebes, ggf. sogar mit den Patientenzellen selbst, ermöglicht einen verbesserten Therapieerfolg durch Auswahl des am besten geeigneten Therapeutikums, aber auch eine effizientere Wirkstoffentwicklung für neue Präzisionstherapeutika.

3D-Gewebemodelle können auch eingesetzt werden, um mögliche Nebenwirkungen besser zu erfassen, bis hin zur Sicherheitsprüfung von Chemikalien aller Art. Einige dieser sogenannten NAMs (New Approach Methods) stehen bereits am Fraunhofer IGB zur Verfügung und werden kontinuierlich weiterentwickelt.

### Weitere Informationen



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

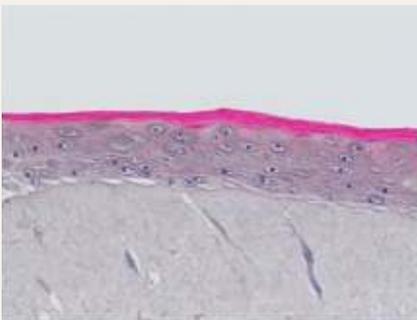
### Kontakt

Prof. Dr. Steffen Rupp  
Tel. +49 711 970-4045  
steffen.rupp@  
igb.fraunhofer.de

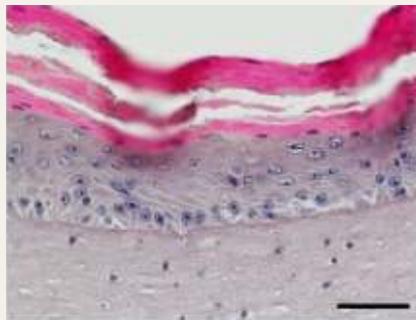
# Krankheitsmodelle

## In-vitro-Hautmodell zur Modellierung der Psoriasis mit rekonstituierter Haut

Hautmodell



Psoriasis-Hautmodell



Psoriatische Haut (in vivo)



Am Fraunhofer IGB entwickeln wir hierfür aus gezielt genetisch veränderten, immortalisierten primären Hautzellen rekonstituierte In-vitro-Modelle zur Modellierung von beispielsweise Schuppenflechte (Psoriasis). Etwa zwei Prozent aller Menschen weltweit leiden an dieser chronischen Autoimmunkrankheit, die sich in Form von entzündeten und schuppenden Hautstellen äußert. Unsere Psoriasis-Modelle sind rekonstruierte Epidermis- und Vollhautmodelle, deren Keratinozyten den Psoriasis-assoziierten Transkriptionsfaktor STAT3 überexprimieren.

Mit proinflammatorischen Stimuli wie der Zugabe von Zytokinen oder der Integration von T-Zellen werden typische Psoriasis-Merkmale im Hautmodell ausgelöst. Die Psoriasis-Modelle exprimieren charakteristische Proteinmarker (z. B. S100A7, CK16, IL-8) und weisen morphologische Merkmale wie eine Verdickung der Epidermis (Akanthose), eine gestörte finale Differenzierung der Keratinozyten (Parakeratose) und eine Verdickung des Stratum corneum (Hyperkeratose) auf.

### Weitere Informationen

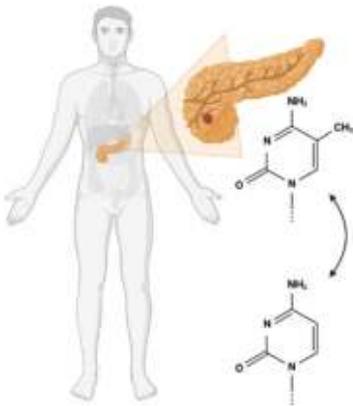


[www.igb.fraunhofer.de/  
krankheitshautmodelle](http://www.igb.fraunhofer.de/krankheitshautmodelle)

### Kontakt

Dr. Anke Burger-Kentischer  
Tel. +49 711 970-4023  
[anke.burger-kentischer@  
igb.fraunhofer.de](mailto:anke.burger-kentischer@igb.fraunhofer.de)

# Innovative Tumordiagnostik für die Präzisionsmedizin



Diagnostik von Pankreas-  
erkrankungen mittels  
differenzieller DNA-  
Methylierungsanalytik

Obwohl in letzter Zeit, beispielsweise aufgrund zellbasierter Therapeutika, große Fortschritte in der personalisierten Behandlung bestimmter Tumore gemacht werden konnten, repräsentieren Krebserkrankungen immer noch – nach kardiovaskulären Erkrankungen – eine der Haupttodesursachen in der Medizin.

## Herausforderung Früherkennung

Dabei kristallisiert sich immer mehr heraus, dass (neben einer möglichst spezifischen und effektiven Therapieoption) einer möglichst frühen Diagnostik immer größere Bedeutung beigemessen wird. Für einige der häufigsten Tumorerkrankungen einschließlich Brust-, Prostata- oder Kolorektal-Karzinome werden deshalb routinemäßig Früherkennungsuntersuchungen angeboten, die ihren Beitrag zur Senkung der schwerwiegenden Verläufe liefern sollen.

Trotz vielversprechender Möglichkeiten, bestimmte Tumore im Frühstadium erkennen und entfernen zu können, sind mit den entsprechenden Untersuchungen teil-invasive Eingriffe notwendig, die nicht nur unangenehm, sondern auch mit zusätzlichen Risiken verbunden sind. Das senkt überdies die Akzeptanz entsprechender diagnostischer Verfahren. Zudem existieren für einige der schwerwiegendsten Tumorerkrankungen mit außerordentlich schlechter Prognose, beispielsweise dem Bauchspeicheldrüsenkrebs, auch bekannt unter dem Namen Pankreaskarzinom, keine entsprechenden Früherkennungsuntersuchungen. Daher besteht ein großer Bedarf an diagnostischen Verfahren, die möglichst nicht-invasiv, mit hoher Präzision und in frühen Stadien Tumorerkrankungen zuverlässig erkennen können.

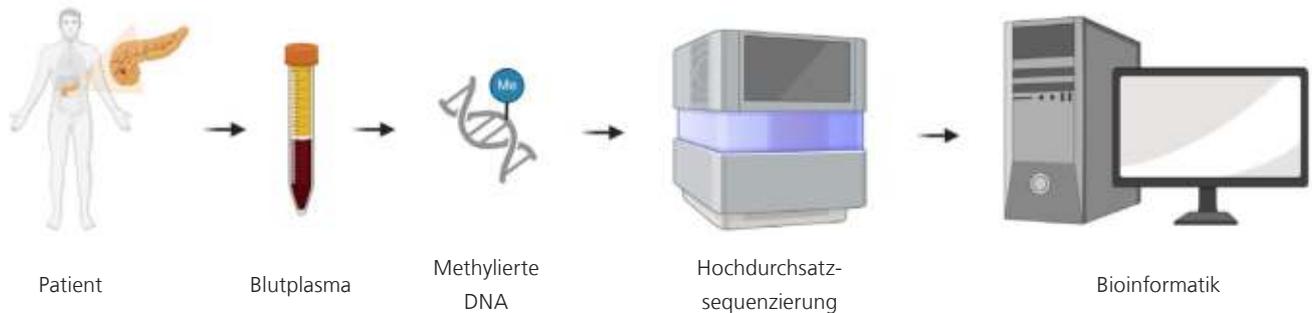
## Neues Verfahren zur Diagnose von Pankreaskarzinomen

Aufbauend auf der langjährigen Expertise im Bereich der Entwicklung nicht-invasiver Diagnostik komplexer Erkrankungen konnte in der Abteilung In-vitro-Diagnostik am Fraunhofer IGB in Kooperation mit klinischen Partnern des Universitätsklinikums Erlangen unter der Leitung von Prof. Dr. Georg Weber sowie der Firma GeneData im Bereich der Bioinformatik ein innovatives Verfahren zur Früherkennung von Pankreaskarzinomen etabliert werden.

Dieses Verfahren basiert auf der Analyse sogenannter zellfreier Tumor-DNA aus dem Blut von Patienten. Diese zellfreie DNA wird dabei zunächst aus dem entsprechenden Blutplasma isoliert und dann nach bestimmten krankhaften Veränderungen untersucht. Tumor-DNA unterscheidet sich von gesunder DNA häufig in chemischen Modifizierungen – den sogenannten Methylierungen – an bestimmten Stellen der DNA, die wir mittels Hochdurchsatzsequenzierung identifizieren können.

Mithilfe dieses Verfahrens kann aber nicht nur zwischen gesunden und tumorerkrankten Patienten unterschieden, sondern darüber hinaus auch zwischen verschiedenen gastrointestinalen Tumoren differenziert werden. Eine zusätzliche Besonderheit dieser Methode stellt weiterhin die Möglichkeit dar, eine maligne Tumorerkrankung des Pankreas von einer entzündlichen, nicht entarteten Pankreatitis zu unterscheiden, die gemäß klinischer Richtlinien komplett anders behandelt werden muss.

## Verfahren zur differentiellen DNA-Methylierungsanalytik



Nach erfolgter Blutabnahme wird mittels Zentrifugation das Plasma von zellulären Blutbestandteilen getrennt. Anschließend wird zellfreie DNA aus dem Plasma isoliert und mittels

Hochdurchsatzsequenzierung in Kombination mit bioinformatischen Verfahren hinsichtlich relevanter Methylierungsmuster gescreent.

### Erfolgreiche technische und klinische Validierung

Im Rahmen einer klinischen Studie in Zusammenarbeit mit der Gastroenterologie des Universitätsklinikums Erlangen konnte zunächst eine technische Validierung an Blutproben von Patienten, die entweder an Pankreaskarzinomen in verschiedenen Stadien oder die an einer sogenannten Pankreatitis erkrankt waren, vorgenommen werden. In einer sogenannten Proof-of-Concept-Studie konnte dann auch eine klinische Validierung erfolgen. Mittels KI-basierter Verfahren konnten wir zudem an einigen Beispielfällen zeigen, dass mit dem Diagnostikverfahren sogar nicht maligne Vorstadien klassifiziert werden können.

Die Ergebnisse der Studie wurden inzwischen im renommierten Fachjournal *Molecular Cancer* publiziert: Discrimination of pancreatico-biliary cancer and pancreatitis patients by non-invasive liquid biopsy. Hartwig, C.; Müller, J.; Klett, H.; Kouhestani, D.; Mittelstädt, A.; Anthuber, A.; David, P.; Brunner, M.; Jacobsen, A.; Glanz, K.; Swierzy, I.; Roßdeutsch, L.; Klösch, B.; Grützmann, R.; Wittenberger, T.; Sohn, K.; Weber, G. F. *Mol Cancer*. 2024 Feb 2;23(1):28. PMID: 38308296.

Basierend auf diesem Verfahren strebt das Fraunhofer IGB nun eine Translation in die klinische Routine an. Zudem sollen die entwickelten Technologien auch für andere Tumorerkrankungen und weitere klinische Indikationen mit zukünftigen Kollaborationspartnern angewendet werden.

### Weitere Informationen



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

#### Kontakt

Dr. Kai Sohn  
Tel. +49 711 970-4055  
[kai.sohn@igb.fraunhofer.de](mailto:kai.sohn@igb.fraunhofer.de)

# Virus-basierte Therapien VBT

## Aufbau der Außenstelle VBT des Fraunhofer IGB in Biberach



*Die Labore der neuen Außenstelle Virus-basierte Therapien in Biberach konnten Anfang 2024 eingeweiht und in Betrieb genommen werden. Damit war der Grundstein gelegt für die Entwicklung biotechnologischer Verfahren zur optimierten Produktion von therapeutischen Viren.*

Viren und virale Vektoren stellen eine neue und vielversprechende Therapiekategorie dar, die hohe Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit bei geringen Nebenwirkungen zeigen. Insbesondere im Kampf gegen Krebs und Gendefekte sehen Fachleute ein enormes Potenzial in diesen innovativen Therapeutika.

Um dieses Potenzial nachhaltig auszuschöpfen, sind jedoch tiefgreifende biotechnologische Entwicklungen für ihre Produktion, Reinigung und Analytik notwendig. Denn nur durch eine Steigerung der Produktivität und Qualität können die hohen Kosten gesenkt werden.

### Land Baden-Württemberg fördert Außenstelle

An erster Stelle möchten wir der Landesregierung unseren Dank für die großzügige Förderung der Außenstelle aussprechen. Wir sehen darin ein großes Vertrauen und einen Auftrag, unsere Außenstelle Virus-basierte Therapien langfristig erfolgreich und regional und international sichtbar zu machen. Mit Übergabe des Förderbescheids im September 2023 konnten wir am Standort Stuttgart unmittelbar mit der Projektarbeit auf Basis der Fraunhofer-eigenen onkolytischen Virus-Plattform TheraVision beginnen.

## Start in Biberach an der Riß

Gleichzeitig haben wir in Biberach Laborflächen angemietet und mit der benötigten Infrastruktur ausgerüstet. Dank intensiver Vorarbeiten konnten wir die Außenstelle gemäß der komplexen gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Umgang mit therapeutischen Viren ausstatten. Bereits Anfang April 2024 durften wir unsere neuen Labore einweihen und mit konkreten Projektarbeiten vor Ort starten.

Hierzu ist es uns gelungen, junges und motiviertes Personal mit hohen Kompetenzen in der Virologie, Zell- und Immunbiologie sowie der Prozesstechnologie zu rekrutieren. Mittlerweile arbeiten annähernd 25 Mitarbeitende im Bereich Virus-basierte Therapien. Fünf unserer neuen Kolleginnen und Kollegen forschen im Rahmen einer Doktorarbeit an der Entwicklung von Technologien zur Optimierung von therapeutischen Viren. Deren Betreuer sind sowohl an der Universität Ulm als auch Universität Stuttgart als Professoren tätig, was die enge Vernetzung der Außenstelle VBT mit akademischen Einrichtungen in Baden-Württemberg aufzeigt.

## Erfolgreiche Vernetzung im Cluster

Schon jetzt sind wir sehr erfolgreich bei der Akquise neuer Industrienaufträge: Nachdem wir im Sommer 2024 einen Rahmenvertrag zwischen Fraunhofer und Boehringer Ingelheim abschließen konnten, haben wir im September 2024 eine erste wissenschaftliche Kooperation mit Boehringer Ingelheim initiiert. Ziel ist dabei, den Herstellprozess von Viren vor allem auf der zellulären Ebene besser zu verstehen und damit Erkenntnisse für eine effiziente Bereitstellung dieser neuen Therapeutika zu gewinnen. Mit Firmen im BioPharmaCluster South Germany sowie anderen regionalen und überregionalen potenziellen Partnern sind wir fortlaufend im Austausch.

## Zusammenarbeit mit Boehringer Ingelheim

Presseinfo: »Neue Therapien für Menschen gemeinsam entwickeln«

Interview: »Im Schulterschluss für bessere Forschung« mit Susanne Bailer und Thomas Reith

Interview: »Viren im Kampf gegen Krebs« mit Julian Dreyer und Sophia Kessler

Diese Veröffentlichungen finden Sie unter:  
▶ [www.igb.fraunhofer.de/vbt](http://www.igb.fraunhofer.de/vbt)

## Weitere Informationen



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

### Kontakt

Prof. Dr. Susanne Bailer  
Tel. +49 711 970-4180  
[susanne.bailer@igb.fraunhofer.de](mailto:susanne.bailer@igb.fraunhofer.de)

# Therapeutische Viren – Hoffnungsträger für die Präzisionsmedizin

Viren sind evolutionäre Präzisionsmeister: Sie zeichnen sich nicht nur dadurch aus, dass sie ihr gesamtes Lebensprogramm als genetisches Material auf kleinstem Raum verpacken, sondern dieses zur Vermehrung auch noch zielgerichtet in ihre Wirtszellen verfrachten können. Viren treten daher immer mehr in den Fokus als vielversprechende Therapeutika, die für diverse Erkrankungen, wie Krebs und Gendefekte, oder zur Bekämpfung multiresistenter Bakterien neue Lösungsansätze bieten.

## Therapeutische Viren zur Behandlung von Krebs und Gendefekten

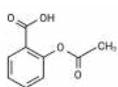
Grundvoraussetzung der Virus-basierten Tumorthherapie, auch onkolytische Virotherapie genannt, ist, dass Viren Tumorzellen spezifisch erkennen, sich anschließend in ihnen vermehren, sie sogar abtöten und dabei gleichzeitig Tumorzell-assoziierte Antigene freisetzen können. Diese Virus-Aktivitäten führen insgesamt zu einer Entzündungsreaktion im immunsupprimierten Tumormilieu und letztlich zu einer multimodalen Stimulation des Immunsystems sowie einer systemischen

Tumorstimulation. Hervorzuheben ist hier neben der großen Wirksamkeit die gute Verträglichkeit dieser Therapieform.

Bei den gentherapeutischen Viren steht deren Möglichkeit, therapeutische Gene im Huckepack in kranke Zellen einzuschleusen und sie dort sogar stabil zu verankern, im Vordergrund. Damit können genetische Defekte nachhaltig gelindert oder sogar geheilt werden.

Individualisierungsstrategien für die onkolytische Virotherapie im Rahmen der Präzisionsmedizin beruhen auf der Möglichkeit des gezielten Virus-Engineering. Beim Virus-Engineering können Viren beispielsweise so modifiziert werden, dass sie selektiv Tumorzellen infizieren, indem sie an nur von Tumorgewebe exprimierte Oberflächenmoleküle binden oder im Rahmen der Infektion eine speziell auf den Tumor zugeschnittene therapeutische Fracht in die Zelle einbringen. Durch Kombination dieser angepassten Viren mit weiteren Therapieformen wie therapeutischen Antikörpern, Zell- oder Radiotherapie werden Behandlungsschemata ermöglicht, die spezifisch auf jeden Tumortyp zugeschnitten sind und höchstmögliche Wirkung erzielen können.

### Virale Therapeutika als neue Wirkstoffklasse



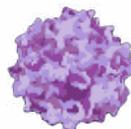
Aspirin



Insulin



Antikörper

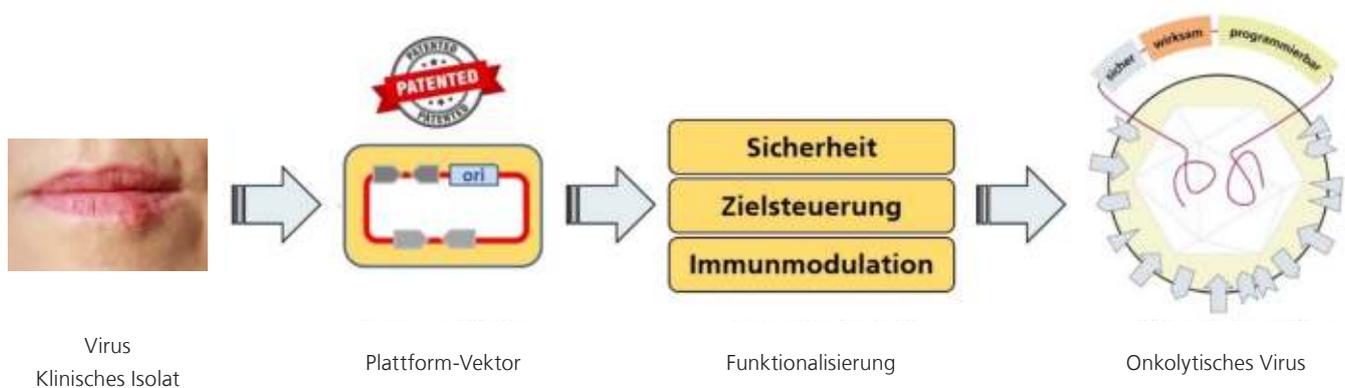


Viren



*Virusbasierte Therapeutika erfordern aufgrund ihres komplexen Aufbaus und ihrer Funktionsweise im Vergleich zu etablierten Substanzen, wie Aspirin oder Antikörpern, neue Arbeitsansätze sowohl in der Entwicklung und der Herstellung als auch der Testung.*

## Schematische Darstellung der patentierten TheraVision-Plattform



Die Plattform wurde auf Basis eines klinischen Isolates von HSV-1 entwickelt und ist als Fraunhofer-eigenes Patent angemeldet. Zwei vorliegende Rekombinationsstellen erlauben die modulare und effiziente Integration von zusätzlichen DNA-Sequenzen zur Funktionalisierung des Therapeutikums hinsichtlich Zielsteuerung und Immunmodulation. Durch die

Mutagenese von drei viralen Genen wurde das Virus attenuiert, sodass die Sicherheit und Verträglichkeit der Virotherapie gewährleistet ist. Somit steht eine sichere, wirksame und programmierbare onkolytische Virus-Plattform für weitere Entwicklungen bereit.

### Herausforderung: Herstellung von komplexen Virotherapeutika

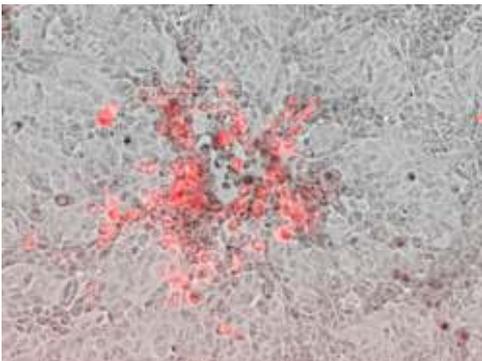
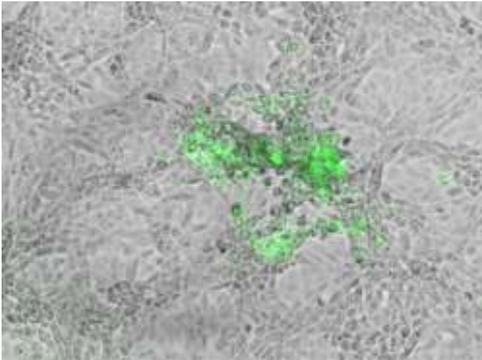
Trotz ihres großen Potenzials sind bis heute jedoch nur acht Virus-basierte Therapien großflächiger – das heißt sowohl durch die zuständigen Arzneimittelbehörden, die europäische EMA als auch die amerikanische FDA – zugelassen. Unter diesen acht Wirkstoffen befindet sich nur einer für die onkolytische Virotherapie, dem gegenüber standen im Februar 2024 aber 93 registrierte klinische Studien für die Virus-basierte Krebsbehandlung. Verglichen mit anderen etablierteren Therapieformen wie kleinen Molekülen oder monoklonalen Antikörpern steckt die erfolgreiche klinische Anwendung Virus-basierter Therapeutika also noch in den Kinderschuhen. Dies ist unter anderem auch darauf zurückzuführen, dass sich Viren von den meisten etablierten Wirkstoffen (Abbildung Seite 22 unten) durch eine komplexere Struktur und Zusammensetzung sowie Funktionsweise unterscheiden. Dies erfordert optimierte biotechnologische Prozesse, die den gesamten

pharmazeutischen Entwicklungs- und Herstellungsprozess umfassen.

