

Für eine nachhaltige Bioökonomie





# Ein gelungenes Experiment

**Prof. Dr. Ulrich Schurr**

Forschungszentrum Jülich

Sprecher des Geschäftsführenden Direktoriums des BioSC



Die Idee zu einem großen Wissenschaftsverbund zur Bioökonomie-Forschung in der Region entstand bei den wissenschaftlichen Akteuren. Erste Gespräche mit Vertretern der RWTH Aachen und der HHU Düsseldorf begannen bereits 2008. „Gemeinsam sind wir stärker“ war überzeugend – die Profile der Wissenschaft ergänzten sich hervorragend. Schnell war klar, dass die Universität Bonn mit ihrer Kompetenz in den Agrarwissenschaften Gründungsmitglied sein musste. Erfolgversprechende Ansätze zur Bioökonomie konnten nur in der Zusammenarbeit einer breiten Kompetenz in Pflanzen- und Agrarforschung, in verfahrenstechnischer Konversion von Biomasse und Biotechnologie funktionieren. Aber technische Optionen allein führen nicht zur nachhaltigen Umsetzung – die Erfahrungen aus anderen Technologiefeldern machten deutlich, dass die sozioökonomische Forschung direkt eingebunden werden musste.

Die Verantwortlichen in den Universitäten und im Forschungszentrum Jülich hatten zunächst den entwickelten Konzepten gegenüber Bedenken. Als dann aber mit Unterstützung des Wissenschaftsministeriums des Landes NRW unter Führung von Professor Andreas Pinkwart ein Weg gefunden wurde, die Finanzierung des Strategieprojektes sicherzustellen, war der Weg für das erste Kompetenzzentrum für nachhaltige Bioökonomie frei.

Es war ein großes Wagnis, diese vielen verschiedenen Expertisen zusammenführen zu wollen. Aber bereits bei der Übergabe des ersten Bewilligungsbescheids durch Wissenschaftsministerin Svenja Schulze wurden der inhaltliche Mehrwert und die strukturelle Chance für das Rheinland deutlich. Trotzdem herrschte an vielen

Stellen Skepsis: „Kann dieses Experiment gelingen?“ Doch der unermüdliche Einsatz von Wissenschaftlern, Mitarbeitern der Geschäftsstelle und des Beirats, der stets kritisch, aber von der Idee beseelt war, zeigte schnell Erfolge: Am Ende der ersten Phase umfassten fast 80 Prozent aller im Strategieprojekt geförderten Projekte Partner aus allen vier Forschungsbereichen, und innovative Ideen waren die Regel, nicht die Ausnahme. Die Begeisterung für das Konzept wuchs – mit zunehmender Aufmerksamkeit aus anderen Regionen in Deutschland, Europa und der Welt. Das BioSC wurde zu einer Marke, an der sich auch andere orientierten.

Nach dem breiten Sammlungsansatz von Phase 1 stand eine Konsolidierung auf weniger Themen an. Hier zeigte sich eine besondere Qualität des BioSC, die bis heute und auch für die Zukunft ein Schlüssel zum Erfolg ist: Das BioSC ist ein lernendes und agiles System. Und: Fördergeber und Verantwortliche in den Einrichtungen räumten dem BioSC die Möglichkeit ein, aus dem Gelernten Schlüsse zu ziehen und diese umzusetzen. Dieses Vertrauen ist die Basis für die außerordentliche Entwicklung des BioSC als Benchmark für nachhaltige Bioökonomie und regionale Wissenschaftskooperation.

Das BioSC stellt in einem sehr dynamischen Wissenschaftsfeld weiterhin eine einmalige Chance dar: Wissenschaftsgebiete zusammenzuführen, die sonst wenig Berührungspunkte haben, aber essenziell sind, um eine nachhaltige Bioökonomie für die Zukunft zu entwickeln. Das BioSC ist ein gelungenes Experiment, das noch viel vor hat! Lassen Sie uns gemeinsam diese Zukunft gestalten!



**Prof. Dr. Thomas-Müller-Kirschbaum**  
tmk-expertise  
Beiratsmitglied des BioSC

4

Wenn es das Bioeconomy Science Center nicht schon gäbe, müsste man es erfinden! Wie gut, dass die Wissenschaftler\*innen in Aachen, Bonn, Düsseldorf und Jülich zusammen mit der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen bereits 2010 die Weitsicht und den Mut hatten, sich für dieses Projekt zu engagieren. Darauf und auf das Erreichte dürfen alle Beteiligten stolz sein. Auch aus Sicht der Industrie und aus meiner persönlichen Sicht eines Beiratsmitgliedes ist das BioSC ein großer Erfolg. Allen, die dazu aktiv beigetragen haben, möchte ich ganz ausdrücklich danken.

Mich beeindruckt besonders, dass das BioSC zu einem Zeitpunkt vorgedacht und vorgearbeitet hat, als die Begriffe „Circular Economy“ und „Klimaneutralität“ oder die Berücksichtigung der UN Sustainable Development Goals noch nicht so selbstverständlich waren wie heute.

Sehr überzeugend ist das einzigartige disziplinübergreifende und systemische Gesamtkonzept des BioSC. Die rasch organisierte Vernetzung und die kontinuierlich ausgebaute Kooperation der naturwissenschaftlich/technischen und der ökonomischen beziehungsweise sozialwissenschaftlichen Fachrichtungen hat die Basis für dieses herausragende Kompetenzzentrum geschaffen. Es hat sich gezeigt, dass die Forschung mit diesem multidisziplinären Ansatz ganzheitlicher und besser wird.

Und auch die Kompetenz der Forscher\*innen verbessert sich durch das systemische Konzept. Die Ausbildung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses profitiert beim BioSC von der interdisziplinären Zusammenarbeit in doppelter Weise. Auf der einen Seite erweitert sich das Wissen über die eigene Disziplin hinaus. Auf der anderen Seite entwickeln die Wissenschaftler\*innen ein Verständnis für die unterschiedliche Denk- und Vorgehensweise in anderen Fachgebieten. Die erfolgreiche Arbeit in multidisziplinären Teams ist eine hervorragende Vorbereitung auch für diejenigen, die ihren Berufsweg im industriellen Umfeld fortsetzen wollen.

Wer eine klimaneutrale Wirtschaft und geschlossene Rohstoffkreisläufe will, wird nicht ohne eine nachhaltige Bioökonomie auskommen. Das BioSC hat dazu in den letzten zehn Jahren einen einzigartigen Beitrag geleistet. Ich wünsche allen Forscher\*innen, dass sich dieser Erfolg für das BioSC und für sie persönlich auch in der Zukunft fortsetzt.

Herzlichen Glückwunsch zum Jubiläum und alles Gute für die Zukunft!



**Sen.-Prof. Dr. Peter Westhoff