Genau hier setzt die Förderung des Landes Baden-Württemberg zum Aufbau der neuen Außenstelle des Fraunhofer IGB in Biberach an der Reiß an: Wie der Name Virus-basierte Therapien verrät, fokussiert sich diese neue Forschungseinheit auf die biotechnologische Entwicklung von Virus-basierten Therapeutika mit den Bereichen Virus-, Zell- und Prozesstechnologien. Aufbau und Start der Außenstelle in Biberach wurden dabei maßgeblich von den etablierten Kompetenzen und Infrastrukturen am Hauptsitz des Fraunhofer IGB in Stuttgart unterstützt.

### Schwerpunkt Virustechnologien: Entwicklung von maßgeschneiderten viralen Wirkstoffen

Im Bereich der Virustechnologien liegt der Hauptfokus der Arbeiten an beiden Standorten im molekularen Virus-Engineering, also der gezielten Modifikation von Virusgenomen,



*Virus-Engineering basierend auf der Technologieplattform TheraVision. GFP- (oben) und Katushka- (unten) exprimierende Reporterviren erlauben die Nachverfolgung des Infektionsverlaufs und der Replikationseffizienz in infizierten Zellen.*

um damit Entwicklungen zur höheren Effizienz und Aktivität von onkolytischen Viren anzustoßen. Ein wichtiger Grundstein der Arbeiten bildet die zuvor entwickelte Fraunhofer-eigene Plattformtechnologie TheraVision, welche als modulare Vektor-technologie zur Herstellung und Testung von Viren für die Tumorthherapie konzipiert wurde und auf dem Herpes Simplex Virus 1 (HSV-1) aufbaut (Abbildung Seite 23 oben).

Beim Virus-Engineering kommt uns besonders das modulare Prinzip der TheraVision-Plattform zugute, was eine schnelle gentechnische Manipulation des zugrundeliegenden komplexen

Herpesvirus erlaubt. Vor kurzem wurden damit sogenannte Reporterviren hergestellt, die nach der Infektion fluoreszierende Proteine exprimieren und es deshalb ermöglichen, den Infektionsverlauf in den befallenen Zellen in Echtzeit zu verfolgen (Abbildung Seite 24).

Neben diesen HSV-1-basierten Entwicklungen werden im Bereich Virus-Technologien weitere therapeutisch relevante Vektorsysteme wie dem Vesikulären Stomatitisvirus und dem Adenovirus etabliert. Die Nutzung dieser verschiedenen viralen Vektorsysteme erlaubt komplementäre Untersuchungen zu Struktur-Funktionsbeziehungen der zugrundeliegenden Virusspezies, um Erkenntnisse zu deren therapeutischer Sicherheit, Spezifität, Wirksamkeit und Stabilität zu erhalten.

**Schwerpunkt Zelltechnologien: Zell-Engineering zur Steigerung von Ausbeute und Aktivität therapeutischer Viren**

Entwicklungen aus dem Bereich Virus-Technologien wie die fluoreszierenden Reporterviren werden in Zukunft auch komplementär in der Sparte Zelltechnologien eingesetzt. Ein Schwerpunkt dieses Bereiches liegt im Zelllinien-Engineering, mit dem Ziel gängige Produktionszellen so zu verändern, dass die Ausbeute an funktionellen Viren für den

therapeutischen Einsatz erhöht wird. Für immunonkologische Anwendungen werden nämlich um vielfach höhere Virusdosen als bei klassischen Impfungen benötigt, was gerade eine der größten Hinderungsgründe für eine noch stärkere therapeutische Anwendung bildet. Innovative Methoden wie die CRISPR/CAS-Technologie ermöglichen dabei die gezielte Modifikation des Zellmetabolismus, der Apoptoseprozesse, der Zellteilung oder der antiviralen angeborenen Immunantwort, um die Produktionszelllinie resistenter gegen Virus-induzierte Stressreaktionen zu machen. Fluoreszierende Viren erlauben hier ein direktes At-line-Monitoring der verbesserten Produktionsleistung der CRISPR/CAS-modifizierten Zelllinien.

Darüber hinaus können unsere Reporterviren auch zur präklinischen Effizienztestung genutzt werden, wobei deren Replikationskinetik und Gewebepenetration in komplexen Tumormodellen nachverfolgt wird. Die Verwendung von solchen patientenspezifischen Tumormodellen erlaubt außerdem die Analyse der differenziellen oder synergistischen Antitumor- und immunaktivierenden Effekte des TheraVision-Virus vergleichend mit anderen Virussystemen wie den Vesikulären Stomatitisviren und den Adenoviren. Dadurch können Faktoren identifiziert werden, die die individuelle Wirksamkeit der onkolytischen Immuntherapie beeinflussen.

**Schwerpunkt Prozesstechnologien: optimierte Produktion, Reinigung und Analytik von viralen Therapeutika**

Komplementiert werden diese Arbeiten im Bereich Zell- und Virus-Technologie durch Verfahren der Prozesstechnologie wie Prozessentwicklung, -analytik und -skalierung. Im Downstream Processing etwa stehen chromatographische Bioseparationsverfahren zur verlustarmen Aufreinigung der verschiedenen therapeutischen Virusklassen oder Kryokonservierungs- und Formulierungsstudien im Vordergrund, um maximale Produktstabilität zu erreichen.

**Weitere Informationen**



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

**Kontakt**

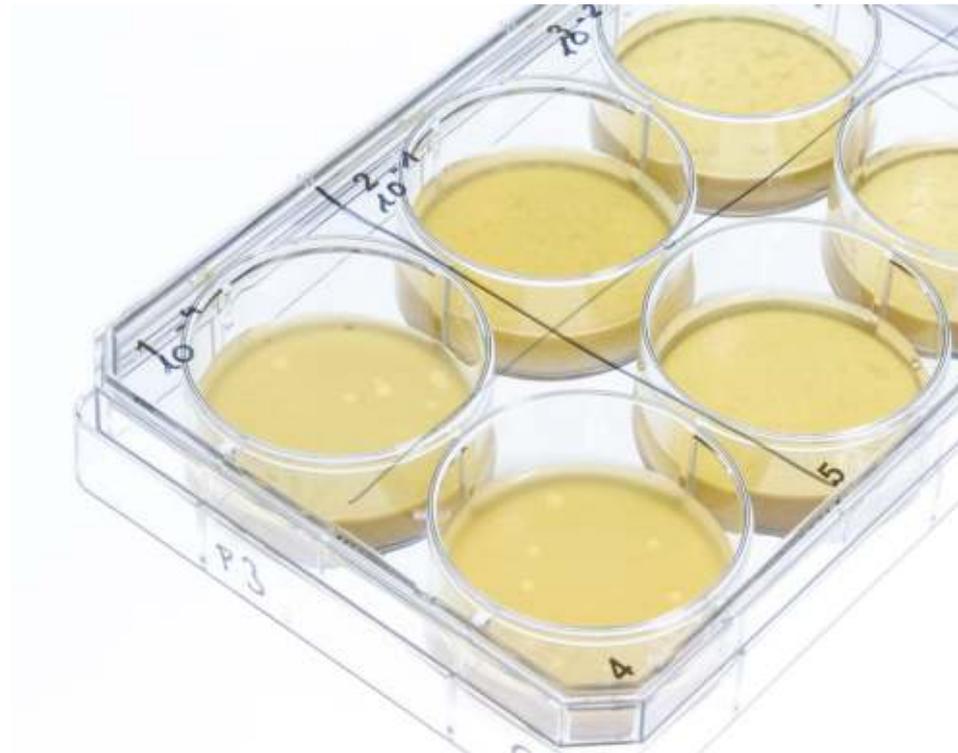
Dr. Monika Strengert  
Tel. +49 711 970-4104  
monika.strengert@igb.fraunhofer.de

## Bakterien mit Bakteriophagen gezielt und effektiv bekämpfen

Zusätzlich zu Viren, die menschliche Zellen erkennen und in der Onkologie sowie Gentherapie eingesetzt werden, rücken auch Bakteriophagen zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen. Diese Viren, die ausschließlich Bakterien infizieren, bieten durch ihr enges Wirtsspektrum die Möglichkeit, Bakterien präzise und effizient zu bekämpfen. Angesichts der wachsenden Bedrohung durch antimikrobielle Resistenzen (AMR) gelten Bakteriophagen als vielversprechende Alternative oder Ergänzung zu Antibiotika, da sie auch resistente Erreger wirksam eliminieren können.

Experten betrachten Bakteriophagen als innovative Lösung mit großem Potenzial für viele Anwendungen, in denen Bakterien zu Beeinträchtigungen führen – nicht nur in der Präzisionsmedizin. Neben der Behandlung bakterieller Infektionen in der Human- und Veterinärmedizin eröffnen sie Perspektiven für eine breite Anwendung im Pflanzenschutz sowie der Lebensmittelkonservierung und sind damit universell im Rahmen des One-Health-Ansatzes einsetzbar.

Mit Blick in die Zukunft setzen wir auf die Weiterentwicklung der Bakteriophagenforschung und deren Translation in praktische Anwendungen. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung effizienter Produktionsprozesse und zuverlässiger Nachweisverfahren, um die Sicherheit und Wirksamkeit dieser natürlichen antimikrobiellen Wirkstoffe zu überprüfen. Dadurch wird die Grundlage für eine gezielte und nachhaltige Nutzung von Bakteriophagen in verschiedenen Anwendungsbereichen geschaffen.



*Plaques zeigen die Infektion und Lyse von Bakterien durch Bakteriophagen*

## Fraunhofer IGB bildet komplette Entwicklungskette ab: vom Virus-Engineering bis zur Analyse des Endprodukts

Letztendlich umfassen die so etablierten Kompetenzen an beiden Standorten die gesamte pharmazeutische Entwicklungskette viraler Therapeutika beginnend beim molekularen Virus-Engineering zur Aktivitäts- und Effizienzsteigerung, über die Prozessentwicklung zur Herstellung therapeutischer Viren und deren Überwachung bis hin zu verbesserten Analysemethoden des Endproduktes und werden so zur Etablierung von onkolytischen Viren und Bakteriophagen als neue Wirkstoffklassen signifikant beitragen.

### Weitere Informationen



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

### Kontakt

Dr. Carina Rohmer  
Tel. +49 711 970-4049  
carina.rohmer@  
igb.fraunhofer.de



**Wertstoffe lassen sich umso besser zurückgewinnen, je höher sie konzentriert sind. Dieses Prinzip machen wir uns in unserer Forschung zu eigen.«**

**Dr.-Ing. Marius Mohr**

Abteilungsleiter Wassertechnologien, Wertstoffgewinnung und Scale-up



# Kreislaufwirtschaft: Nutzung von Abwasser, Abfall und Abgas

## Entwicklung, Pilotierung und Markteinführung nachhaltiger Verfahren zur Nutzung und Rückgewinnung von Reststoffen

Für die Transformation zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sind neue Verfahren zur Nutzbarmachung von Rest- und Abfallstoffen erforderlich. Das Fraunhofer IGB entwickelt Verfahren zur Rückgewinnung wertvoller Inhaltsstoffe aus Abwasser, Abfall und Abgas – vom Labor- über den Technikums- bis zum Pilotmaßstab. Mit seinem Know-how zur Digitalisierung und Skalierung von Prozessen sowie eigenen Pilotanlagen unterstützt das Fraunhofer IGB Start-ups, KMU sowie Kommunen, Stadtwerke und Zweckverbände bei der Umsetzung neuer Technologien.

Bisher werden in der Industrie und in den Kommunen anfallende Nebenprodukte oder Abfälle häufig noch entsorgt. In einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft stellen Rest- und Abfallstoffe dagegen eine wichtige Ressource dar.

- Kohlenstoff darf nicht mehr aus fossilen Ablagerungen in die Atmosphäre freigesetzt werden, sondern muss im Kreislauf geführt und möglichst in Wertstoffen gebunden werden.
- Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor müssen ebenfalls im Kreislauf geführt werden, und zwar mit minimalem Energieverbrauch und ohne die Umwelt negativ zu beeinflussen (keine Überdüngung, Eutrophierung).
- Rückgewinnung und Recycling sind für eine Kreislaufwirtschaft essenziell. Um dies wirtschaftlich und effizient zu ermöglichen, ist einerseits ein intelligentes Management (z. B. Vermeiden von Verunreinigungen bzw. Verdünnungen), andererseits gute Verfahrenstechnik (Stofftrennung, Aufreinigung, Umwandlung etc.) notwendig.
- Angesichts der Endlichkeit fossiler und biologischer Rohstoffe wird es für Unternehmen, Kommunen und Staaten immer wichtiger, vorhandene Ressourcen effizienter und intelligenter zu nutzen und Inhaltsstoffe nach dem Ansatz der Kreislaufwirtschaft für eine stoffliche oder energetische Nutzung zurückzugewinnen.

## Fraunhofer IGB – Partner bei der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen als Sekundärrohstoffe

Reststoffe, Abfälle, Abwässer sowie Abluft aus der Verbrennung können zwar genutzt und zu sogenannten Sekundärrohstoffen aufgearbeitet werden, sie sind aber im Normalfall stark verunreinigt bzw. die nutzbaren Wertstoffe sind miteinander vermischt oder verdünnt. Dies hat lange Zeit dazu geführt, dass man sie lieber deponiert oder verbrannt hat – und somit auf eine Aufreinigung verzichten konnte. Es wird aber zunehmend klar, dass sich unsere Gesellschaft diese Art der Entsorgung nicht mehr leisten kann.

### Selektive Trennung als Schlüssel zur Kreislaufführung

Daher werden innovative Verfahren benötigt, welche die Kreislaufführung auch von komplexen Gemischen ermöglichen. Damit Inhaltsstoffe aus einer äußerst komplexen Matrix herausgelöst und zurückgewonnen werden können, bedarf es einer spezifischen Aufbereitung.

Die möglichst selektive Trennung ist ein weiterer entscheidender Schritt für die Nutzung von sekundären Rohstoffen. Die Schritte der Stofftrennung sind bisher aufwendig und bestimmen daher wesentlich die Betriebskosten, aber auch die Nachhaltigkeit der Prozesse. Um dieses Problem zu lösen, entwickelt das Fraunhofer IGB Verfahren, welche die Energie- und Kosteneffizienz im Vergleich zu etablierten Prozessen erheblich steigern oder die selektive Trennung bestimmter Abfallstoffe erst ermöglichen.



*Pilotanlage zur Rückgewinnung von Stickstoff aus Abwasser*

### Skalierung und Pilotierung als Brücke zum Markt

Bei der Erschließung sekundärer Stoffströme für die Transformation zu einer grünen, bioökonomischen Wirtschaft spielt die Skalierung eine Schlüsselrolle. Neue Verfahren müssen nicht nur im kleinen Maßstab funktionieren, sondern auch auf industriellem Niveau. Pilotanlagen unterstützen bei der Skalierung von Recyclingprozessen und damit bei der Markteinführung neuer sekundärer Produkte.

Das Fraunhofer IGB ist Partner für Kommunen und Industrieunternehmen, um Reststoffe zu nutzen und gleichzeitig Abfälle zu minimieren. Seit über 40 Jahren entwickelt das Institut Verfahren für die Aufbereitung von Abfall und Wasser – von den verfahrenstechnischen Grundlagen über den Technikumsmaßstab bis hin zur großtechnischen Anlage. Dabei unterstützen wir mit unserem Know-how und unserer Expertise auch bei der Digitalisierung von Prozessen, der technischen Realisierung und Inbetriebnahme der Anlagen als auch bei Fragen zur Prozesssicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Darüber hinaus stellen wir mit unseren eigenen Pilotanlagen modernste Infrastruktur und Apparatechnik zur Verfügung. Damit sparen Sie nicht nur Kosten, sondern reduzieren auch Entwicklungsrisiken.

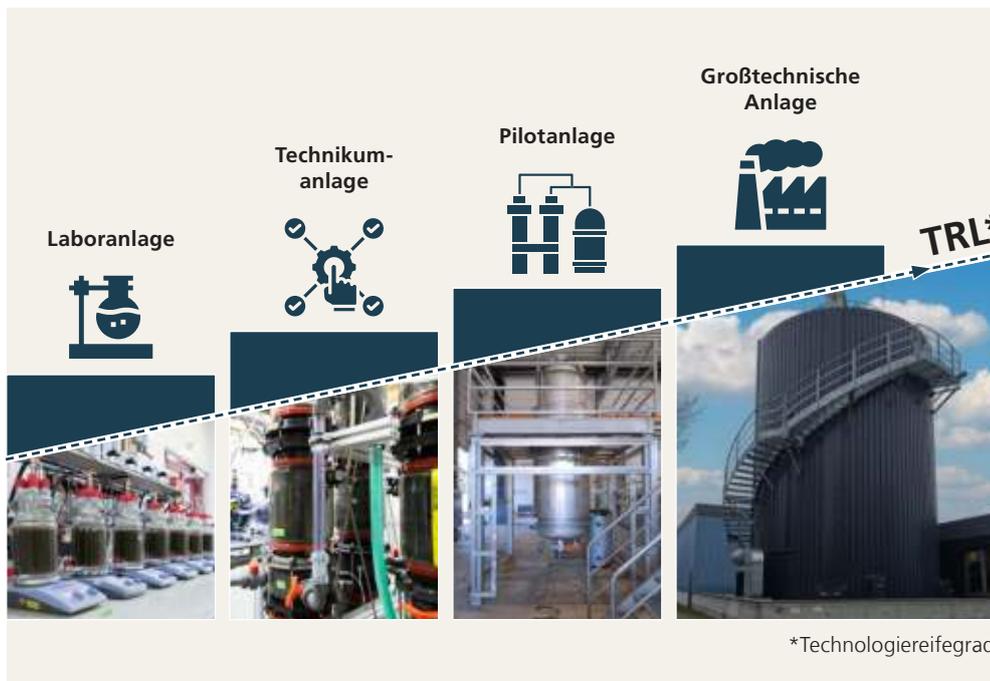
# Entwicklung und Skalierung vom Technikums- bis zum Industriemaßstab

## Profitieren Sie von Know-how und Infrastruktur

In unseren Labors und Technika untersuchen wir Grundlagen, wie die Torrefizierung oder Vergärbarkeit verschiedener biogener Reststoffe und Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Nährstoffen, und entwickeln Konzepte für die großtechnische Umsetzung.

Für einige Verfahren stehen Pilotanlagen zur Verfügung, um sie entweder in unseren Technika oder aber direkt vor Ort an Standorten, an denen Abfälle anfallen, einzusetzen und zu erproben.

Zudem gehören die Planung, die Auslegung und der Bau von Pilot- und Demonstrationsanlagen für spezifische Anwendungen zu unserem Leistungsspektrum. Für großtechnische Anlagen werden das Basic- und Detail-Engineering durch unsere industriellen Partner aus dem Anlagenbau bewerkstelligt.



Vom Labor zum großtechnischen Maßstab: Neu entwickelte Verfahren werden stufenweise auf einen größeren Maßstab übertragen. Die Skalierung resultiert in unterschiedlich dimensionierten Anlagen mit jeweils größeren Aufbereitungskapazitäten.

## So arbeiten Sie mit uns zusammen

### Entwicklung und Pilotierung im Kundenauftrag

Wir übertragen Prozesse in den Pilotmaßstab.

- Auswahl des passenden Equipments
- Verfahrensauslegung für optimales Ineinandergreifen aller Prozessschritte
- Optimierung im Hinblick auf Produktausbeute und -qualität, Material- und Energieeffizienz
- Unterstützung bis zur Inbetriebnahme im Unternehmen/Übergabe an einen Lohnfertiger oder bis zur Anlagenauslegung

*Die Cométha-Pilotanlage bei Triel-sur-Seine in der Nähe von Paris*

### Beispiele

#### **Cométha: Innovationspartnerschaft von SIAAP und Syctom zur Behandlung organischer Abfälle und Klärschlämme im Großraum Paris**

Um die im Großraum Paris in großen Mengen anfallenden Abfälle bestmöglich zu verwerten, wurde die Forschungspartnerschaft Cométha ins Leben gerufen. Eines der mit der Erforschung und Pilotierung der Behandlung von organischen Abfallstoffen betrauten Konsortien ist eine deutsch-französische Kooperation unter Beteiligung des Fraunhofer IGB. Die Pilotanlage nutzt eine innovative Verfahrenskombination, welche im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren insbesondere eine deutlich höhere Biomethanerausbeute erreicht. Neben der Biomethanerzeugung trägt die Anlage zur Rückgewinnung wichtiger Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor bei. Ende Dezember 2024 wurde die unter maßgeblicher Beteiligung des Fraunhofer IGB realisierte Pilotanlage in Paris in Betrieb genommen.

► [www.igb.fraunhofer.de/cometha-inbetriebnahme](http://www.igb.fraunhofer.de/cometha-inbetriebnahme)



### Geförderte Forschungs- und Entwicklungsprojekte

Wir demonstrieren neue Prozesse in einem geförderten (Verbund-)Projekt.

- Identifizierung geeigneter Fördermaßnahmen und notwendiger Partner
- Ausarbeiten von Projektstrukturen
- Mögliche Koordination von Verbundvorhaben
- Skalierung in bestehenden Anlagen oder Konzeptionierung und Neubau dezidiertener Anlagen
- Gemeinsame Vermarktung und Lizenzierung bei geteilter Intellectual Property

Ausgewählte aktuelle Beispiele für die Zusammenarbeit in Verbundprojekten (RoKka, InBiRa, SmartBioH<sub>2</sub>-BW, KoalAplan, H<sub>2</sub>Wood – Black Forest) finden Sie auf den nachfolgenden Seiten in diesem Bericht.

## Fraunhofer-Pilotanlagen als Brücke zur Umsetzung

Sie nutzen unser Know-how und unsere Pilotanlagen zur Optimierung Ihrer Prozesse.

Wir verfügen über Pilotanlagen, teilweise auch mobil, für die Erprobung von Verfahren in unseren Technika oder bei Ihnen vor Ort.

- Durch die Zusammenarbeit mit uns ersparen Sie sich Investitionen in eigene Pilotanlagen.
- Die Nutzung bereits existierender Pilotanlagen erspart Ihnen Zeit, sodass die Markteinführung wesentlich beschleunigt wird.
- Sie brauchen kein Personal für den Betrieb der Anlagen abstellen.
- Wir unterstützen Sie bei der Identifizierung von Fördermaßnahmen, etwa im Rahmen der Ausschreibung »Industrielle Bioökonomie« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

## Torrefizierung von lignocellulosehaltigen Reststoffen

Für Untersuchungen zur energetischen und stofflichen Nutzung lignocellulosehaltiger Biomasse steht am Fraunhofer IGB eine Pilotanlage zur Torrefizierung mit überhitztem Wasserdampf (superheated steam, SHS) zur Verfügung. Das zu trocknende oder zu torrefizierende Material wird in die SHS-Atmosphäre eingebracht, wo es konvektiv mit Wärme versorgt wird. Die bei der Torrefizierung freigesetzten flüchtigen Verbindungen werden als Kondensatfraktion für eine Weiterverarbeitung und Nutzung gewonnen.

► [www.igb.fraunhofer.de/torrefizierung](http://www.igb.fraunhofer.de/torrefizierung)

## Vergärung organischer Reststoffe und Pilotanlage zur Hochlastfaulung auf Kläranlagen

Eine sinnvolle Möglichkeit, komplexe Abfallströme wie Klärschlamm, Gülle, Bioabfall oder andere organische Reststoffe zu nutzen, besteht in der Vergärung der organischen Substanz mittels Hochlastfaulung. Das am IGB zur Effizienzsteigerung bei der Klärschlammfaulung entwickelte Verfahren zeichnet sich durch einen wesentlich verbesserten Wirkungsgrad, kurze Verweilzeiten und hohen Abbaugrad gegenüber herkömmlichen Faulungen aus, verbunden mit einer wesentlich erhöhten Ausbeute an Biogas als regenerativer Kohlenstoff- und Energiequelle.

Hochlastfaulungen werden hinsichtlich ihrer Integration in den Gesamtprozess der Schlammbehandlung einer Kläranlage individuell dimensioniert und ausgeführt. Für die erfolgreiche Realisierung einer Hochlastfaulung untersuchen wir die Vergärbarkeit, z. B. des Rohschlammes, im Hochlastbetrieb zuvor im Technikumsmaßstab. Bei Bedarf können wir das Verfahren der Hochlastfaulung auch zunächst im Pilotmaßstab auf der Kläranlage umsetzen und vor Ort betreiben.

► [www.igb.fraunhofer.de/hochlastfaulung](http://www.igb.fraunhofer.de/hochlastfaulung)

Hochlastfaulung auf der Kläranlage Erbach



### Rückgewinnung von Nährstoffen

Nährstoffe sind als Hauptbestandteile von Düngemitteln unverzichtbar für die weltweite Nahrungsmittelproduktion. Bisher werden sie mit der Ernte der Pflanzen aus dem Agrarökosystem entfernt. Dabei sind nicht nur Gülle und Gärreste, sondern auch kommunale Abwässer und Reststoffe der Lebensmittelindustrie reich an Stickstoff, Phosphor, Kalium oder Calcium. Das Fraunhofer IGB hat verschiedene Technologien und Verfahren entwickelt, um wertvolle Nährstoffe aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststofffraktionen zurückzugewinnen und zu pflanzenverfügbaren Düngern aufzuarbeiten. Gerne untersuchen wir, wie sich Nährstoffe auch aus Ihren Reststoffen zurückgewinnen lassen.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/naehrstoffrueckgewinnung](http://www.igb.fraunhofer.de/naehrstoffrueckgewinnung)

### ePhos® – elektrochemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor

Mit ePhos® werden die Stoffe in einem elektrochemischen Prozess als pflanzenverfügbares Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP, Struvit) ausgefällt. Struvit ist ein hochwertiger Langzeitdünger und kann in der Landwirtschaft direkt als Düngemittel eingesetzt werden.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/lephos](http://www.igb.fraunhofer.de/lephos)

### Rückgewinnung von Ammonium aus Abwasser

Am Fraunhofer IGB untersuchen wir den Prozess der chemischen Transmembranabsorption als neues Verfahren, um Ammoniak aus konzentrierten Stoffströmen für den Einsatz als Düngemittel zurückzugewinnen.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/ammonium-abwasser](http://www.igb.fraunhofer.de/ammonium-abwasser)

### Insektenbioraffinerie-Pilotanlagenkomplex

Für die Insektenmast besitzen wir eine Genehmigung des Regierungspräsidiums, um tierische Nebenprodukte (Fisch, Fleisch) als Substrat für die Insektenlarven verwenden zu können. Gerne testen wir Abfälle und Reststoffe im Kundenauftrag oder im Verbund mit Partnern und untersuchen deren Verwertbarkeit durch die Larven, analysieren die Primärfractionen Fett, Protein und Chitin und wandeln diese zu Fettsäureestern, Biotensiden, Seifen, Proteinhydrolysaten und Chitosan um.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/insektenbioraffinerie](http://www.igb.fraunhofer.de/insektenbioraffinerie)

### Optimierung der biologischen Behandlung schwer abbaubarer Substanzen in Industrieabwässern

Durch gezielte Untersuchungen, Simulationen und biotechnologische Ansätze optimieren wir biologische Behandlungsverfahren für die Elimination von Schadstoffen, die sich unter normalen Bedingungen nur schwer biologisch abbauen lassen. Dazu untersuchen wir die biologische Abbaubarkeit nach OECD-Standards zunächst im Labormaßstab, um bereits erste Maßnahmen für eine angepasste Behandlungsstrategie zu identifizieren. Diese verifizieren wir in einem größeren Maßstab (20 L, 200 L) in unseren Sequencing Batch Reaktoren (SBR) und simulieren begleitend die Auswirkungen der Optimierungsmaßnahmen auf die biologische Abbaubarkeit.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/biologische-abwasserbehandlung](http://www.igb.fraunhofer.de/biologische-abwasserbehandlung)



#### Links:

[ePhos®: eingehauster Magnesiumbarren als Opferanode](#)

#### Rechts:

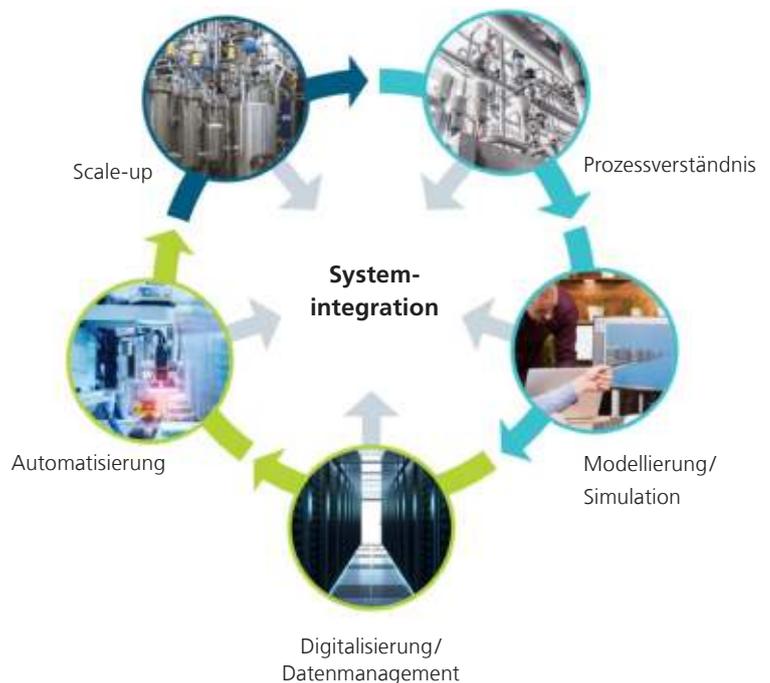
[Die Pilotanlage zur Ammonium-Rückgewinnung besteht aus vier parallel angeordneten Hohlfasermembranmodulen, die derzeit rund 300 Liter Prozesswasser pro Stunde aufbereiten.](#)

# Digitalisierung (bio-)verfahrenstechnischer Anlagen

## Wir optimieren Ihre Prozesse durch Digitalisierung

Wir kombinieren Prozesswissen mit Digitalisierung. Wir verstehen Ihre Prozesse und digitalisieren Ihre Daten für die kosteneffiziente Optimierung Ihrer Prozessführung. Dies gelingt uns durch eine erste Datenanalyse, eine effiziente Daten-Kommunikation und simulationsgestützte Steuerung mittels digitaler Zwillinge.

Die Digitalisierung in der Prozess- und Verfahrenstechnik schafft die Grundlage für weitreichende Fortschritte und neue Möglichkeiten: Durch intelligente Vernetzung von Maschinen und Systemen über kommunizierende Sensornetzwerke sowie die kombinierte Nutzung von Datenanalysen und digitalen Zwillingen können Prozesse optimiert werden. Doch mehr noch: Verschiedene Verfahrensschritte lassen sich auch nahtlos zusammenführen, integrieren und automatisieren.



Doch in der Realität stehen – aus Sicht der Digitalisierung – viele Prozesse heute noch im Stadium der Pilotphase. Die Gründe dafür sind vielfältig: Die vorhandene Messtechnik und Datenbasis stehen oftmals als separate, nicht integrierbare Daten- bzw. Softwareinseln da. Zudem ist die Kommunikation zwischen einzelnen Anlagenmodulen häufig noch unzureichend und wichtige Prozessdaten werden vielfach nur als Momentaufnahme dargestellt. Die Einführung digitaler und KI-basierter Tools ist außerdem zeitaufwändig und benötigt neben den IT-Kompetenzen für die Implementierung der systemintegrativen Maßnahmen auch das verfahrenstechnische Fachwissen entlang der gesamten Prozesskette.

Eine Vielzahl von Unternehmen, insbesondere KMU, kann zeitaufwändige und kostenintensive Digitalisierungsaufgaben aufgrund begrenzter Kapazitäten, fehlender Kompetenzen und der Gleichzeitigkeit verschiedener anderer Herausforderungen kaum leisten, sodass der Vorteil, der sich durch die Prozess-Digitalisierung ergeben würde, noch viel zu selten genutzt wird.



## Wir überführen Ihre Prozesse in die digitale Welt

Am Fraunhofer IGB arbeiten wir seit mehreren Jahren in Projekten an der Entwicklung digitaler Anwendungen und deren Integration in die verfahrenstechnische Praxis – auch als Dienstleister für Unternehmen. Wir verfügen über umfangreiche Expertise in der Prozesstechnik und unserem Know-how zur Modellierung und Simulation sowie zum Datenmanagement. So können wir Unternehmen bestmöglich beraten und auf dem Weg zur Prozess-Digitalisierung und -Automatisierung begleiten und voranbringen. Dabei profitieren Sie von unseren langjährigen Erfahrungen und Kompetenzen in der Automatisierungstechnik, der Skalierung, der Auslegung und dem Bau verfahrenstechnischer Anlagen.



So sind wir in der Lage, Sie entlang der gesamten Entwicklungskette eines Prozesses zu unterstützen – von der Forschung und Entwicklung im Technikumsmaßstab bis zur Umsetzung in den technischen, automatisierten Prozess mit Fernüberwachung in Echtzeit.

## Digitalisierung Ihrer Prozesse



Beispiel einer digitalisierten Anlage

### Datenstrukturierung: Wir schaffen die Voraussetzung für die Anwendung von KI in der Prozesstechnik

Damit analysierte Prozessdaten zur digitalen Optimierung und Steuerung von Prozessen eingesetzt werden können, müssen sie zunächst für die jeweiligen Nutzer (Prozessbetreiber, Planer, Wissenschaftler) zugänglich gemacht werden.

Hierfür schaffen wir am Fraunhofer IGB eine organisierte und prozessorientierte Daten-Struktur. Diese ist Voraussetzung für die Anwendung jeglicher KI-Tools zur Datenauswertung und Modellierung oder Simulation. Die Strukturierung der vorliegenden Daten ist damit ein grundlegender Meilenstein auf dem Weg zur Digitalisierung von Prozessen.

### Datenmanagement: Wir sorgen dafür, dass Ihre Daten miteinander kommunizieren und machen sie KI-fähig

Unser Hauptaugenmerk am Fraunhofer IGB liegt auf einem integrierten und prozessorientierten Datenmanagement. Hierfür analysieren wir Ihre Messdaten und sorgen dafür, dass alle Daten erhoben und in die Struktur integriert werden und miteinander kommunizieren können: Die Vernetzung verschiedener Daten und Protokollformate, ein automatisierter Transfer und die Sicherung von Anlagendaten (inkl. Offline-Daten wie Analytikdaten) schaffen die Voraussetzung für eine smarte Prozesssteuerung und Automatisierung sowie eine effiziente Datenbearbeitung (Betriebsanalyse, Modellierung ...).

Unser Datenmanagement ist kosteneffizient, da es nur geringen Hardware-Einsatz benötigt und auf teure kommerzielle Lösungen verzichtet.

# Optimierung und Automatisierung Ihrer Prozesse

## Wir optimieren die Betriebsführung durch Fernüberwachung in Echtzeit

Durch die effiziente Datenstruktur können die Prozessdaten gleichzeitig für die Visualisierung als auch für die Automatisierung sowie Modellierungsaufgaben genutzt werden. So ziehen wir sie zur Visualisierung des Prozesses, für die Prozessoptimierung durch Betriebsanalyse und die Entwicklung innovativer Automatisierungskonzepte heran. Mit diesem Wissen realisieren wir für Ihren Prozess eine Anlagenüberwachung und Anlagensteuerung als Fernüberwachung in Echtzeit.

Dabei wählen wir die notwendigen Sensoren und Aktoren so aus, dass auch die richtigen Daten zur Steuerung der Anlage erhoben werden. Um Kosten für aufwändige Messtechnik, beispielsweise Durchflusssensoren, zu sparen, entwickeln wir dabei auch Softsensoren. Diese können mithilfe der richtigen Programmierung die erforderlichen Daten aus bereits erhobenen Messpunkten berechnen.

Darüber hinaus entwickeln wir Modelle, sogenannte digital twins, mit deren Hilfe wir eine simulationsunterstützte Steuerung programmieren können, um Ihren Prozess zu optimieren. So ist es möglich, Prozessparameter dynamisch zu variieren, um beispielsweise den Energieeintrag zu minimieren bzw. den Produktertrag zu maximieren.

## Anlagenplanung: Design und Szenarienbewertung durch Prozesssimulation

Wir legen Ihre Anlage mit den benötigten Anlagenkomponenten aus. Hierzu bilanzieren und modellieren wir Ihre Prozesse anhand von Massen- und Energiebilanzen. Dabei greifen wir auf Methoden der physikalischen Modellierung zurück, setzen bei Bedarf aber auch KI-Tools oder hybride Modelle ein. Anhand von Prozesssimulationen können wir die Effizienz Ihrer geplanten Anlage vorhersagen und so die Wirtschaftlichkeit Ihres Projekts erhöhen. Für den optimalen Betrieb von Anlagen sind oft auch nicht vorhersagbare Parameter entscheidend: Durch unterschiedliche Standorte, Jahreszeiten oder Wetterverhältnisse werden Anpassungen der Prozessführung erforderlich. Diese dynamischen Daten können in unsere Berechnungen (MatLab/Simulink) einfließen. So sind wir in der Lage, mit unseren Simulationen Prognosemodelle für verschiedene Szenarien zu generieren.



**Wir verstehen Ihre Prozesse und nutzen Ihre digitalen Daten, um Ihre Betriebsabläufe kosteneffektiv zu optimieren. Wir kombinieren Prozesswissen mit Digitalisierung.«**

**Dr.-Ing. Antoine Dalibard,**  
Gruppenleiter Physikalische und chemische Prozesstechnik

## Weitere Informationen



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

Dr.-Ing. Antoine Dalibard  
Simulation und Modellierung  
Tel. +49 711 970-4130  
antoine.dalibard@  
igb.fraunhofer.de

Alexander Laug  
Automatisierung  
Tel. +49 711 970-4451  
alexander.laug@  
igb.fraunhofer.de

# Pilotanlagen zur Demonstration von Abfall- und Abwasser-Bioraffinerien

---

Mithilfe von Bioraffinerien lassen sich organische Reststoffe auf verschiedenste Art stofflich verwerten. Das Prinzip einer Bioraffinerie weist – bis auf die verwendeten Rohstoffe – Ähnlichkeiten mit dem einer Erdölraffinerie auf, in der ein komplex zusammengesetzter Rohstoff in einzelne Fraktionen oder Komponenten getrennt wird.

Durch die biotechnologische, chemische, elektrochemische oder thermische Umwandlung von Reststoffen nach dem Prinzip einer Bioraffinerie können so unterschiedliche wertschöpfende Produkte hergestellt werden: Basischemikalien und Biowasserstoff, Algenbiomasse und Bio-kohle, hochwertige organische Dünger u. v. m.

Für die Demonstration in einem größeren Maßstab wurden nun verschiedene Verfahren erstmals in Pilotanlagen kombiniert und unter realen Bedingungen erprobt. Um die entwickelten Technologien und Verfahren in die Anwendung zu bringen und anfallendes Abwasser und Abfälle als Rohstofflieferant nutzen zu können, stehen diese Pilotanlagen am IGB zur Nutzung bereit.

## EFRE-Programm »Bioökonomie Bio-Ab-Cycling« fördert Aufbau von Bioraffinerien

---

Ab Oktober 2021 ermöglichte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg fünf Bioraffinerie-Projekte des IGB mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung EFRE. Die Förderung erfolgte im Rahmen der Fachinitiative »Bioökonomie – Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall und Abwasser – Bio-Ab-Cycling«. In drei dieser fünf Bioökonomie-Vorhaben war das IGB federführend: Im Projekt InBiRa konnte erstmals eine Insektenbioraffinerie zur Herstellung von Proteinen, Fetten und Chitosan am Institut aufgebaut werden, bei der Abwasser-Bioraffinerie RoKka ging es darum, Klärschlamm als Rohstoffquelle zu nutzen und die Klimabilanz von Kläranlagen zu verbessern, und im Zuge von SmartBioH<sub>2</sub>-BW wurden zwei biotechnologische Verfahren miteinander verknüpft, um aus industriellen Abwasser- und Reststoffströmen Biowasserstoff und weitere Produkte zu gewinnen. Auch im Projekt BW2Pro war das IGB daran beteiligt, Bioabfälle in hochwertige Produkte und Rohstoffe zu verarbeiten. In der weiteren Abwasser-Bioraffinerie KoalAplan dagegen steuerten IGB-Forschende ihre Expertise bei, um kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik zu verwenden. Alle fünf Projekte wurden im Oktober 2024 erfolgreich abgeschlossen. Um die entwickelten Technologien und Verfahren in die Anwendung zu bringen, steht am IGB auch die Infrastruktur zum Hochskalieren in größere Maßstäbe bereit – bis hin zum Industriemaßstab.

# Projekt RoKka wandelt Kläranlagen in Bioraffinerien

## Mit der Kläranlage der Zukunft zur Kreislaufwirtschaft

Das durch das Fraunhofer IGB und Umwelttechnik BW koordinierte Verbundprojekt »RoKka – Rohstoffquelle Klärschlamm und Klimaschutz auf Kläranlagen« hat gezeigt, dass Kläranlagen zu einer kommunalen Kreislaufwirtschaft und zum Klimaschutz beitragen können. Auf der Kläranlage der Stadt Erbach (Donau) wurden sieben Pilotanlagen betrieben, um Phosphor- und Stickstoffverbindungen für die Düngemittelproduktion zurückzugewinnen, CO<sub>2</sub> aus dem Faulgas als Rohstoff für neue Produkte zu nutzen und Lachgasemissionen auf der Kläranlage zu reduzieren.

Kläranlagen reinigen unser Abwasser – in Deutschland über 9 Milliarden Kubikmeter pro Jahr. Dabei entfernen sie nicht nur organische Verunreinigungen, sondern auch große Mengen an Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor. Doch mit der konventionellen Abwasserreinigung gehen die wichtigen Pflanzennährstoffe verloren: Stickstoffverbindungen werden unter hohem Energieverbrauch zu molekularem Stickstoff umgewandelt, der als Gas in die Atmosphäre entweicht. Phosphor wird zumeist in Form von wasserunlöslichen und damit nicht pflanzenverfügbaren Eisen- oder Aluminiumphosphaten gefällt und mit dem Klärschlamm entsorgt – obwohl die natürlichen Phosphatvorkommen für die Produktion von Düngemitteln immer knapper werden.

Dass Kläranlagen nicht nur Abwasser reinigen, sondern vielmehr zu einer klimaschonenden Kreislaufwirtschaft beitragen können, zeigt nach drei Jahren Forschung, Entwicklung und Betrieb das Projekt RoKka. Auf der Kläranlage Erbach (Donau) haben zehn Projektpartner zukunftsweisende Verfahren zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser

pilotiert und über mehrere Monate erprobt. Insgesamt wurden dazu sieben innovative Demonstrationsanlagen betrieben, die sich jeweils auch als eigenständige Module auf bestehenden Kläranlagen integrieren lassen.

Die Ergebnisse sind auch im Hinblick auf das Inkrafttreten der novellierten Kommunalwasserrichtlinie zum 1. Januar 2025 relevant. Demnach gelten in der EU zukünftig strengere Grenzwerte für die Phosphor- und Stickstoffelimination, um die Nährstoffeinträge in die Gewässer weiter zu reduzieren.

*In RoKka wurden auf der Kläranlage Erbach neue Verfahren zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser pilotiert und über mehrere Monate erprobt.*





*Oben:  
Großtechnische Messung von Lachgasemissionen in der biologischen Stickstoffelimination auf der Kläranlage Erbach*

*Unten:  
In der ePhos®-Pilotanlage werden Phosphor und Stickstoff aus dem Schlammwasser als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) zurückgewonnen.*

## Klärschlamm als Rohstoffquelle

RoKka macht sich das etablierte Verfahren der Klärschlammfäulung zunutze, bei dem organische Feststoffe im Abwasser vergärt werden, um Biogas als erneuerbaren Energieträger zu produzieren. Seit 2016 setzt auf der Kläranlage Erbach eine Hochlastfäulung den anfallenden Schlamm schneller und effizienter zu Biogas um als herkömmliche Faultürme. Nach der Fäulung wird der Schlamm mit einer Kammerfilterpresse entwässert, um sein Volumen zu verringern. Das Filtrat der Entwässerung weist hohe Konzentrationen der Pflanzennährstoffe Phosphor und Stickstoff auf.

## Erhöhter Energieverbrauch und Lachgasemissionen durch Stickstoff-Rückbelastung

Üblicherweise wird das nährstoffreiche Filtrat der Schlammentwässerung zurück in die Belebungsbecken der Kläranlage geleitet, diese Rückbelastung macht 20 bis 30 Prozent der Stickstoff-Zulaufmenge einer Kläranlage aus. Entsprechend steigert sie den Energieverbrauch für die Belüftung der biologischen Reinigungsstufen. Hier bauen Mikroorganismen in Belebungsbecken unter Verbrauch von Sauerstoff nicht nur die organischen Substanzen zu Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Biomasse um, sondern auch die Stickstoffverbindungen. Durch die Rückbelastung besteht außerdem das Risiko, dass die Konzentration von Ammonium oder Nitrat im Ablauf der Kläranlage steigt, was die Umweltbelastung erhöht.

Zudem führt der biologische Stickstoffabbau zu Emissionen von Lachgas (N<sub>2</sub>O), dessen klimaschädliche Wirkung rund 265-mal so stark ist wie die von CO<sub>2</sub>. Mittels großtechnischer Messungen konnte die Universität Kassel in RoKka nun aufzeigen, dass eine Rückgewinnung von Stickstoff aus dem Schlammwasser sowie die daraus resultierende Verringerung der Stickstoff-Rückbelastung in den Hauptstrom der Kläranlage eine Minderung der Lachgasemissionen bei der biologischen Stickstoffelimination bewirkt.

## Die Kläranlage als Bioraffinerie

Da sich Stoffe umso besser zurückgewinnen lassen, je höher sie konzentriert sind, setzt RoKka am nährstoffreichen Schlammwasser an. Anstatt zurück ins Belebungsbecken durchläuft das Filtrat verschiedene Module, mit denen Kläranlagen zu einer Bioraffinerie gemacht werden können.

### Elektrochemische Phosphorrückgewinnung mit ePhos®

Das erste Modul ist die ePhos®-Anlage, ein am Fraunhofer IGB entwickeltes Verfahrensmodule zur Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff. Mit ePhos® wird Phosphor elektrochemisch als Magnesium-Ammonium-Phosphat ausgefällt, auch Struvit genannt. Das hierfür benötigte Magnesium wird in einer Elektrolysezelle über eine Opferanode aus Magnesium zudosiert, welche sich im fortwährenden Prozess verbraucht. Das Produkt Struvit kann als regional erzeugter Phosphor-Langzeitdünger in der Landwirtschaft genutzt werden.

Die auf der Sammelkläranlage in Erbach installierte Pilotanlage wurde auf eine Behandlung von ca. 600 L/h ausgelegt. Dies entspricht in etwa der Hälfte des Vollstroms an Filtratwasser, welcher auf der Kläranlage anfällt. Für die Abscheidung des kristallisierten Struvits kam erstmals ein neues Verfahren zum Einsatz, bei dem die ausgefallenen Phosphatsalze an einem Bandfilter abgestreift wurden. Die Fällereffizienzen in RoKka waren allerdings, aufgrund geringer Phosphatkonzentrationen im Zulauf, mit 60 bis 70 Prozent niedriger als bei vorhergehenden Pilotierungen, bei denen 80 bis 90 Prozent Rückgewinnung erreicht wurde.

Die Erfahrung aus dem Projekt RoKka zeigt: Voraussetzung für den effizienten Einsatz des ePhos®-Verfahrens sind möglichst hohe Konzentrationen an gelöstem Phosphat im Schlammwasser. Dies ist durch den Betrieb einer biologischen Phosphorelimination (Bio-P) auf der Kläranlage gewährleistet.

### Stickstoffrückgewinnung zu Ammoniumsulfatdünger

Im Gegensatz zu Phosphor war Stickstoff in hoher Konzentration im Filtratwasser der Schlammwässerung in Erbach enthalten. Der in RoKka untersuchte Ansatz des Fraunhofer IGB besteht darin, Stickstoff durch einen Prozess der chemischen Transmembranabsorption (TransMembrane ChemiSorption, TMCS) als Düngemittel für den Einsatz in der Landwirtschaft zurückzugewinnen.

Das Rückgewinnungsverfahren funktioniert nach dem Prinzip einer Gasabsorption mit Membrankontaktoren und zeichnet sich durch eine hohe Selektivität gegenüber Stickstoff aus. Hierzu ist es erforderlich, dass Stickstoff im Wasser in gasförmiges Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) umgewandelt wird. Je höher der pH-Wert und die Temperatur des Abwassers, desto höher ist der Anteil an gasförmigem Ammoniak. Eine hydrophobe Membran im Membrankontaktor hält den Flüssigkeitsstrom zurück, lässt aber gasförmiges Ammoniak durch ihre Poren auf die andere Seite der Membran diffundieren. Hier wird Ammoniak von Schwefelsäure absorbiert und damit eine Ammoniumsulfatlösung erzeugt.

Ammoniumsulfat kann direkt als regionaler Dünger Verwendung finden. In der RoKka-Pilotanlage waren die in der Produktlösung erreichten Ammoniumkonzentrationen zunächst zwar noch relativ gering. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass sich die Ammoniumsulfatlösung weiter aufkonzentrieren lässt, um ein wirtschaftlich nutzbares Produkt zu erhalten.

### Elektrochemische Formiatsynthese aus $\text{CO}_2$

Im Faulturm einer Kläranlage fällt ein Gasgemisch an, das zu ca. 65 Prozent aus energiereichem Methan ( $\text{CH}_4$ ) und zu etwa 35 Prozent aus Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) besteht. Mit einem neuen Verfahren der Deukum GmbH wurde  $\text{CO}_2$  mithilfe einer Aminosäurelösung abgetrennt und über eine Elektrodialyse-Vorrichtung zurückgewonnen. Zurück bleibt hochreines Biomethan, das direkt ins Erdgasnetz eingespeist werden könnte.

Das aus dem Faulgas abgetrennte Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) ist eine potenzielle Ressource für kohlenstoffbasierte Plattformchemikalien. Eine



*Mikroalgen in einem neuartigen Photobioreaktorsystem binden  $\text{CO}_2$  und produzieren daraus eine pflanzenstärkende Biomasse.*

Möglichkeit,  $\text{CO}_2$  unter Nutzung regenerativ erzeugter elektrischer Energie in Wertstoffe umzuwandeln, ist die elektrokatalytische Umsetzung zu Formiat, dem Salz der Ameisensäure.

In RoKka wurde dieser Prozess, der bisher im Labor- und Technikumsmaßstab und mit technischem  $\text{CO}_2$  entwickelt wurde, erstmals mit direkt aus dem Faulgas gewonnenem  $\text{CO}_2$  betrieben und das Zielprodukt Formiat erfolgreich in wässriger Lösung erzeugt. Die Formiatkonzentration war mit circa 45 g/L vergleichbar zu vorangegangenen Technikumsversuchen mit  $\text{CO}_2$  aus der Gasversorgung des Fraunhofer IGB.

Bei der elektrokatalytischen  $\text{CO}_2$ -Umsetzung entsteht, ähnlich wie im Fall einer Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung, an der Anode Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ), welcher häufig ungenutzt bleibt, auf der Kläranlage aber zur Belüftung der Belebungsbecken eingesetzt werden kann.



**Oben:**  
Seit 2016 liefert die Hochlastfaulung auf der Kläranlage Erbach Biogas und nährstoffreiches Schlammwasser – hochkonzentrierte Stoffströme, aus denen Wertstoffe zurückgewonnen werden können.

**Unten:**  
Stickstoff wird in Form einer Ammoniumsulfatlösung zurückgewonnen.

### Mikroalgenkultivierung: Beta-Glucan zur Pflanzenstärkung

Mikroalgen sind Multitalente: Durch Photosynthese wandeln sie nährstoffreiche Prozessströme der Kläranlage sowie CO<sub>2</sub> aus dem Faulgas in Biomasse und wertvolle Speicherstoffe um. So wurde in RoKka neben dem Nährstoff- auch der CO<sub>2</sub>-Kreislauf geschlossen.

Im Projekt wurde die Mikroalgenkultivierung in einem neuartigen Flachplatten-Airlift-Photobioreaktorsystem des Fraunhofer IGB mit einem Volumen von 125 Litern demonstriert. Dazu wurde ein im 6-Liter-Labormaßstab entwickelter Prozess in das neue Photobioreaktorsystem mit LED-Beleuchtung übertragen. Das Photobioreaktorsystem ist mit umfassender Sensorik für die Prozesssteuerung ausgestattet, die eine teilweise Automatisierung ermöglicht. Für die Nährstoffversorgung der Mikroalgen wurde neben dem Filtratwasser, das reich an Ammonium-Stickstoff ist, das im ePhos®-Modul produzierte Magnesium-Ammonium-Phosphat zudosiert, um die geringe Konzentration von Phosphat im Filtratwasser auszugleichen und ein optimales Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor zu erreichen.

Der eingesetzte Mikroalgenstamm *Phaeodactylum tricornutum* produziert unter definierten Prozessbedingungen pflanzenstimulierende Polysaccharide, sogenannte Beta-Glucane. Diese können Pflanzen bei der Abwehr von Pilzinfektionen wie Mehltau unterstützen und in Zukunft chemische Pflanzenschutzmittel teilweise ersetzen, beispielsweise im Weinbau. Alternativ kann die geerntete Algenbiomasse zur Bodenverbesserung verwendet werden.

Pro Kilogramm erzeugter Mikroalgenbiomasse wird die Kohlenstoffmenge aus circa zwei Kilogramm CO<sub>2</sub> gebunden. Der Strombedarf für die Mikroalgenproduktion ist der größte Kostentreiber des Verfahrens. In RoKka konnte für den untersuchten zweistufigen Prozess ein Energiebedarf von weniger als 150 kWh/kg produzierter Biomasse erreicht werden. Um die Wirtschaftlichkeit des Prozesses weiter zu erhöhen, soll durch Weiterentwicklung des Reaktor- und Beleuchtungskonzepts sowie Anpassung der Prozessführung ein Energiebedarf von weniger als 100 kWh/kg für den eingesetzten zweistufigen Prozess erzielt werden.

### RoKka: erfolgreiches Update für die Kläranlage

RoKka zeigt eindrucksvoll, wie bestehende Kläranlagen modernisiert und nachhaltiger gestaltet werden können, um ihre Klimabilanz zu verbessern und wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen. Neue Ansätze wie das Nährstoffrecycling mindern nicht nur den Einsatz fossiler Rohstoffe, sondern auch den Energieverbrauch. Gleichzeitig vermeidet die Implementierung von Verfahren zur Stickstoffrückgewinnung die durch die Ammonium-Rückbelastung im Belebungsbecken entstehenden klimaschädlichen Lachgasemissionen. Ausgebaut zu Bioraffinerien leisten Kläranlagen wertvolle Beiträge zur Rohstoffsicherheit und zum Klimaschutz und tragen damit zur Resilienz und zum Erreichen nationaler Klima- und Nachhaltigkeitsziele bei.

Ziel ist es nun, die Projektergebnisse auch großtechnisch umzusetzen. Aus diesem Grund war von Beginn an die Kläranlage Ulm-Steinhöhle im Projekt involviert. Mit einer Ausbaugröße von 440.000 Einwohnerwerten ist sie prädestiniert für die Übertragung auf einen größeren Maßstab. Derzeit wird der Bau einer Hochlastfaulung geplant. Als direktes Resultat des RoKka-Projekts wird auch gleich eine Stickstoffrückgewinnung mitgedacht, um die Rückbelastung der Kläranlage zu minimieren. Derweil stehen die einzelnen Verfahrensmodule wie Ultrafiltration, ePhos® und Stickstoffrückgewinnung interessierten Kläranlagen für Tests mit realem Abwasser am Fraunhofer IGB oder vor Ort zur Verfügung.

### Referenzen

Reyes Alva, R.; Mohr, M.; Zibek, S. Transmembrane Chemical Absorption Process for Recovering Ammonia as an Organic Fertilizer Using Citric Acid as the Trapping Solution. *Membranes* 2024, 14, 102. <https://doi.org/10.3390/membranes14050102>

### Weitere Informationen



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

### Kontakt

Dr.-Ing. Marius Mohr  
Tel. +49 711 970-4216  
marius.mohr@  
igb.fraunhofer.de

# InBiRa – die Insektenbioraffinerie

## Von der Verwertung von Rest- und Abfallstoffen bis zur Herstellung chemischer Produkte

Im Projekt InBiRa wurde erstmals eine Insektenbioraffinerie als Pilotanlage aufgebaut, in welcher organische Reststoffe und Abfälle in neue, technisch nutzbare Produkte umgewandelt werden können. Ermöglicht wird der Ansatz der Insektenbioraffinerie durch die Larven der Schwarzen Soldatenfliege. Diese ernähren sich von überlagerten Lebensmitteln, Bioabfällen aus Gastronomie und Biotonne und bauen diese während ihrer Entwicklung in Biomasse um. Die Insektenbiomasse ist reich an Fetten, Proteinen und Chitin, woraus neue Folgeprodukte hergestellt werden können.

### Insektenbioraffinerie-Pilotanlage zur Nutzung aller Fraktionen

Im Projekt wurde dazu in den Räumlichkeiten des Fraunhofer IGB ein Insektenbioraffinerie-Anlagenkomplex geplant, gebaut und in Betrieb genommen, der alle benötigten Prozessschritte umfasst. In der Anlage wurden die jeweiligen Prozessschritte, angefangen bei der Futtermittelherstellung für die Mast der Larven (Farming), über die Trennung der Fett- und Proteinfraction (Primärraffination) und deren Konversion bis zum jeweiligen chemischen Zwischenprodukt (Sekundärraffination) im Pilotmaßstab durchgeführt und evaluiert.

Hierzu hat das Projektteam ca. 20 Prozesseinheiten definiert und verfahrenstechnisch für die vorhandenen Stoffströme ausgelegt. Die Prozesseinheiten umfassen dabei technische Prozesse wie z. B. Zerkleinerung, Siebung, Pressung, Trocknung, Mikrofiltration, Extraktion, Zentrifugation und Evaporation sowie mehrere Chemiereaktoren und einen Bioreaktor für die Konversion der erhaltenen Fette, Proteine und des Chitins.



*Larven der Schwarzen Soldatenfliege*

### Abfallaufbereitung, Mast und Primärraffination

Zunächst wurden die Abfall- und Restströme so aufbereitet, dass diese von den Insektenlarven effizient verwertet werden konnten. Herausforderungen waren und sind hierbei unter anderem die saisonale Variabilität der Biotonne, das Entpacken ggf. verpackter Lebensmittelrückläufer, Rückstände von Pestiziden bei Obst und Gemüse aus nicht biologischer Landwirtschaft sowie Fehlwürfe (z. B. Besteck) bei Kantinenabfällen. Bei der Zusammenstellung der Futtermittel muss außerdem auf ein ausgewogenes Verhältnis der Nährstoffe und des Wassergehalts geachtet werden. Ist zu viel Wasser vorhanden, können die Larven ertrinken. Zu viel Fett im Futtermittel führt zu einer Phasenbildung und damit zu schlechtem und nicht reproduzierbarem Larvenwachstum, außerdem wird später die Separation der Larven vom Restsubstrat beeinträchtigt.



*Oben:  
Reststoffströme können in  
der Insektenbioraffinerie ver-  
wertet werden.*

*Unten:  
Insektenlarven auf Substrat*

In einem speziellen Mastcontainer, welcher für die Insektenbioraffinerie ausgelegt wurde, wachsen anschließend junge Insektenlarven mit den aufbereiteten Abfall- und Reststoffen und setzen diese dabei in Biomasse um. Hierbei ist es entscheidend, auf eine gute Durchlüftung und Klimatisierung zu achten, sodass an jeder Stelle des Mastcontainers gleiche Bedingungen für das Larvenwachstum herrschen und das Substrat zum Ende der Mast eine passende Restfeuchtigkeit für die weitere Prozessierung besitzt.

Die auf den Abfall- und Reststoffen gewachsenen Insektenlarven werden im Zuge der Primärraffination zunächst durch Sieben vom Restsubstrat getrennt. Anschließend werden die Larven inaktiviert und getrocknet. Durch das nachfolgende Pressen der Larven wird zunächst eine grobe Fraktionierung in eine Fett- und eine Proteinfraction ermöglicht. Das Rohfett kann anschließend durch weitere Prozessschritte gereinigt und für die jeweilige Weiterverwendung raffiniert werden. Die Proteinfraction, der sogenannte Presskuchen, wird chemisch weiter entfettet, um möglichst reines Protein zu enthalten.

Neben den raffinierten Fett- und Proteinfractionen verbleiben zudem mehrere Restfractionen aus der Insektenbioraffinerie: nicht verwertetes Substrat und Exkremate der Larven (Frass), chitinhaltige Larvenhäute sowie adulte Fliegen. Diese Restfractionen können im Zuge der Sekundärraffination ebenfalls zu wertvollen Rohstoffen umgesetzt werden.

### **Sekundärraffination zu Zwischenprodukten für Kraftstoffe, Kosmetika, Reinigungsmittel, Kunststoffe und Pflanzendünger**

Für die Umwandlung der drei Fraktionen aus der Primärraffination (Fett, Protein, Restfraction) in höherwertige Produkte, die Sekundärraffination, haben die Projektpartner jeweils spezifische Verfahrensschritte erarbeitet.

Die Fettfraction kann durch chemische oder mikrobielle Konversion zu Vorläufermolekülen für Schmierstoffe oder Kraftstoffe sowie zu Biotensiden oder Seifen für Reinigungs- und Pflegeprodukte umgesetzt werden. Der besondere Vorteil dabei ist, dass das Fett der Schwarzen Soldatenfliege durch seinen hohen Anteil an Laurinsäure eine ähnliche Fettsäurezusammensetzung wie Kokos- oder Palmkernöl besitzt und somit eine lokale Alternative zu tropischen Ölen bietet.

Die Proteinfraction kann zukünftig über Quervernetzung zur Herstellung von Verbundmaterialien für die Agronomie (z. B. abbaubare Pflanzgefäße) oder auch als Holzklebstoffe oder Beschichtungen verwendet werden. Hydrolysiertes Protein findet zudem in Kosmetik- oder Pflegeprodukten Anwendung.

Auch die Reststoffe, welche bei der Mast und Aufbereitung der Insektenlarven entstehen, werden verwertet. Das Restsubstrat enthält vor allem Cellulose, Insektenexkremate oder Larvenhäutungsprodukte. Während die Larvenhäutungsprodukte zur Isolierung von Chitin bzw. Chitosan bilanziert und genutzt wurden, konnte das Restsubstrat, der sog. Frass, hinsichtlich der Vergärung zu Biogas und der Rückgewinnung von Nährstoffen zur Düngemittelherstellung untersucht werden.



*Besuch der Insektenmast auf dem Dach des Fraunhofer IGB in Stuttgart im Rahmen der Abschlusskonferenz*



**Mit unserer Insektenbioraffinerie können wir Bioabfälle aus Kantinen und Handel als Rohstoffe für hochwertige technische Produkte nutzen. Damit erschließen wir erstmals eine heimische Quelle für mittelkettige Fettsäuren, ersetzen fossile Rohstoffe und tragen zum Klimaschutz bei.«**

**Dr.-Ing. Susanne Zibek,**  
Gruppenleiterin Bioprocessentwicklung

*Insektenfett und zerkleinerte  
getrocknete Insektenlarven*

### Marktfähigkeit und ganzheitliche Bewertung

Übergreifend wurde im Projekt InBiRa die Machbarkeit der Herstellung verschiedener Produkte aus den raffinierten Insektenlarven der Schwarzen Soldatenfliege untersucht. Gespräche zur Marktfähigkeit der neuen Technologien mit verschiedenen Nutzergruppen offenbarten ein großes Interesse an einer großtechnischen Insektenbioraffinerie für die Verwertung biogener Abfallströme. Zudem wurde der gesamte Herstellungsprozess einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung und Ökobilanzierung unterzogen.

### Abschlusskonferenz und Ausblick

Zum Abschluss des dreijährigen Projekts stellte das Projekt-Konsortium unter Federführung des Fraunhofer IGB am 21. Oktober 2024 die Projektergebnisse und die technischen Module der entwickelten Bioraffinerie bei einer Abschlusskonferenz vor. Abschließend erörterten die Beteiligten aus Forschung und Politik mit potenziellen Anwendern aus der Abfallwirtschaft in einer Podiumsdiskussion die Potenziale der neuen Technologie sowie die Herausforderungen hinsichtlich regulatorischer Rahmenbedingungen und mögliche Lösungsansätze.

Auch nach dem offiziellen Abschluss des durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit Landes- und EU-Mitteln geförderten Projekts geht die Forschung an der Insektenbioraffinerie weiter, um die entwickelten Prozessschritte im großen Maßstab in der Abfallwirtschaft umsetzen zu können.

### Weitere Informationen



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

### Kontakt

Dr.-Ing. Susanne Zibek  
Tel. +49 711 970-4167  
susanne.zibek@  
igb.fraunhofer.de

## BW2Pro – Biowaste to Products



*In der geplanten Bioraffinerie des Projekts BW2Pro wird täglich eine Tonne Bioabfall in hochwertige Produkte und Rohstoffe verarbeitet.*

Im Projekt BW2Pro wurde der Bau einer Bioabfallraffinerie auf dem Gelände der kommunalen Biogasvergärungsanlage der Abfallwirtschaft Rems-Murr AöR (AWRM) in Backnang gefördert. Ziel war die optimierte Verwertung von Bioabfällen. Hierzu wurden Prozesse optimiert und in unterschiedlichen Maßstäben demonstriert, um aus Bioabfällen kreislauffähige Produkte und Sekundärrohstoffe herzustellen, beispielsweise Fasern, Blumentöpfe, Dünger und Biogas.

Fokus der Arbeitsgruppe um Christiane Chaumette in der Abteilung »Wassertechnologien, Wertstoffgewinnung und Scale-up« des Fraunhofer IGB war die Rückgewinnung von Nährstoffen aus den flüssigen Gärresten des Biogasreaktors. Mithilfe verschiedener Aufarbeitungsschritte wurden aus dem Gärrest Phosphorsalze und Ammoniumsulfat

zurückgewonnen, um hieraus einen transportfähigen Mehrnährstoffdünger herzustellen. Das zurückbleibende nährstoffarme Prozesswasser kann wiederverwendet oder zur Bewässerung genutzt werden.

Der Arbeitsgruppe um Dr.-Ing. Susanne Zibek gelang es, einen Prozess zu etablieren, mit dem man aus dem Prozesswasser der Thermohydrolyse, das gelöste organische Verbindungen wie Carbonsäuren enthält, mikrobiell synthetisierte Biopolymere herstellen kann. Hierzu wurden die Fermentationen optimiert, sodass die Mikroorganismen die gewünschten Poly-(3-Hydroxybuttersäure-co-3-Hydroxyvaleriansäure-co-4-Hydroxyvaleriansäure) (PHBV) mit einem hohen Valeratanteil in Reaktormaßstäben bis zu 1 m<sup>3</sup> produzierten.

### Weitere Informationen



[www.igb.fraunhofer.de/bw2pro](http://www.igb.fraunhofer.de/bw2pro)

### Kontakt

Christiane Chaumette  
Tel. +49 711 970-4131  
christiane.chaumette@igb.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Susanne Zibek  
Tel. +49 711 970-4167  
susanne.zibek@igb.fraunhofer.de



*Der Biokunststoff PHBV*



*Folie aus PHBV*

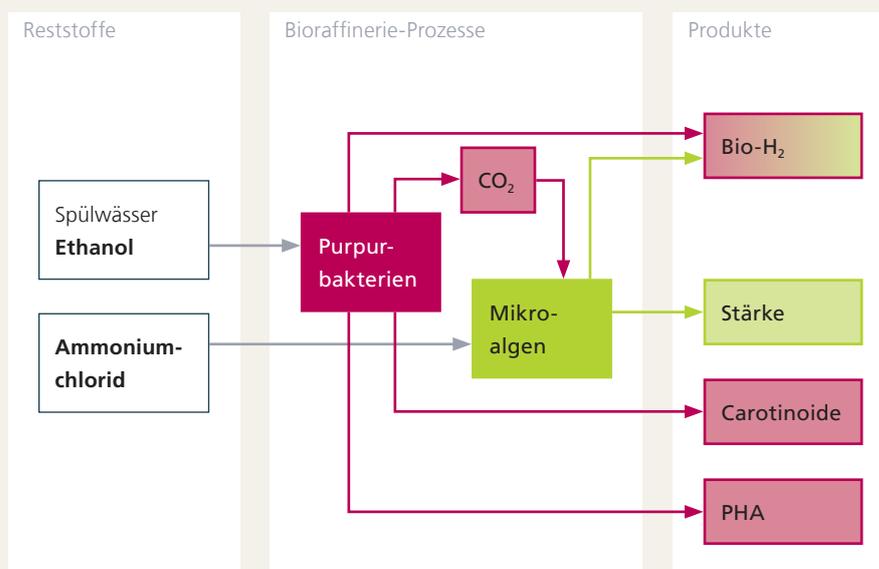
# SmartBioH<sub>2</sub>-BW

## Integrierte Bioraffinerie und Biowasserstoff aus industriellen Abwasser- und Reststoffströmen

Das Ziel des Bioraffinerieprojekts SmartBioH<sub>2</sub>-BW war, eine Bioraffinerie in eine bestehende Industrieumgebung zu integrieren. Mittels zweier miteinander verknüpfter biotechnologischer Verfahren (Purpurbakterien und Mikroalgen) sollten aus anfallenden industriellen Spülwasser- und Reststoffströmen Biowasserstoff und weitere biobasierte Produkte erzeugt werden. Insbesondere in der Chemieindustrie fallen bei vielen Herstellungsprozessen Nebenstoffströme an, welche meist verbrannt oder in Kläranlagen entsorgt werden. Deswegen war die Evonik Operations GmbH in Rheinfelden assoziierter Partner im Projekt.

### Grüner Wasserstoff und Koppelprodukte aus Reststoffströmen

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) gilt als Schlüsselement der Energiewende. Verfahren mit Purpurbakterien oder Mikroalgen, die Wasserstoff produzieren, werden seit langer Zeit untersucht. Bislang konnten diese aber nicht im größeren Maßstab umgesetzt werden. Hier setzt das Projekt SmartBioH<sub>2</sub>-BW an. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Bioraffinerie entwickelt, die auf zwei Verfahren der biotechnologischen Wasserstofferzeugung basiert, die in einer Demonstrationsanlage am Standort der Evonik Operations GmbH in Rheinfelden miteinander verknüpft wurden.



*Im Projekt SmartBioH<sub>2</sub>-BW werden mittels zweier miteinander verknüpfter biotechnologischer Verfahren (Purpurbakterien und Algen) aus anfallenden industriellen Abwasser- und Reststoffströmen Biowasserstoff und weitere Produkte wie beispielsweise Carotinoide, PHA (Polyhydroxyalkanoate) und Stärke erzeugt.*

Dazu werden zunächst Purpurbakterien in einem geschlossenen Bioreaktor unter kontrolliert mikroaeroben Bedingungen kultiviert. Hierbei entstehen aus ethanolhaltigen Spülwässern neben Wasserstoff auch nutzbare Carotinoide, Polyhydroxyalkanoate (PHA) sowie CO<sub>2</sub> als Nebenprodukt. Der zweite Schritt ist dann die sogenannte »Direkte Photolyse«: Dabei erzeugen Mikroalgen mithilfe von Lichtenergie aus Wasser sowohl Wasserstoff als auch Sauerstoff. Um diese Reaktion aufrecht zu erhalten, nutzt das IGB einen neuen Photobioreaktortyp, der den bei der Wasserstoffproduktion entstehenden Sauerstoff entfernen kann. Um die Emission von CO<sub>2</sub> aus der Wasserstoffproduktion mit Purpurbakterien zu minimieren, wird das CO<sub>2</sub> einer angekoppelten Mikroalgenanlage zugeführt. In dieser wird aus CO<sub>2</sub>, Licht und dem anfallenden Reststoffstrom Ammoniumchlorid u. a. Stärke als nutzbares Produkt hergestellt. Die Mikroalgenanlage ist ein mittels LED beleuchteter kompakter Photobioreaktor. Das Besondere an diesem: Er ist modular aufgebaut und zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad und viel Volumen auf wenig Fläche aus.

### **Bakterielle Wasserstoffherstellung: vom Labor- in den Demonstratormaßstab**

Mithilfe des ersten Prozessschritts, der Wasserstoffherstellung durch Bakterien, konnte ein bisher nicht genutzter ethanolhaltiger Stoffstrom erschlossen werden. Gleichzeitig lässt sich dabei auch Energie in Form von Wasserstoff zurückzugewinnen. Zu diesem Zweck wurde in einem 75-Liter-Bioreaktor eine Fermentation durchgeführt, bei der das Purpurbakterium *Rhodospirillum rubrum* Ethanol – unter Zuhilfenahme von Zuckern wie Fructose – verstoffwechseln und dabei unter sogenannten mikroaeroben Bedingungen Wasserstoff gebildet hat. Mikroaerobe Bedingungen bedeuten, dass durch eine Steuerung der Belüftung und Rührung innerhalb eines Bioreaktors die Produktion von Sauerstoff so limitiert wird, dass die Bakterien genau an der Schwelle zwischen Atmung und sauerstofffreier Gärung »arbeiten«.

Um die Projektziele zu erreichen, galt es in der konkreten Umsetzung zunächst, den bei

Evonik anfallenden Stoffstrom zu analysieren und mithilfe von Wachstumsversuchen und Toxizitätstests zu bewerten. So sollte geklärt werden, in welchen Konzentrationen das Substrat eingesetzt werden kann, da Ethanol in hohen Konzentrationen auch bei diesen Bakterien desinfizierend wirkt. Als optimaler Kompromiss zwischen größtmöglichem Verbrauch an Ethanol und trotzdem hohen Wachstumsraten stellte sich eine Substratkombination von Ethanol und Fructose mit jeweils 15 g/L heraus. Im Anschluss wurde die Zusammensetzung der Nährstofflösung optimiert, um das Wachstum weiter zu steigern.

Auf diesen Grundlagen aufbauend, konnte die Bakterienkultivierung dann vom Glaskolben in einen Bioreaktor im kleinen Labormaßstab übertragen werden. Der Laborreaktor bot den Vorteil, dass das Wachstum und die Bildung von Wasserstoff durch Regelungen verschiedener Kultivierungsparameter kontrolliert werden konnte und dadurch bereits Parallelen zu einer Skalierung in den Demonstratormaßstab bestanden.

Im Bioreaktor unterteilte das Projektteam das Verfahren dann in zwei Phasen. Zunächst wurde der Bioreaktor mit Luft begast, also aerob betrieben, da die Atmung bei Bakterien dabei effizienter abläuft und so höhere Wachstumsraten und Zelldichten erreicht werden. Das wiederum resultierte in einem effizienteren Prozess mit höheren Wasserstoffbildungsraten. Im Anschluss wurden die Luftzufuhr limitiert und damit Bedingungen geschaffen, unter denen das Bakterium durch die mikroaerobe Dunkelfermentation Wasserstoff produziert.

Da mehr Bakterien auch eine größere Menge Wasserstoff erzeugen, wurde ein Zufütterungsverfahren entwickelt. Dabei werden während der Fermentation schrittweise neue Nährstoffe zugeführt, um ein beständiges Wachstum der Bakterien aufrecht zu erhalten. Für die verwendete Fütterungslösung ist es wichtig, dass Kohlenstoffquellen wie Ethanol und Fructose, Stickstoffquellen, Spurenelemente und Vitamine im richtigen Verhältnis zueinander stehen, damit keine Nährstoffmängel auftreten. Die könnten nämlich ein weiteres Wachstum hemmen. Nach einem Vergleich verschiedener Konzepte



haben sich die IGB-Forschenden auf ein pO<sub>2</sub>-abhängiges Fütterungsprofil festgelegt. Dabei wird der Sauerstoffpartialdruck (pO<sub>2</sub>) im Fermentationsmedium gemessen. Atmen die Zellen, wird Sauerstoff verbraucht und der Partialdruck sinkt. Sind Ethanol und Fructose dann vollständig aufgebraucht, verlangsamt sich der Stoffwechsel und weniger Sauerstoff wird von den Bakterien verbraucht – erkennbar an einem Anstieg des Partialdrucks, dem sogenannten »hunger peak«. Anhand dieses Hungersignals können die Forschenden dann erkennen, dass Substrat fehlt und eine frische Nährlösung zufüttern, sodass die Bakterien weiterwachsen. Im Labormaßstab konnte so eine Zelldichte von bis zu 34 g/L Bakterien-trockenmasse erreicht werden.

In der mikroaeroben Phase findet dann die sogenannte mikroaerobe Dunkelfermentation statt und es wird somit Wasserstoff produziert. Bei der Atmung wird Sauerstoff als sogenannter terminaler Elektronenakzeptor übertragen. Dadurch kann das Bakterium zentrale Moleküle für die Atmungskette regenerieren und die Atmung aufrechterhalten. Wird dieser Sauerstoff zu diesem Zeitpunkt aber limitiert, droht die Atmung zu erliegen. Als einen Überlebensmechanismus verwenden die Purpurbakterien daraufhin Wasserstoff. Dabei können Elektronen an Protonen übertragen und in Form des Gases aus den Bakterien ausgeschieden werden. Um dieses



Funktionsprinzip im Bioreaktor umsetzen zu können, galt es im Projekt erst einmal eine zuverlässige Wasserstoffanalytik zu etablieren. Im Anschluss wurde dann bewertet, wie sich unterschiedliche Sauerstoffkonzentrationen im Fermentationsmedium auf die Wasserstoffausbeute auswirken. Dabei konnte durch die Zugabe von zusätzlichem Stickstoff zur Begasungsluft die Wasserstoffausbeute maximiert werden.

Nach der Etablierung und Optimierung beider Phasen der Fermentation im Labormaßstab war der nächste Schritt die Umsetzung des Verfahrens in ein Bioraffineriekonzept. Bei der Übertragung in den Demonstratormaßstab bei Evonik in Rheinfelden konnte durch die erfolgreiche Kopplung an den Algenreaktor und die Wasserstoffherstellung aus den ethanolhaltigen Stoffströmen gezeigt werden, dass der Aufbau einer Bioraffinerie zur klimaneutralen Herstellung von Wasserstoff technisch machbar ist.

Durch die Etablierung des Zufütterungsverfahrens und der Maßstabsvergrößerung konnte die Wasserstoffbildung im Vergleich zum Labormaßstab um das ca. 5-fache gesteigert werden. Das Ergebnis: Auf einen Monat hochgerechnet, könnten mit einer Fermentation in diesem Maßstab bereits bis zu 3400 L Wasserstoffgas produziert werden. Besonders spannend war dabei die Erkenntnis,



*Oben:  
Das Purpurbakterium *Rhodospirillum rubrum* ist fakultativ phototroph und kann mit Licht wie auch mit einfachen organischen Substraten als Energiequelle wachsen.*

*Mitte:  
*Rhodospirillum rubrum* im 1-Liter-Bioreaktor*

*Unten:  
Erste Versuche mit *Rhodospirillum rubrum* unter Laborbedingungen in 1-Liter-Bioreaktoren*



Geschlossener 75-Liter-Edelstahl-Bioreaktor zur Kultivierung der Purpurbakterien in einem größeren Maßstab

dass während der Bildung von Wasserstoff auch Polyhydroxyalkanoate (PHA) gebildet wurden, die bis zu 54 Prozent der Bakterienmasse ausmachten. PHA sind Biopolymere und können aufgereinigt und als abbaubare Biokunststoffe für Verpackungen und Folien eingesetzt werden. Dadurch ergibt sich eine spannende Perspektive, noch weitere höherwertigere Produkte innerhalb dieser Bio Raffinerie zu gewinnen und das Verfahren in Zukunft rentabler zu machen.

## Mikroalgen binden Nebenprodukt CO<sub>2</sub>

Ziel war der Aufbau einer Bio Raffinerie, die Reststoffströme und CO<sub>2</sub> aus der chemischen Industrie verwertet und damit Kreislaufwirtschaft und Wasserstoffproduktion miteinander verbindet.

Dafür hat das Projektteam folgende Mikroalgenstämme ausgewählt: *Chlorella sorokiniana* und *Chlamydomonas reinhardtii*. Beide können unter geeigneten Bedingungen Wasserstoff produzieren und Stärke als Speicherstoff akkumulieren – und damit als mögliches Fermentationssubstrat dienen. *Chlorella sorokiniana* zeichnet sich darüber hinaus durch einen hohen Luteingehalt aus. Aufgrund der gültigen Gesetzeslage darf aus Reststoffströmen der chemischen Produktion gewonnenes Lutein aber nicht in Lebensmitteln oder Futtermitteln eingesetzt werden.

Im Projekt wurden auch die Nebenströme ethanolhaltige Waschwässer und Ammoniumchlorid hinsichtlich der Toxizität von Kontaminationen aus der chemischen Produktion untersucht, die sich auf das Wachstum der Mikroalgenstämme auswirken können. Es hat sich dabei gezeigt, dass beide Algenstämme die Reststoffströme verwerten können. Ethanol erbringt allerdings nur einen geringen zusätzlichen Biomassezuwachs. Ammoniumchlorid kann bisherige N-Quellen ersetzen, es ist aber eine zusätzliche pH-Kontrolle erforderlich.

Ein weiterer Reststoffstrom – CO<sub>2</sub>, das bei der fermentativen Wasserstoffproduktion mit *Rhodospirillum rubrum* entsteht – kann sehr effizient durch *Chlorella sorokiniana* in stärke-reiche Algenbiomasse umgesetzt werden. Gleichzeitig lässt sich Ammoniumchlorid für das Wachstum einsetzen. Die Verwertung von CO<sub>2</sub> und Ammoniumchlorid wurde zunächst auf 6-L-Labor-Photobioreaktoren übertragen. In diesem Maßstab untersuchten die Forschenden die wichtigsten Parameter der Algenproduktion: den Lichteintrag und die Biomassekonzentration. In Abhängigkeit dieser zwei Faktoren steigt im Reaktor die Biomasseproduktivität an. Die Lichtausbeute, also die Effizienz der Konversion von Licht in

Biomasse, bleibt nur bis zu einer spezifischen stammabhängigen Biomassekonzentration und Lichteintrag hoch und nimmt dann ab.

Nach der Etablierung und Optimierung dieser Reststoffstrom-Nutzung im Labormaßstab war der nächste Schritt die Übertragung des Verfahrens in den Demonstratormaßstab. Die dafür aufgebaute SmartBioH<sub>2</sub>-Demonstrationsanlage ist eine kompakte und modulare Photobioreaktoranlage, die mit LED beleuchtet wird und durch einen hohen Automatisierungsgrad überzeugt.

Das Fazit: Für die Etablierung des Bioraffineriekonzepts im Demonstratormaßstab bei Evonik Industries in Rheinfelden konnte durch die erfolgreiche Kopplung des Algenreaktors an die *R.-rubrum*-Fermentation gezeigt werden, dass Reststoffströme und Fermentations-Abgasströme genutzt werden können und dass sich der Aufbau einer Bioraffinerie zur klimaneutralen Herstellung von Wasserstoff technisch bewerkstelligen lässt.

### Wasserstoffproduktion über Direkte Photolyse mit Mikroalgen

Für die Wasserstoffherstellung mithilfe der Mikroalgen im zweiten Verfahren wurde ein neuartiges Konzept gewählt, das auf der Direkten Photolyse basiert. Durch eine Immobilisierung der Algen und ein spezielles Reaktorsetup soll der Sauerstoff, der von den Algen als Nebenprodukt zum Wasserstoff produziert wird, effizient auf einen Partialdruck von unter 100 ppm im Reaktorgasvolumen abgeschieden werden können. Die kontinuierliche Entfernung des Sauerstoffs resp. der tiefe Sauerstoffpartialdruck im Reaktor ist für das Funktionieren des Prozesses entscheidend. Ist der Gehalt an Sauerstoff im System zu hoch, oxidieren die extrem empfindlichen Enzyme, welche für die Wasserstoffproduktion benötigt werden.

Nach dem Aufbau der Versuchsanlage im Labor konnten in Kurzzeitversuchen erste erfolgreiche Messungen von Wasserstoff gemacht werden. Das System ist jedoch noch nicht optimiert. Insbesondere das Verfahren zur Immobilisierung der Mikroalgen muss



*Eröffnung am 3. August 2024 den Demonstrationsbetrieb der SmartBioH<sub>2</sub>-Bioraffinerie bei Evonik in Rheinfelden (v.l.): Marion Dammann (Landrätin Landkreis Lörrach), Staatssekretär Dr. Andre Baumann, Hermann Becker (Standortleiter Evonik), Dr.-Ing. Ursula Schließmann (Fraunhofer IGB, stv. Institutsleiterin und Projektkoordinatorin)*

noch weiterentwickelt und optimiert werden. Das gewählte Konzept zur Wasserstoffherstellung mit Mikroalgen lässt sich gut hochskalieren und soll in einer geplanten Anlage im Technikumsmaßstab zur Anwendung kommen.

In einem zweiten Laboraufbau konnte auch die Abscheidung von Sauerstoff erfolgreich getestet werden, wobei eine bereits bekannte Methode zur Sauerstoffabscheidung zur Anwendung kam. Mit dem Aufbau war es schließlich möglich, den Sauerstoffpartialdruck innerhalb kurzer Zeit unter die für die Wasserstoffproduktion kritische Grenze zu bringen.

#### Weitere Informationen



[www.igb.fraunhofer.de/smartbioh2](http://www.igb.fraunhofer.de/smartbioh2)

#### Kontakt

Dr.-Ing. Ursula Schließmann  
Tel. +49 711 970-4222  
ursula.schliessmann@igb.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Susanne Zibek  
Tel. +49 711 970-4167  
susanne.zibek@igb.fraunhofer.de

Dr. Ulrike Schmid-Staiger  
Tel. +49 711 970-4111  
ulrike.schmid-staiger@igb.fraunhofer.de

# KoalAplan

## Kommunales Abwasser als Quelle für Bioplastik



Der Kunststoff Polyhydroxyalkanoat (PHA), produziert aus organischen Säuren

Abwasser als Ressource für neue wert- und nachhaltige Produkte zu erschließen, war auch Ziel des Projekts KoalAplan. Auf dem Lehr- und Forschungsklärwerk der Universität Stuttgart in Stuttgart-Büsnau sollte hierzu der partikuläre organische Kohlenstoff des kommunalen Abwassers, der mittels Sedimentation in der Vorklärung anfällt, abgetrennt und in ein hochwertiges Produkt umgewandelt werden. Parallel dazu sollte aus dem partikel-freien Abwasser Ammonium zurückgewonnen werden, das als Stickstoffdünger für den Landbau verwendet werden kann.

Aus dem partikulären organischen Kohlenstoff, dem Primärschlamm, wurde durch die Projektpartner über eine biochemische Aufspaltung mit Wasser ein Hydrolysat gewonnen, das reich an organischen Säuren ist.

Das Hauptziel des Fraunhofer IGB war die fermentative Umwandlung dieses sauren Hydrolyсата zu Polyhydroxyalkanoat (PHA), einem bioabbaubaren bakteriellen Polymer.

### Neue Prozessführungsstrategie: Perfusion mit Zellrückhaltung

Das Hydrolysat, das viele organische Säuren enthielt, konnte von unseren Mikroorganismen als Kohlenstoff- und Energiequelle genutzt werden, wirkte jedoch in höheren Dosen toxisch. Daher konnte keine einfache satzweise Prozessführung durchgeführt werden. Stattdessen sollten die organischen Säuren kontinuierlich zugeführt und parallel das Volumen im Reaktor wieder abgeführt werden. Durch unsere etablierte Perfusionsmethode mit Querstromfiltration war es dabei möglich, die Zellen im Reaktor zurückzuhalten.

### Mikrobielle Herstellung von PHA aus saurem Hydrolysat

PHA sind thermoplastische Biopolymere, die von verschiedenen Mikroorganismen aus einem vielfältigen Substratspektrum hergestellt werden können. Viele Mikroorganismen weisen eine erhöhte Toxizität gegenüber organischen Säuren auf. Ziel unserer Arbeiten in KoalAplan war es, zunächst geeignete PHA-Produzentenstämme zu identifizieren, welche die organischen Säuren des Hydrolyсата für ihr Wachstum und die Produktion von PHA nutzen können, und die PHA-Herstellung im Pilotmaßstab zu etablieren.

*Cupriavidus necator* erwies sich im Vergleich zu den anderen getesteten Bakterien als das tolerantere Bakterium für organische Säuren und ist ein geeignetes Bakterium zur Herstellung von PHA aus organischen Säuren der sauren Hydrolyse. Um die Wachstumshemmung der organischen Säuren auf die Mikroorganismen zu verhindern, wurde eine neue Prozessführungsstrategie entwickelt: ein Perfusionsverfahren mit Zellrückhaltung. Mit dem von uns entwickelten Verfahren konnten 97 Prozent des Kohlenstoffs umgewandelt werden. Dabei wurden ca. 20 Prozent des Kohlenstoffs in PHA fixiert. Dieses neue Verfahren dient als Basis, um verschiedene Substrate mit niedrigen Konzentrationen zur Produktion von PHA nutzbar zu machen.

### Weitere Informationen



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

### Kontakt

Dr.-Ing. Susanne Zibek  
Tel. +49 711 970-4167  
[susanne.zibek@igb.fraunhofer.de](mailto:susanne.zibek@igb.fraunhofer.de)

Dr.-Ing. Pravesh Tamang  
Tel.+49 711 970-4283  
[pravesh.tamang@igb.fraunhofer.de](mailto:pravesh.tamang@igb.fraunhofer.de)

# H<sub>2</sub>Wood – BlackForest

## Produktion von Biowasserstoff aus Holzabfällen

Die Region Schwarzwald will Holzabfälle als lokale Ressource zur dezentralen Herstellung von Biowasserstoff als regenerativem Energieträger erschließen. Hierzu untersucht das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte und vom Fraunhofer IGB koordinierte Projekt H<sub>2</sub>Wood – BlackForest das Potenzial von Holzabfällen für die biotechnologische Erzeugung von Wasserstoff und dessen energetische Nutzung. In einer integrierten Pilotanlage am Campus Schwarzwald soll die Herstellung von Biowasserstoff demonstriert werden.

Für die verfahrenstechnische Realisierung wird ein Anlagenkonzept zur Gewinnung von Biowasserstoff aus Holzabfällen mittels biotechnologischer Prozesse als Alternative zu thermochemischen Verfahren analysiert und bewertet. Der erste Schritt hierbei besteht in der Zerkleinerung des Altholzes (Bruch aus Häuserrückbau oder Paletten und Fensterläden etc.) und der Abtrennung von Störstoffen (z. B. Eisennägel aus Paletten) mittels Siebung. Anschließend wird der Grobschnitt des Alt- und Restholzes, im Druckreaktor mit Lösemittel gekocht. Somit lösen sich Bestandteile wie Lignin oder Klebstoffe und Lacke. Auf diese Weise kann die cellulosereiche Faser fraktioniert und mittels Enzymen hydrolysiert werden. Dabei entstehen Zucker, die aufkonzentriert und in unserer Fermentation eingesetzt werden können.

Für die Umwandlung der aus dem Holz gewonnenen Zucker in Biowasserstoff werden am Fraunhofer IGB zwei Bioverfahrensmodule untersucht und miteinander verknüpft. Das eine setzt auf wasserstoffproduzierende Bakterien, z. B. Anaerobier wie *Clostridium* sp., welche die Zucker zu Wasserstoff verstoffwechseln. Zusätzlich entstehen die Stoffwechselprodukte CO<sub>2</sub> und organische Säuren, welche als Substrate für Mikroalgen eingesetzt werden. Diese produzieren daraus Stärke und Carotinoide als Koppelprodukte. In einem

zweiten Schritt setzen die Mikroalgen über Direkte Photolyse in einem vollständig neuen Reaktortyp zusätzlichen Wasserstoff frei.

Einige Module des Pilotanlagenkomplexes wurde bereits 2024 am Fraunhofer IGB aufgebaut und getestet. Die Planung für den Aufbau am Campus Schwarzwald ist im vollen Gange. Die Anlage soll im Sommer/Herbst 2025 in Betrieb genommen werden.

Damit wird der Weg bereitet, die biotechnologische Erzeugung von Wasserstoff erstmals in einem größeren Maßstab zu demonstrieren.



*Mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz muss derzeit in genehmigten Großkraftwerken verbrannt werden. In H<sub>2</sub>Wood entstehen daraus Wasserstoff, Carotinoide und Stärke.*

### Weitere Informationen



[www.igb.fraunhofer.de/h2wood](http://www.igb.fraunhofer.de/h2wood)

### Kontakt

Dr.-Ing. Susanne Zibek  
Tel. +49 711 970-4167  
susanne.zibek@igb.fraunhofer.de

Dr. Ulrike Schmid-Staiger  
Tel. +49 711 970-4111  
ulrike.schmid-staiger@igb.fraunhofer.de



**Biobasierte Bausteine helfen nicht nur bei der Defossilisierung der Chemie. Sie sind auch einfach zugänglich sowie hochfunktional und ermöglichen Innovationssprünge zu grünen Materialien mit neuen funktionellen Eigenschaften.«**

**Dr. Michael Richter**  
Abteilungsleiter Bioinspirierte Chemie



# Biopolymere – Materialbausteine der Zukunft

---

## Neue Rohstoffe und Technologien für biobasierte Kunststoffe

Wenn wir in unseren (Arbeits-)Alltag um uns herum etwas anfassen, handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein synthetisch produziertes Material, das Polymere beinhaltet. Um unseren Lebensstandard zu bewahren, zu verbessern und gleichzeitig die Herstellung und Verfügbarkeit von Hochleistungsmaterialien ressourceneffizienter und klimafreundlicher zu gestalten, ist die stetige Entwicklung von neuen Materialien nach Prinzipien der nachhaltigen Chemie alternativlos.

Für den breiteren Einsatz von biobasierten Kunststoffen in verschiedenen Anwendungen sind Innovationen innerhalb des gesamten Wertschöpfungszyklus wesentlich, angefangen bei der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung bis hin zum Recycling. Nur mit diesen kann es gelingen, den ökonomischen und technischen Vorsprung der konventionellen fossilbasierten Kunststoffe aufzuholen und Biokunststoffe im Markt zu akkumulieren und zu etablieren, sowie die Akzeptanz für deren einzigartige Vorteile zu schaffen.

## Wir verbinden Biologie und Technik und lassen uns von der Natur inspirieren

Ein Ansatz, der am Fraunhofer IGB dazu verfolgt wird, ist es, auf die Lösungen aus der Natur zu schauen und diese für technologische Anwendungen zu nutzen. Damit ist die Welt der natürlichen polymeren Materialbausteine aus der Natur gemeint, der sogenannten Biopolymere. Der Clou dabei ist, dass solche natürlichen oder modifizierten Biopolymere nicht nur fossile Rohstoffe ersetzen können, sondern aufgrund ihrer passfähigen Chemie und Materialeigenschaften in einem anderen Kontext als dem biologischen genutzt werden und funktionale Vorteile gegenüber fossilbasierten Lösungen bieten können.

Die Synthese von biobasierten Polymeren ist quasi die Verkörperung der Prinzipien der Grünen Chemie. Der Ansatz ist auch in Übereinstimmung mit einem Positionspapier der acatech »Impulsgeber Natur – Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien und Werkstoffe« und den Kernzielen einer zirkulären Bioökonomie. Die Strategie dient ebenfalls dazu, die Materialchemie zu biologisieren und die Defossilisierung der chemischen Industrie voranzutreiben.

## Biopolymere, biobasierte Polymere, Biokunststoffe

### Biopolymere

Biopolymere sind, im ursprünglichen Sinn, Polymere, die in der belebten Natur vorkommen, also von Organismen hergestellt werden. Dazu gehören Proteine, Nukleinsäuren, Polysaccharide sowie das im Holz enthaltene Lignin, eines der häufigsten organischen Verbindungen der Erde. Mikroorganismen synthetisieren darüber hinaus Polymere aus organischen Säuren (z. B. Polyhydroxyalkanoate, PHA) als Speicherstoffe.

### Biobasierte Polymere

Die Herstellung von Monomeren (auch nicht-natürlichen biobasierten Monomeren) und deren Polymerisation kann auch auf chemischem oder biotechnologischem Weg, außerhalb der Zelle, erfolgen. Zur Unterscheidung von den o. g. biogenen Polymeren (bzw. nativen Biopolymeren) spricht man hier von biobasierten Polymeren. Ein Beispiel hierfür ist Polylactid (PLA). Es wird aus Lactid hergestellt, welches aus von Bakterien synthetisierter Milchsäure (Laktat) gewonnen wird.

### Biokunststoffe

Biobasierte Kunststoffe, kurz Biokunststoffe, bestehen zu einem wesentlichen Anteil oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen.

Anhand der Innovationskette zur Herstellung von Biopolymeren und biobasierten Kunststoffen sowie ausgewählter Beispiele aus unserem Institut soll im Folgenden aufgezeigt werden, wie wir Unternehmen beim notwendigen Wandel der Rohstoffbasis unterstützen und welches Potenzial in Biopolymeren verborgen ist.

### Politische Rahmenbedingungen werden Nachfrage nach biobasierten Polymeren erhöhen

Der Bedarf an alternativen Lösungen für fossilbasierte Materialien und Chemikalien wird in den kommenden Jahren mit großer Wahrscheinlichkeit noch weiter an Bedeutung gewinnen, da entsprechende neue Gesetze in Kraft treten. Allen voran betrifft das die neue Verordnung der Europäischen Union über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Packaging Packaging Waste Regulation, kurz PPWR), die ab 2028 geltend wird. Darin nimmt die EU die Produzenten in die Pflicht, das Aufkommen von Verpackungsabfällen drastisch zu reduzieren. Die Verordnung legt zudem konkrete Recyclingziele fest und enthält erstmals auch eine Verpflichtung zur Kompostierbarkeit von bestimmten Verpackungsformen und Materialien.

Auch die nächste EU-Düngemittelverordnung (FPR), die sukzessive von 2024 bis 2028 in Kraft tritt, zielt darauf ab, die Nachfrage nach biologisch abbaubaren Produkten bzw. Materialien zu erhöhen. Konkret betrifft dies biologisch abbaubare Mulchfolien, Beschichtungen und wasserrückhaltende Polymere. Nicht zu vergessen ist auch die Novellierung der deutschen Abwasserverordnung aus dem Jahr 2024, die sich unter anderem auf den Textilbereich – man denke etwa an das Auswaschen von Textilbeschichtungen – und den Einsatz von Flockungsmitteln in der Abwasseraufbereitung auswirkt.

## Prinzipien der Grünen Chemie



Abfälle vermeiden



Sichere Lösungsmittel und Hilfsstoffe



Katalyse



Nutzen effizienter Atomökonomie



Effiziente Energienutzung



Design für Abbaubarkeit



Weniger gefährliche chemische Synthesen



Erneuerbare Rohstoffe verwenden



Echtzeitanalyse zur Reduktion von Schadstoffemissionen



Sichere Chemikalien entwickeln



Minimierung von Derivaten



Unfälle vermeiden durch sicherere Chemie

# Unsere Lösungsansätze für nachhaltige Biokunststoffe

Am Fraunhofer IGB forschen wir an Entwicklungen mit unterschiedlichen Biopolymeren. Dazu gehören Polysaccharide wie Cellulose und Chitin/Chitosan, Polyester wie Polyhydroxyalkanoate (PHA), Polyamide wie Proteine und komplexe Polymernetzwerke wie Lignin. Zur technischen Herstellung der Biopolymere nutzen wir letztendlich die Synthesefähigkeiten der Natur. Die entstehenden Biopolymere werden dann aus Biomasse isoliert, aufgereinigt und ggf. für Anwendungen modifiziert (z. B. PHA, Chitin/Chitosan, Lignin, Proteine).

Ebenso gewinnen wir auf biotechnologischem Weg Monomere, die mittels weiterer Schritte in das Ziel-Biopolymer überführt werden (z. B. Polymalat).

Daneben forschen wir an biobasierten Polymeren wie den Caramiden (terpenbasierte Polyamide) oder Polyethylenfuranoat (PEF) als potenziellem PET-Ersatz, welches den zukunfts-trächtigen Polyester-Baustein Furandicarbonsäure (FDCA) enthält. Solche Polymere enthalten allesamt biobasierte Monomerbausteine.

## Die Rohstoffbasis für Biopolymere und biobasierte Polymere

Die Natur hält ein breites Repertoire zur Biosynthese von Polymeren bereit. Je nach Organismus können dabei unterschiedliche Rohstoffquellen genutzt werden. Pflanzen und Mikroalgen nutzen Kohlenstoffdioxid zum Aufbau von Cellulose oder Stärke mittels Photosynthese. Bakterien, die PHA einlagern, nutzen bevorzugt organische Stoffe.

Am Fraunhofer IGB machen wir uns für die Herstellung von Biopolymeren und biobasierten Polymeren das komplette Spektrum der Syntheseleistungen der Natur zunutze. Damit können wir unterschiedlichste Rohstoffe nutzen wie CO<sub>2</sub>, biogene Roh- und Reststoffe und wie jüngst gezeigt sogar biogene Abfallstoffe (siehe Seiten 44 und 50).

Ein Hauptaugenmerk liegt auf dem nachwachsenden Rohstoff Holz, inkl. aller seiner Bestandteile, sowie ligninhaltiger Biomasse aus Nebenströmen der Landwirtschaft, wie z. B. Weizenstroh. Für die Aufspaltung der Lignocellulose, dem Bestandteil der Zellwand verholzter Pflanzen, setzen wir neue Verfahren wie den Organosolv-Aufschluss ein, bei dem die Solubilisierung des Lignins mithilfe von organischen Lösemitteln an unserer Pilotanlage am Fraunhofer CBP in Leuna erfolgt. Die Erweiterung der Rohstoffbasis für Kunststoffe aus CO<sub>2</sub> ist ein weiteres Ziel, das wir aktiv verfolgen.

Durch die Nutzung nachwachsender, nachhaltig produzierter Rohstoffe sowie biogener Rest- und Abfallstoffe zur Herstellung von Polymeren tragen wir zur Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft ohne fossile Rohstoffe bei.



## Labor für Technische Biopolymere – LTBP

In diesem vom bayerischen Staatsministerium geförderten Projekt decken wir die gesamte Wertschöpfungskette biobasierter Materialien ab: von der Identifikation geeigneter Ausgangsstoffe über die Funktionalisierung, Polymerisation und Additivierung bis hin zur Wiederverwertbarkeit und Bioabbaubarkeit. Damit sind wir ein kompetenter Ansprechpartner für die regionale und überregionale Industrie und Forschung zum Thema biogene Kunststoffe.

► [www.igb.fraunhofer.de/ltpb](http://www.igb.fraunhofer.de/ltpb)

## Unsere Technologien zur Herstellung und Modifizierung von Biopolymeren

Um in Zukunft fossilbasierte Polymere durch Biopolymere ersetzen zu können, müssen bestehende Prozesse optimiert, neue effiziente Prozesse etabliert und diese zu ganzheitlichen Wertschöpfungskreisläufen zusammengefügt werden.

Durch Erforschung unterschiedlicher Rohstoffnutzungswege und verschiedener Synthesestrategien sind wir am Fraunhofer IGB in der Lage, diverse chemische Zwischenprodukte zur Polymersynthese auf Basis von Biomasse herzustellen. Dies erfolgt beispielsweise über innovative biotechnologische oder chemische Konversionen von Biomassebestandteilen wie Kohlenhydraten oder Lignin. Die Spanne reicht dabei von sogenannten Drop-in-Verbindungen, also molekularidentischen Produkten, bis hin zu Biokunststoffen mit teilweise neuen Eigenschaftsprofilen, z. B. Polymilchsäure und andere biobasierte Polyester. Auch indem wir Prozesse zur Aufreinigung verschiedener biobasierter Monomere und Biopolymere entwerfen und optimieren, tragen wir am Fraunhofer IGB zur Entwicklung neuartiger biobasierter Kunststoffe bei.

Im Zuge des weiteren Wertschöpfungszyklus kann das chemisch oder biotechnologisch hergestellte Polymer dann auch mit anderen Polymeren oder Additiven verbunden werden, um die Materialeigenschaften für die späteren Kunststoffbauteile anzupassen. Beispiele dafür sind etwa Weichmacher, Flammschutzmittel, Stabilisatoren, aber auch (Natur-)Fasern oder biobasierte Carbonfasern. Nach

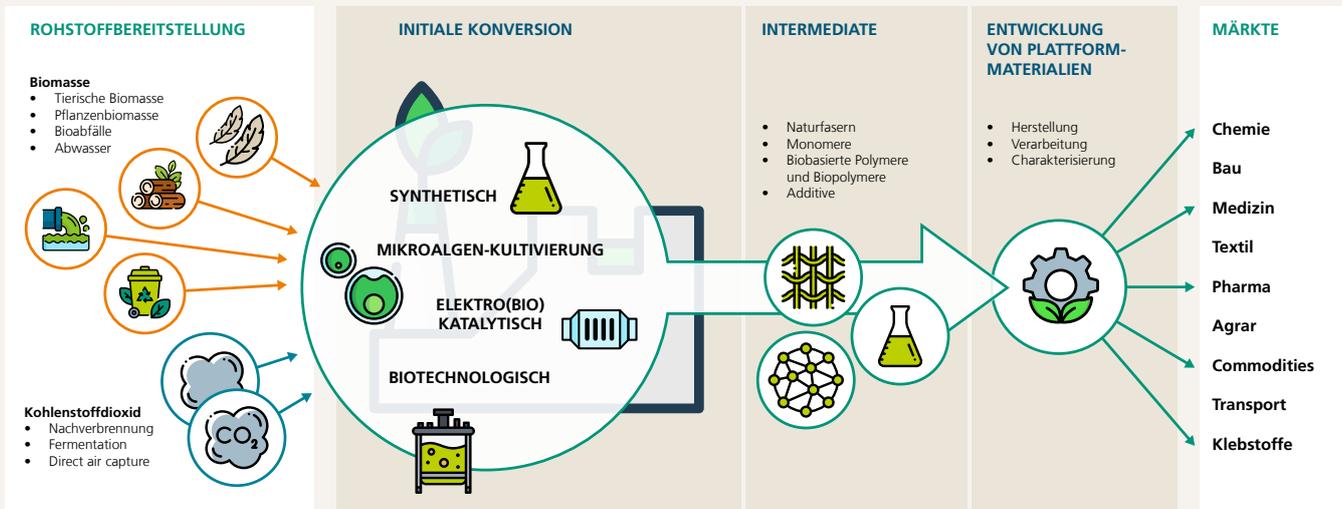
der sogenannten Compoundierung – also der Mischung – lassen sich die biobasierten Kunststoffe dann zu Folien, Formkörpern oder Bauteilen verarbeiten. Grundsätzlich können dabei alle herkömmlichen Verarbeitungstechnologien für klassische fossilbasierte Kunststoffe eingesetzt werden, wobei die Werkstoffeigenschaften der biobasierten Kunststoffe in den meisten Fällen eine spezifische Anpassung der Prozessparameter nötig machen.

Biopolymere wie Gelatine oder Chitosan können auch einfach funktionalisiert werden, um deren Eigenschaften an die jeweiligen Anwendungen anzupassen. Wir verwenden dabei chemische Vernetzungstechnologien zum Aufbau von gewebeähnlichen Hydrogelen. Durch die kontrollierte Vernetzung erhalten wir Hydrogele mit einstellbaren mechanischen und biologischen Eigenschaften. Hydrogele spielen für eine beträchtliche Anzahl von biotechnischen Entwicklungen oder Anwendungen in der Medizin eine Rolle, z. B. für Membranen, Implantate, Biosensoren oder das Tissue Engineering.

Am IGB arbeiten wir daran, Technologien zur Herstellung und Modifizierung von Biopolymeren zu verbessern und neue Polymerbausteine hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften wie auch einer wirtschaftlichen Herstellung zu testen, zu evaluieren und zu optimieren.

## Verarbeitung

Parallel zur Entwicklung neuer biobasierter Materialien stellt sich für die industrielle und technische Anwendung die Frage der Kompatibilität mit traditionellen Techniken der werkstofflichen Verarbeitung. Erste grundlegende Untersuchungen zur Verarbeitung neuer biobasierter Kunststoffe und Materialien, beispielsweise mittels Extrusion und Spritzguss, sind integrierter Bestandteil unserer Entwicklungsarbeiten. Die Verarbeitung im Kleinst- und Kleinmaßstab dient dabei vor allem dazu, die Entwicklung neuer biobasierter Materialien nicht nur anwendungs- und eigenschaftsgetrieben, sondern auch unter dem Aspekt der Verarbeitbarkeit voranzutreiben.



Die Nutzung von Biopolymeren folgt der klassischen Innovationskette der Bioökonomie i) Rohstoffbereitstellung, ii) Konversion und iii) Entwicklung von Plattformmaterialien für Produktentwicklungen bzw. zur funktionalen Integration in Produkte.

## Materialcharakterisierung und Testung

Zusätzlich zur Bewertung der Verarbeitungsparameter steht nachgeschaltet eine breite Methodenplattform zur genormten Prüfung und Analyse der neu entwickelten Werkstoffe bereit. Diese umfasst rheologische, dynamisch-mechanische und verschiedene thermische Analysen.

Neben der Materialcharakterisierung ist die Untersuchung der Materialien mit Blick auf gewünschte oder bekannte Wirkungen, z. B. antimikrobielle Eigenschaften, aber ebenso auch auf unerwartete nachteilige Auswirkungen auf den Menschen, die sowohl toxikologische als auch immunologische Aspekte betreffen, von Bedeutung. Hierzu stehen am IGB verschiedene zellbasierte Testsysteme zur Verfügung, die sich für eine Vielzahl von Testverfahren wie Bioaktivitäts-, Zytotoxizitäts- und Immunogenitätsprüfungen oder der Testung von antimikrobiellen Eigenschaften eignen.

Im Vergleich zu ethisch bedenklichen und nur bedingt übertragbaren Tierversuchen und in ihrer Aussage eingeschränkten biochemischen Testmethoden stellen diese zellbasierten Testsysteme als New Approach Methods (NAM) die In-vivo-Situation realitätsnah nach und ermöglichen die direkte Analyse einer Zellreaktion. Die Abteilung Zell- und Gewebetechnologien verfügt über ein breites Portfolio an spezifischen In-vitro-Modellsystemen, die von einfachen Zell-Assays mit hohem Durchsatz, über komplexe Organoid-Systeme bis zu makroskopischen komplexen 3D-Gewebemodellen reichen. Kerntechnologie ist die gezielte Entwicklung von zellbasierten Reportertestsystemen zur einfachen und schnellen Bestimmung spezifischer Endpunkte, beispielsweise Toxizität oder Sensibilisierung.



Dreidimensionales In-vitro-Modell der humanen Haut als NAM-Testsystem



*Großtechnische Anlagen  
am Fraunhofer CBP für den  
Scale-up*

## Skalierung und Herstellung von Mustermengen

Ein essenzieller Schritt auf dem Weg vom Labor in die großtechnische Umsetzung ist die Herstellung von Mustermengen im Pilotmaßstab. Mit unserem Know-how, unserer Erfahrung und technischen Ausstattung sind wir am Fraunhofer IGB in der Lage, entwickelte Prozesse im Technikums- und Pilotmaßstab hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Effizienz zu optimieren und Produktmuster im Gramm- bis Kilogramm-Maßstab für Polymerisationen und Anwendungstests zur Verfügung zu stellen. Hierfür kommen auch die Pilotanlagen am Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP, unserem Institutsteil in Leuna, zum Einsatz.

Ein Beispiel sind die Polyhydroxyalkanoate (PHA), die von einigen Bakterien als natürliche Speicherstoffe produziert und aus einer Vielzahl von Reststoffen hergestellt werden können. Die großtechnische Aufreinigung ist derzeit noch sehr kostenintensiv. Durch Selektion geeigneter Produktionsstämme und Etablierung einer neuen Prozessführungsstrategie ist es uns aktuell gelungen, ein qualitativ hochwertiges PHA-Copolymer mit einem 3-Hydroxyvaleratanteil von ca. 10 Prozent aus Abfallströmen zu gewinnen (siehe Seite 50).

## End-of-Life-Szenarios: Kreislaufführung und Bioabbaubarkeit

Um eine maximale Kreislaufführung des Kohlenstoffs zu erreichen und den Bedarf an fossilem Kohlenstoff zu minimieren, ist unser Ziel, neue Wertschöpfungsprozesse in bestehende und zukünftige Stoffkreisläufe zu integrieren. Hierzu gehört auch die Lebenszyklus-Analyse (LCA).

Nach der Nutzung des Bauteils, am Ende seines Produktlebenszyklus, sollte das Material durch einen Recyclingschritt wieder in den Wertschöpfungskreislauf zurückgeführt werden. Hierfür kommen je nach Biokunststoff verschiedene Wege in Frage: Im Fall des werkstofflichen Recyclings wird das Polymer direkt wiedergewonnen, beim chemischen Recycling wird es zunächst in kleine Bausteine gespalten, die dann erneut für eine Polymerisation genutzt werden können, womit sich der Kreislauf schließt.

Viele biobasierte Kunststoffe wie Stärke, PHA und PLA sind zudem bioabbaubar. Über den Weg des biologischen Abbaus gehen sie in Form von CO<sub>2</sub> wieder zurück in den Kohlenstoffkreislauf, ohne dass sie zu einer Vermüllung der Biosphäre beitragen. Der direkt und bewusst gesteuerte Weg des Bioabbaus als Lebensende-Szenario ist allerdings nur für solche Produktkategorien vorzusehen, bei denen eine Emission in die Umwelt nicht vermeidbar (z. B. verschiedene Produkte wie Mulchfolien in der Landwirtschaft oder »flüssiges« Plastik bspw. in Kosmetika) oder in denen Wiederverwendung und Recycling nicht praktikabel sind.

### Weitere Informationen



[www.igb.fraunhofer.de/  
biopolymere-materialien](http://www.igb.fraunhofer.de/biopolymere-materialien)

### Kontakt

Dr. Michael Richter  
Tel. +49 9421 9380-1020  
michael.richter@  
igb.fraunhofer.de

# Biopolymere und biobasierte Polymere

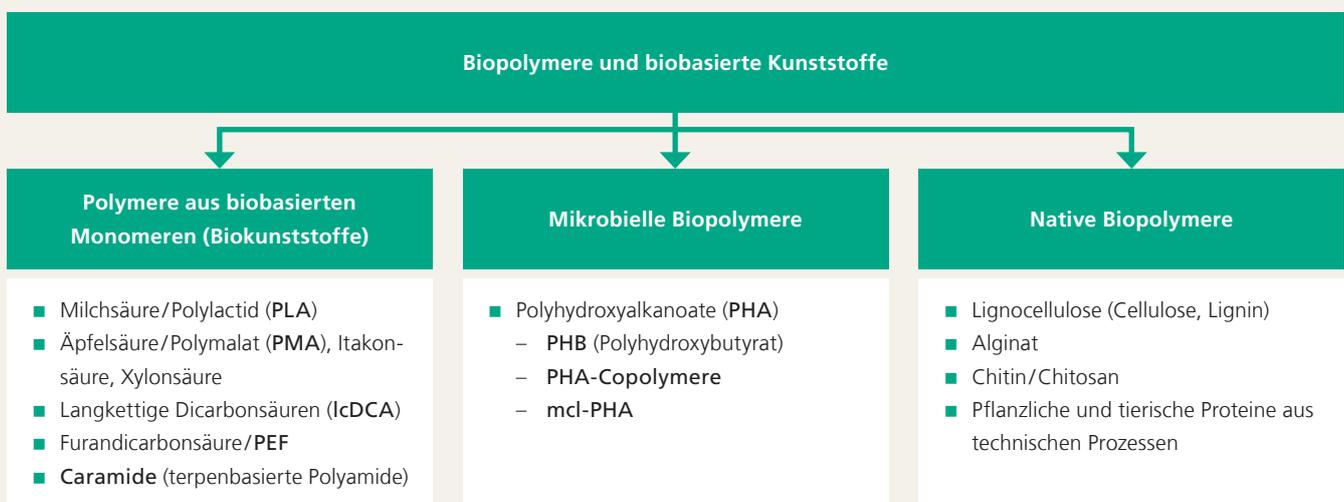
## Unsere Monomere, Produkte und Einsatzmöglichkeiten

Kunststoffe werden vielfach noch synthetisch auf Erdölbasis hergestellt. Werden sie am Ende ihrer Nutzung durch Verbrennung entsorgt, geht dies mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen einher. So ist aufgrund der Klimakrise die Nutzung klimafreundlicher Ressourcen dringend erforderlich. Biobasierte Kunststoffe stellen in diesem Kontext eine nachhaltige Alternative dar: Sie helfen, Klima- und Ressourcenschutzziele zu erreichen, aber auch die Abhängigkeit von ausländischen Produktionsquellen zu verringern und die Resilienz von Wertschöpfungsketten zu erhöhen.

Darüber hinaus sind Umweltaspekte wie die Verschmutzung der Weltmeere durch Plastik ein dringendes Problem unserer Zeit. So ist die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen ein wichtiger Faktor, vor allem dann,

wenn Kunststoffe für den direkten Einsatz in der Umwelt benötigt werden (z. B. in der Landwirtschaft genutzte Folien). Die Biokompatibilität von Kunststoffen spielt bei medizinischen und kosmetischen Anwendungen eine bedeutende Rolle.

Das Fraunhofer IGB trägt entscheidend zur Entwicklung neuartiger Kunststoffe auf biologischer Basis bei. Unser Angebot lässt sich in drei Polymer-Typen unterteilen: Polymere aus biobasierten Monomeren, mikrobiell hergestellte Biopolymere sowie andere native Biopolymere. In den folgenden Abschnitten sollen einige Beispiele aus unserem Institut aufgezeigt und die konkreten Endprodukte und Anwendungsmöglichkeiten dargestellt werden.



## Polymere aus biobasierten Monomeren

Für die Herstellung von biobasierten Polymeren bedarf es zunächst der nächstkleineren Bauteile, den Monomeren. Diese kann das Fraunhofer IGB biotechnologisch mittels Fermentation produzieren – auch aus Rest- und Abfallströmen, ganz im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, wie sie vom IGB angestrebt wird. Im nächsten Schritt werden die Monomere – je nach genutztem Verfahren – chemisch oder biologisch polymerisiert.



PHA und PHA-haltige Biomasse

### Biobasierte Hydroxy- und Dicarbonsäuren als Monomerbausteine für Biokunststoffe

Am Fraunhofer IGB stellen wir mit verschiedenen fermentativen Verfahren Hydroxycarbonsäuren und Dicarbonsäuren aus biogenen Reststoffströmen her. Unser Portfolio umfasst hierbei Äpfelsäure, Itakonsäure, Xylonsäure, langkettige Dicarbonsäuren (lcDCA) und Milchsäure, die sich in nachfolgenden Prozessen polymerisieren lassen.

Die Einstellung der gewünschten Polymereigenschaften kann bei der Verwendung biobasierter Carbonsäuren nicht nur über das Monomer selbst, sondern auch über die

Polymerisationsbedingungen erreicht werden. Die Verfahrensentwicklung unter Berücksichtigung des Substrates, dessen Zufütterung oder des Mikroorganismus hat zwar keinen Einfluss auf die Eigenschaften des Zielmoleküls, ist jedoch für Produktkonzentration und Effizienz der Umsetzung entscheidend. Im Fall von Xylonsäure konnten wir so etwa Titer über 300 g/L erreichen.

Ebenso befassen wir uns, gemeinsam mit Projektpartnern, mit der fermentativen Herstellung von enantiomerenreiner Äpfelsäure, der weiteren Aufreinigung sowie der anschließenden Herstellung der Polymere. Homopolymere der racemischen Äpfelsäure sind wasserlöslich, biokompatibel und biologisch abbaubar, aber gleichzeitig hart und spröde. Im Projekt Malum konnten durch Funktionalisierung oder Copolymerisation von Äpfelsäure mit anderen Monomeren neuartige Biopolymere mit höherer Elastizität und Zähigkeit hergestellt werden. Erste anwendungstechnische Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Polymere als Kaschierklebstoffe eingesetzt werden können.

► [www.igb.fraunhofer.de/biopolymere](http://www.igb.fraunhofer.de/biopolymere)

### Polymere aus biobasierten Furanoaten als Ersatz für PET

Ein sehr weit verbreiteter Kunststoff ist PET: Polyethylenterephthalat. Dieser auf fossiler oder teilbiobasierter Basis hergestellte Kunststoff wird unter anderem in großen Mengen zur Herstellung von Verpackungsmaterialien verwendet. So ist beispielsweise die Bezeichnung »PET-Flasche« der breiten Öffentlichkeit bekannt. Deswegen rückt PET auch in den Fokus der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des IGB. Am Institut forschen sie daran, einen biobasierten PET-Ersatz zu erschließen: Polyethylenfuranoat (PEF), aufgebaut aus biobasiertem Ethylenglycol und Furandicarbonsäure (FDCA). PEF kann als Verpackungsmaterial, aber auch als biobasierte

Fasern eingesetzt werden. Die FDCA-Produktion ist dabei besonders nachhaltig, denn sie erfolgt mithilfe von land- und forstwirtschaftlichen Abfällen. In den Projekten »PFIFF/PFIFFIG – Polymere Fasern aus biobasierten Furanen für industrielle Anwendungen« konnte das IGB dieses Herstellungsverfahren für den Einsatz im großen Maßstab in der Industrie weiterentwickeln.

► [www.igb.fraunhofer.de/pfiff-pfiffig](http://www.igb.fraunhofer.de/pfiff-pfiffig)

### Monomerbaustein langkettige Dicarbonsäuren (lcDCA) und pflanzenölbasierte Epoxide

Ein weiterer natürlicher Ausgangsstoff für die Kunststoffproduktion, der am IGB untersucht wird, sind Pflanzenöle. Diese enthalten bi- und polyfunktionelle Synthesebausteine. So lassen sich die Öle und Pflanzenölderivate durch eine entsprechende Funktionalisierung zu interessanten Monomerbausteinen wie langkettige Dicarbonsäuren (lcDCA) oder pflanzenölbasierte Epoxide umsetzen.

Die langkettigen Dicarbonsäuren dienen als biobasierte Alternative zur Herstellung von Kunststoffen, die üblicherweise auf Basis von Stärke, Cellulose und Polymilchsäure (PLA) produziert werden. Sie finden beispielsweise Anwendung bei der Herstellung von Polyamiden und Polyestern. Pflanzenölbasierte Epoxide lassen sich dagegen als PVC-Stabilisatoren, Weichmacher, zur Synthese von biobasierten Harzen und Beschichtungen oder nach weiterer Umsetzung als Bestandteile von Schmierstoffformulierungen einsetzen.

► [www.igb.fraunhofer.de/lcdca](http://www.igb.fraunhofer.de/lcdca)

### Caramid-R® und Caramid-S® – neuartige Polyamide aus terpenoiden Abfallströmen

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt auf Monoterpenen – Biomolekülen, die von unterschiedlichsten Pflanzen, Mikroorganismen und Pilzen in hoher struktureller Vielfalt produziert werden. Vorwiegend lassen sie sich auch aus industriellen Abfallströmen gewinnen, beispielsweise der Papier- und Saftindustrie. Diese eignen sich potenziell als Ausgangsstoff für biobasierte Kunststoffe, denn sie lassen sich durch gängige chemische Verfahren modifizieren, haben einen geringen Gehalt an Heteroatomen, eine Molekülgröße, die in einem vergleichbaren Bereich wie petrochemisch gewonnene Monomere liegt und eine Molekülstruktur, die ihnen und dem entsprechenden Polymer spezielle Eigenschaften verleiht.

Zwei konkrete Polymere aus Terpenen, die das Fraunhofer IGB entwickelt hat, sind die Polyamide Caramid-R® und Caramid-S®. Auch hier greift das Fraunhofer IGB auf eine nachhaltige Ressource zurück, denn die Terpene fallen bei der Herstellung von Zellstoff als Nebenprodukt an. Dafür synthetisieren die IGB-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler mit einem patentierten Verfahren zunächst Lactame aus dem Monoterpen (+)-3-Caren. Diese werden dann anschließend zu Caramid-R® und Caramid-S® polymerisiert.

Diese Polyamide haben aufgrund ihrer besonderen chemischen Struktur außergewöhnliche thermische Eigenschaften, die sie für zahlreiche Anwendungsgebiete interessant machen, die vom Maschinenbau – etwa für Zahnräder – über Sicherheitsglas, Polyamid-Schäume und Sicherheitstextilien bis hin zum Einsatz als chirurgisches Nahtmaterial reichen. Caramid-R® und Caramid-S® werden mittlerweile im Zuge des Leitprojekts SuBi<sup>2</sup>Ma am IGB, IAP, ICT, LBF, IWM und ITWM weiterentwickelt (siehe Seite 66).

► [www.igb.fraunhofer.de/terpene](http://www.igb.fraunhofer.de/terpene)



*Oben:*  
Pflanzenöle als Basis für die Kunststoffproduktion

*Unten:*  
Industrielle Abfallströme, wie hier aus der Papierindustrie, eignen sich als Ausgangsstoff für biobasierte Kunststoffe.

## Mikrobielle Biopolymere

Für die biotechnologische Polymerherstellung greifen die Forschenden des IGB auch auf die Hilfe von Mikroorganismen zurück. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Produktion von Polyhydroxyalkanoaten, kurz PHA. Das sind Speicherpolymere von Bakterien, die diese unter bestimmten Bedingungen – konkret: Nährstoffmangel und Kohlenstoffüberschuss – erzeugen.

Anwendungszweck. Dazu verwenden die Forschenden des IGB auch nachhaltige Substrate für die Mikroorganismen aus Rest- und Abfallströmen wie etwa Altspeiseöl, Carbonsäuren aus der Abwasserreinigung oder Rohglycerin. Die Herstellung größerer Mustermengen erfolgt dabei auch an unserem Institutsteil in Leuna, dem Fraunhofer CBP.

► [www.igb.fraunhofer.de/pha](http://www.igb.fraunhofer.de/pha)



*Wegen ihrer Bioabbaubarkeit eignen sich PHA besonders für den Einsatz in der Landwirtschaft, z. B. als Folien.*

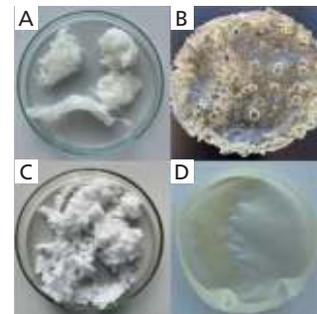
### Polyhydroxyalkanoate – diverse PHA-Variationen verfügbar

Der große Vorteil der mikrobiellen Synthese von PHA: Es gibt zahlreiche Stellschrauben innerhalb des Prozesses, um die hergestellten Biopolymere mit spezifisch gewünschten thermischen und mechanischen Eigenschaften auszustatten. Das wäre einerseits die enorme Bandbreite an Mikroorganismen und Substraten, die sich miteinander kombinieren lassen. Andererseits bietet auch der Bioprozess selbst einige Optimierungsmöglichkeiten.

So lässt sich die genaue Zusammensetzung der PHA variieren. Unabhängig davon haben alle PHA gemein, dass sie sich durch eine hohe Biokompatibilität und biologische Abbaubarkeit auszeichnen.

Das macht sie zu einer idealen Ausgangsbasis zur Herstellung von Verpackungen (z. B. Einweg-Plastikflaschen im Non-Food-Bereich), medizinischen Implantaten oder Folien für den Einsatz in der Landwirtschaft.

Das Fraunhofer IGB verfügt über die Expertise und langjährige Erfahrung zur Gewinnung von PHA. Das Institut kann somit Varianten von PHA und seiner Copolymere PHBVV (Poly-3-hydroxybutyrat-co-3-hydroxyvalerat-co-4-hydroxyvalerat) mit unterschiedlichem Valeratgehalt herstellen – je nach den Anforderungen für den jeweiligen



*Verschiedene PHA: A und B: mittelkettige PHA, C: PHBVV-Copolymer, D: PHBVV-Folie*

### EFRE-Programm: Baden-Württemberg und EU fördern Aufbau von Bioraffinerien

Eine zentrale Bedeutung haben hier auch die Bioraffinerie-Projekte des IGB. In Bioraffinerien wird Biomasse umgewandelt und somit als Rohstoff erschlossen. Gleich fünf solcher Vorhaben hat das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit Fördermitteln der EU aus dem EFRE-Programm »Bioökonomie – Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall und Abwasser – Bio-Ab-Cycling« gefördert (ab Seite 36). In zwei dieser Vorhaben wird auch PHA gewonnen. Im Projekt »KoalAplan« wurde dafür kommunales Abwasser in Kläranlagen verwendet, im Vorhaben »BW2Pro – Biowaste to Products« hat das IGB Bioabfälle zur Weiterverwertung zu biologisch abbaubaren Biokunststoffen genutzt.

► [www.igb.fraunhofer.de/efre](http://www.igb.fraunhofer.de/efre)

## Native Biopolymere

Polymere kommen auch ganz natürlich in der Umwelt vor. Beispiele hier sind Pflanzenbestandteile wie Lignocellulose, aus der sich Lignin und Cellulose gewinnen lassen, aber auch Stoffe tierischen oder fungalen Ursprungs, etwa Chitin bzw. das Folgeprodukt Chitosan, das wir aus Krabbenschalen, Insektenexuvien oder Reststoffströmen der industriellen Fermentation gewinnen. Ebenso arbeiten wir am Fraunhofer IGB an der Erschließung von Proteinen als Rohstoff für technische Produkte, beispielsweise der Nutzung tierischer Protein-Reststoffe (Federn, Wolle) oder von Insektenprotein, das mittels unserer Insektenbioraffinerie aus Bioabfällen gewonnen wird (siehe Seite 41).

### Lignocellulose – Reststoff aus verholzten Pflanzen

Lignocellulose ist das Strukturmaterial in der Zellwand aller holzigen Pflanzen und Hauptbestandteil von Reststoffen wie Stroh oder Holz – und damit in großem Maßstab verfügbar, etwa aus der Land- und Forstwirtschaft. Am IGB wird es via Fraktionierung in seine Bestandteile Cellulose (C6-Zucker), Hemicellulose (C5-Zucker) und Lignin (aromatische Verbindungen) aufgespalten – wesentliche Voraussetzung für eine vollständige und hochwertige stoffliche Nutzung als nachwachsendem Chemierohstoff. Am Fraunhofer CBP in Leuna steht hierzu eine Pilotanlage zur Verfügung, mit der bis zu 70 Kilogramm Holz pro Tag verarbeitet werden können.

Aus **Cellulose** wird beispielsweise durch enzymatische Hydrolyse Glukose gewonnen. Diese kann als Substrat für vielfältige Fermentationen eingesetzt werden und so derzeit vor allem eingesetzte höherwertige Rohstoffquellen wie Zuckerrohr oder Stärke ersetzen. Während der Fermentation verstoffwechseln Mikroorganismen, wie Bakterien oder Pilze, diese Kohlenstoffverbindungen und wandeln sie einerseits in Biomasse um, aber auch in eine Vielzahl von Chemikalien, wie z. B. Ethanol, Bernsteinsäure, Butandiol oder auch Milchsäure, welche dann weiter zu Polymeren



*Ligninabtrennung durch Filterpresse am Fraunhofer CBP*

wie Bio-Polyethylen (Bio-PE), Polybutylensuccinat (PBS) oder Polymilchsäure (PLA) verarbeitet werden können. Polymere wie Polyhydroxybuttersäure (PHB) lassen sich auch direkt fermentativ aus Zucker gewinnen (siehe Seite 62: Mikrobielle Biopolymere).

Grundbausteine des **Lignins** bilden substituierte Phenole, vor allem Guaiacol, Syringol und p-Hydroxyphenol, deren Anteil je nach Holzart variiert. Am Fraunhofer CBP untersuchen und skalieren wir verschiedene Verfahren zur Modifikation und Depolymerisation von Lignin, welche die Struktur und Funktionalität von Lignin erhalten oder steigern. So werden neue, bisher nicht zugängliche aromatische Strukturen mit neuen Funktionalitäten und damit einem neuen Leistungsspektrum identifiziert, die in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen eingesetzt werden können: von der Herstellung von Fasern und faserverstärkten Kunststoffen, über den Einsatz als Epoxid-/Phenolharze oder Holzschutzlasur bis zu Polyurethan-Hartschäumen.

- ▶ [www.cbp.fraunhofer.dellignocellulose-bioraffinerie](http://www.cbp.fraunhofer.dellignocellulose-bioraffinerie)
- ▶ [www.cbp.fraunhofer.dellignin](http://www.cbp.fraunhofer.dellignin)

### Chitin: Rohstoff zur Herstellung von Chitosan

Chitin ist nach Lignocellulose das zweithäufigste Biopolymer der Welt und wird beispielsweise von Pilzen, Insekten und Krabben als strukturelle Komponente gebildet. Um Chitin zu Chitosan umzuwandeln, muss es zunächst einmal isoliert und mit unterschiedlichen Verfahren aufgereinigt werden. Auch hier verleiht die hohe Bioverfügbarkeit der Ressource ein enormes Potenzial als nachwachsender Rohstoff. Eine vielversprechende vegane Quelle ist pilzliche Biomasse aus großskaligen Fermentationsprozessen. Die Verwertung von Insekten-Chitin wurde am IGB im Rahmen des EFRE-Projekts »InBiRa – die Insektenbioraffinerie« genauer untersucht (siehe Seite 41). Chitosan findet nicht nur Verwendung in der Textilindustrie, beispielsweise zum Schutz des Garns beim Weben, sondern kann etwa auch als biobasiertes Flockungsmittel für die Aufbereitung komplexer Abwässer genutzt werden.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/aufbereitung-von-chitin](http://www.igb.fraunhofer.de/aufbereitung-von-chitin)

Durch chemische Modifizierung von Chitosan können zusätzliche Eigenschaften erzeugt werden, z. B. wasserabweisende Eigenschaften für Textilveredlungen. Die Anwendungen sind sehr vielfältig und reichen von der Verkapselung von Wirkstoffen, Beschichtungen für Medizinprodukte, Biosensorik, Diagnostik bis hin zu Kosmetik.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/modifizierte-biopolymere](http://www.igb.fraunhofer.de/modifizierte-biopolymere)

### Wertvolles Protein: Keratin aus Vogelfedern

Eine weitere natürliche Ressource sind Federn, die bei der Geflügelfleischproduktion als Nebenprodukt anfallen. Der größte Anteil dieser Federn wird bislang zu Tiermehl verarbeitet oder als Abfall entsorgt. Doch auch dieses Material lässt sich nachhaltig nutzen: Das in den Federn enthaltene Keratin, ein wasserunlösliches Strukturprotein, wurde am IGB im Projekt »KERAbond – Spezialchemikalien aus maßgeschneiderten funktionalen



*Insektenhäute, sogenannte Exuvien, beinhalten wertvolles Chitin*

Keratin-Proteinen« als Ausgangsmaterial für die Isolierung von polythiolhaltigen Peptiden erforscht. Mögliche Anwendungen werden in der Herstellung von Klebstoffen und Spezialchemikalien zur Oberflächenbehandlung gesehen.

Durch die Nutzung von Proteinen wie bspw. Federn lassen sich enzymresponsive Fragmente in Materialien einbringen, die prinzipiell auch neue Recyclingstrategien erlauben. Hierdurch werden die intrinsischen Eigenschaften der natürlichen Polyamide genutzt, die so durch fossilbasierte Ansätze nicht einfach möglich wären.

- ▶ [www.igb.fraunhofer.de/kerabond](http://www.igb.fraunhofer.de/kerabond)



*Ausgangsstoffe für Hydrogele*

### **Modifizierte Biopolymere und Hydrogele für die Life Sciences**

Insgesamt liegt der Fokus der Polymer-Forschung am IGB auf der Herstellung von biobasierten Kunststoffen, aber auch im Gesundheitsbereich gibt es Anwendungsmöglichkeiten für native Polymere, etwa in Form von Hydrogelen, die als Gewebematrix oder für Freisetzungssysteme für Wirkstoffe verwendet werden können. Bei Hydrogelen handelt es sich um wasserenthaltende und gleichzeitig wasserunlösliche Polymere. Geeignete natürliche Ausgangsstoffe für solche Gele sind z.B. Gelatine, Alginate oder Chitosan.

► [www.igb.fraunhofer.de/hydrogel](http://www.igb.fraunhofer.de/hydrogel)

Durch chemische Modifizierung passen wir Biopolymere wie Gelatine, Chitosan, Inulin oder Hyaluronsäure gezielt an die je nach Einsatzgebiet unterschiedlichen Bedürfnisse an. Durch das Anbringen verschiedenster chemischer Funktionen (z. B. Methacrylgruppen, Thiolgruppen und Benzophenone) können wir Eigenschaften wie die Viskosität, die Löslichkeit oder auch die Ladung des Biopolymers zielführend verändern. Mit vernetzbaren oder hydrophoben Gruppen etwa erzeugen wir stabilere und unlöslichere Systeme, beispielsweise für die Verkapselung von Wirkstoffen, oder für funktionelle wasserabweisende Beschichtungen. Auch für 3D-Druckverfahren ist die Modifizierung von Biopolymeren interessant, da hierdurch unter anderem die Viskosität temperaturunabhängig angepasst werden kann.

► [www.igb.fraunhofer.de/modifizierte-biopolymere](http://www.igb.fraunhofer.de/modifizierte-biopolymere)

# Fraunhofer-Leitprojekt SUBI<sup>2</sup>MA – nachhaltige biobasierte und biohybride Materialien

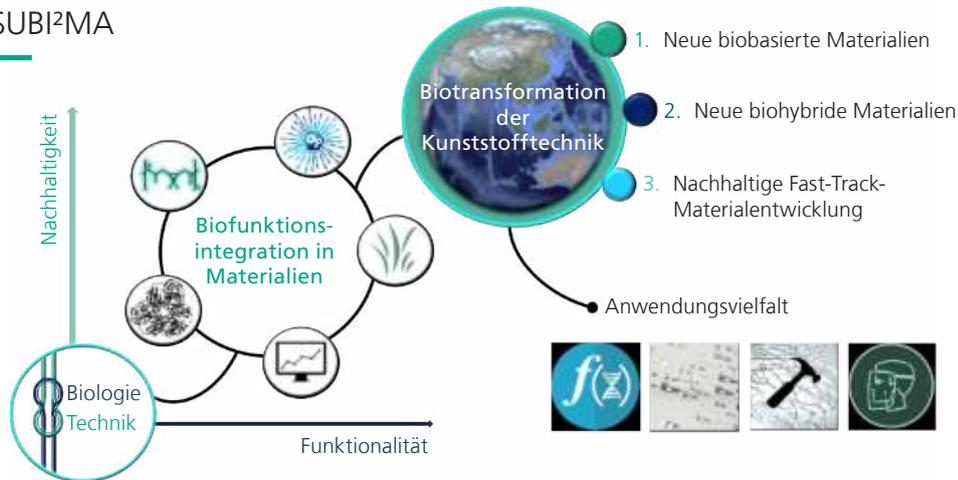
## Biotransformation der Kunststofftechnik



Das Leitprojekt SUBI<sup>2</sup>MA (Nachhaltige biobasierte und biohybride Materialien) stellt einen einzigartigen Ansatz zur Biotransformation der Kunststofftechnik vor. Im Zentrum steht der Nutzen von biobasierten Materialbausteinen aufgrund ihrer exklusiven molekularen Funktionalitäten. SUBI<sup>2</sup>MA geht mit diesen Kriterien in der Biotransformation der Kunststoffe noch einen entscheidenden Schritt weiter: Durch die Integration derartiger biologischer Komponenten können zukünftig ganz neue Materialien entwickelt, hergestellt und dem Markt zur Verfügung gestellt werden.

Der modulare Ansatz bietet eine Vielzahl an Materiallösungen:

- Neue biobasierte High-Performance-Polymere
- Bioabbaubarkeit
- Bio-Flammschutz
- Hydrophilierung/Hydrophobierung
- Faser-Matrix-Haftung
- Erweiterung des Anwendungsspektrums etablierter Polymere

SUBI<sup>2</sup>MA

*Herangehensweisen  
und die drei Hauptziele  
in SUBI<sup>2</sup>MA*

SUBI<sup>2</sup>MA-Materialien liefern der Kunststoff- und chemischen Industrie sowie den Folgemärkten wie der Bauchemie, Automobilindustrie, Textilchemie und Gesundheit eine Antwort auf die Herausforderungen nationaler und globaler Nachhaltigkeitsstrategien. Die digitalen Abbildungen der geschaffenen Innovationsprinzipien ermöglichen darüber hinaus, schnell und flexibel auf zukünftige Herausforderungen der Transformation der Kunststofftechnik und anderer Märkte im Kontext nachhaltigen Wirtschaftens reagieren zu können.

Drei Schlüsselthemen/-ziele werden dabei im Projekt bearbeitet:

1. Bereitstellung und Demonstration von **neuen biobasierten Materialien** durch Entwicklung von Syntheserouten, Verarbeitungstechnologien, Charakterisierung und Evaluation
2. Bereitstellung und Demonstration von **neuen biohybriden Materialien** durch Optimierung der Eigenschaften, Funktionalisierung, Charakterisierung und Evaluation
3. Erarbeitung und Etablierung von **nachhaltigen Fast-Track-Entwicklungen** durch Digitalisierung, Simulation und ganzheitlicher ökologischer Bewertung

Das erste Ziel, »**neue biobasierte Materialien**«, soll erreicht werden, indem ein neues biobasiertes Hochleistungspolyamid, das Caramid, bis zur Marktreife entwickelt wird. Dieses neue biobasierte Polyamid wurde durch das Fraunhofer IGB am Institutsteil Straubing erstmalig synthetisiert und wird im Rahmen des Projekts sowohl von der Synthese, als auch von den Verarbeitungsmethoden her derart weiterentwickelt und die Anwendung demonstriert, dass es als konkurrenzfähige Alternative zu fossilen Polyamiden bestehen kann.

Ziel Nummer zwei, »**neue biohybride Materialien**«, wird durch die Integration von biologischen Bausteinen in Kunststoffe erfüllt, die diesen zusätzliche Funktionen verleihen und so das Anwendungsspektrum erweitern. Hierbei spielt die Prä- und die Postumformung von PET und Cellulose, als massenhaft eingesetzte Polymere eine entscheidende Rolle. Funktionalitäten, die angestrebt werden, sind die Steuerung der Hydrophilie, die biobasierte Additivierung für Flammenschutz sowie der beschleunigte Abbau und die antimikrobielle Wirksamkeit.

Das dritte Ziel, »**Fast-Track-Entwicklungen**«, umfasst die Konzeptionierung einer digitalen Wertschöpfungskette, um zukünftig Materialsubstitutionen deutlich zu beschleunigen, aber auch Nachhaltigkeitsbetrachtungen bei

der Materialentwicklung. Die digitale Wertschöpfungskette umfasst Digitalisierung und Simulation von molekularer Ebene der Synthese bis hin zu Modellierung von Prozessen, wie dem Faserspinnen, und ebenso die Entwicklung von digitalen Demonstratoren.

Die Forschungsaktivitäten am Fraunhofer IGB, Institutsteil Straubing, konzentrierten sich auf die Ziele eins und zwei.



Monomer aus der Synthese beim Lohnhersteller nach Lieferung (oben) und nach Aufreinigung (unten)

Hauptaufgabe des ersten Ziels ist die Weiterentwicklung von Caramid durch Synthese- und Verarbeitungsoptimierung. Caramid wird aus dem Naturstoff 3-Caren nach chemischer Modifikation gewonnen. 3-Caren, ein Monoterpen, fällt in größeren Mengen bei der Bereitstellung von Cellulose im Kraft-Prozess als bisher kaum genutzter Nebenstrom an. Zwei unterschiedliche Monomer-Bausteine können aus 3-Caren gewonnen werden: 3S-Caranlactam und 3R-Caranlactam. Das Fraunhofer IGB fokussiert sich in Ziel eins auf die Optimierung der Reaktionsbedingungen zur Synthese der beiden Monomere 3S- und 3R-Caranlactam, sowie deren Bereitstellung in ausreichenden Mengen. Durch die Beauftragung eines Lohnherstellers konnten Technikums Mengen 3R-Caranlactam bereitgestellt werden. Die Aufreinigung fand am Fraunhofer CBP statt.

Das gereinigte 3R-Caranlactam-Monomer, sowie kleinere Mengen des in kleineren Chargen am Fraunhofer IGB synthetisierten 3S-Caranlactams wurden dem Fraunhofer IAP übergeben.

Die Polymerisation zu Gusspolyamid erfolgte am Fraunhofer IGB, die hydrolytische Polymerisation wurde am Fraunhofer IAP entwickelt, wie auch die Verarbeitung zu nachhaltigen Monofilamenten für Textilien. Am Fraunhofer ICT erfolgt die Schäumung von Caramid zu biobasierten Polyamidschäumen, z. B. für den Leichtbau.

Im Rahmen des zweiten Ziels liegt der Schwerpunkt beim Fraunhofer IGB auf der Hydrophobierung von Cellulosefasern für textile Anwendungen und bei der exemplarischen Ausrüstung von cellulosebasierten Membranen am Beispiel von Rezeptoren des angeborenen Immunsystems, den Toll-like-Rezeptoren (TLR) als einfaches Analysetool für mikrobielle Verunreinigung.

Die Hydrophobierung von Cellulose wurde mithilfe von Fusionsproteinen bestehend aus einer Cellulosebindedomäne und einem Hydrophobin im Gramm-Maßstab durchgeführt. Durch Variation beider Domänen ließen sich verschiedene Fusionsproteine rekombinant herstellen und untersuchen. Je nach Art und Konzentration des Konstrukts konnte in Tropfentests die erfolgreiche Hydrophobierung der Cellulose gezeigt werden.



Polymerisation der Caranlactam-Monomere zu Caramid



Weiterverarbeitung der Caramide zu Gusspolyamid-Platten (links), Fasern (Monofilamenten, Mitte) oder Schäumen (rechts) zur Demonstration verschiedener Anwendungen

In aktuellen Arbeiten wird der Einfluss der hydrophobierten Cellulose zur Herstellung von Cellulosefaser-verstärkten PLA untersucht. Dazu werden PLA-Compounds mit hydrophobierter und unbehandelter Cellulose hergestellt und hinsichtlich ihrer Materialkennwerte (u. a. Zugprüfung) verglichen.

TLR erkennen mikrobielle Rückstände, isolierte chemische Strukturen, Zellwandbestandteile oder vollständige Mikroorganismen. Sie können im Gegensatz zu Antikörpern, die jeweils auf den Nachweis sehr spezifischer Antigene eingeschränkt sind, weite Mikroorganismenklassen wie z.B. Gram-negative oder Gram-positive Bakterien nachweisen. Damit eignen sich TLR vor allem, um unbekannte Analyten im Sinne einer Summenanalytik einzuengen bzw. klassenspezifisch Proben zu selektieren. Hierin liegt die Stärke von TLR als Analysetools, da mit den einzelnen TLR bzw. TLR-Komplexen sehr schnell Kontaminationsquellen in ihrer Herkunft (Gram-positive

bzw. -negative Bakterien, Viren, Hefe, Pilze) eingeschränkt werden können. Dieses Wissen reduziert maßgeblich den Analyseaufwand, bietet einen Zeitvorteil und spart somit Kosten ein. Die fermentative Produktion der TLR in mammalischen Expressionssystemen sowie die gerichtete Funktionalisierung ausgewählter Materialien mit TLR wurde bereits durchgeführt. Ziel ist es, exemplarisch strukturiert funktionalisierte Cellulose-Membranen mit immobilisierten TLR herzustellen und daraus erste Teststreifen zum Nachweis Gram-positiver Bakterien und deren Rückstände als Demonstrator aufzubauen.



Hydrophobierte Cellulose im Tropfentest (oben links), Schnittfasern (Cordenka, oben rechts) und Bruchbild der Prüfstäbe 1BA (Faseranteil 10 %, links)

### Partnerinstitute

Fraunhofer IAP (Koordination),  
Fraunhofer IGB, Fraunhofer LBF,  
Fraunhofer ICT, Fraunhofer  
ITWM, Fraunhofer IWM

### Weitere Informationen



[www.subi2ma.fraunhofer.de](http://www.subi2ma.fraunhofer.de)

### Kontakt

Dr. Paul Stockmann  
Tel. +49 9421 9380-1004  
paul.stockmann@  
igb.fraunhofer.de

Dr. Michael Richter  
Tel. +49 9421 9380-1020  
michael.richter@  
igb.fraunhofer.de

# Publikationen



# Dissertationen

## **Grübel, Jana**

Hydrogele aus Polyethylenglykol und methacryloylierter Gelatine für biosensorische Oberflächen,  
Universität Stuttgart,  
<http://dx.doi.org/10.18419/opus-14991>

## **Hartwig, Christina M.**

Etablierung und Evaluierung molekularbiologischer Verfahren zur Analyse zellfreier DNA für die Infektions- und Tumordiagnostik,  
Universität Stuttgart

## **Joseph, Angel**

Plant-based TiO<sub>2</sub>-RGO nanocomposite for the removal of emerging contaminants,  
Indian Institute of Technology Delhi (IITD)

## **Maucher, Tanja**

Entwicklung eines Schnelltests zur on-site Detektion von toxischen Substanzen in Wasser unter Nutzung von fluoreszierenden Bakterien,  
Universität Stuttgart,  
<https://doi.org/10.18419/opus-15477>

## **Oraby, Amira**

Integrated process design and optimization for the production of cellobiose lipids from *Ustilago* sp.,  
Universität Stuttgart,  
<http://dx.doi.org/10.18419/opus-14775>

## **Pauly, Steffen**

Modellierung und Diagnostik einer Remote-Mikrowellen-Plasmaquelle zum Hochrateätzen,  
Universität Stuttgart,  
<http://dx.doi.org/10.18419/opus-14909>

## **Schieder, Andreas**

Development of a green process to obtain L-cysteine-rich peptides from chicken feathers,  
Technische Universität München (TUM)

## **Yeh, Yen-Cheng**

Improving optical measurements, online monitoring, growth modelling, and automated control in microalgae production of *Phaeodactylum tricorutum*,  
Universität Stuttgart

## Auf einen Blick

---

- 8 Dissertationen
- 43 Hochschularbeiten
- 76 Lehrtätigkeiten
- 43 Artikel in Fachzeitschriften
- 3 Berichte und Buchbeiträge
- 6 neu erteilte Schutzrechte

# Impressum

---

## Redaktion und Lektorat

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Antje Hetebrüg,  
Lisa Kern M. A. (Bild),  
Dipl.-Betriebswirt (DHBW) Jan Müller M. A.,  
Dr. Elke Präg,  
Dipl.-Des. Thaya Schroeder M. Sc. (Bild),  
Dr. Claudia Vorbeck  
und die jeweils als Ansprechpersonen  
genannten Wissenschaftler und  
Wissenschaftlerinnen.

## Gestaltung

Dipl.-Des. Thaya Schroeder M. Sc.

## Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen-  
und Bioverfahrenstechnik IGB  
Dr. Claudia Vorbeck  
Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart

## Bildquellen

Adobe Stock: 14, 55, 61, 62  
Banczerowski, Piotr: 10  
Binsack, Gunter: 58  
(Created with) Biorender.com: 18, 19, 22  
BW2Pro: 44  
Eppler, Frank: 26, 38, 39  
Evonik: 49  
Kleinbach, Frank: 6

Alle anderen Abbildungen

© Fraunhofer IGB/Fraunhofer-Gesellschaft

BioEcoSIM®, Caramid-R®, Caramid-S®, ePhos®, nanodyn®,  
Nawamere®, Morgenstadt®, POLO® und SYSWASSER® sind ein-  
getragene Marken der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung  
der angewandten Forschung e. V. in Deutschland.

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

© Fraunhofer IGB, Stuttgart 2025

# Information

---

Weitere Informationen finden Sie im Internet

## Kompetenzen

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

## Leistungsangebot

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

## Analytik-Leistungsangebot

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

## Infrastruktur, Labor- und Geräteausstattung

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

## Kooperationen und Netzwerke

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

## Kuratorium

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

## Aktuelle Messen und Veranstaltungen

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

## Publikationen

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

## Presseinformationen

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

## Newsletteranmeldung

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

... oder folgen Sie uns auf unseren Social-Media-Kanälen



LinkedIn

[www.linkedin.com/company/fraunhofer-igb](http://www.linkedin.com/company/fraunhofer-igb)



Instagram

[www.instagram.com/fraunhoferigb](http://www.instagram.com/fraunhoferigb)



Mastodon

[wiskomm.social/@fraunhoferigb](https://wiskomm.social/@fraunhoferigb)



YouTube

[www.youtube.com/FraunhoferIGB](http://www.youtube.com/FraunhoferIGB)

## Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Tel. +49 711 970-4401  
Fax +49 711 970-4200  
[info@igb.fraunhofer.de](mailto:info@igb.fraunhofer.de)

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



## Wir verbinden Biologie und Technik

---

2024 konnte die neue IGB-Außenstelle in Biberach ihren Betrieb aufnehmen. In den hochmodernen Laboren am neuen Standort arbeitet nun ein junges, hochmotiviertes Team von Nachwuchsforschenden an Virus-basierten Therapien.

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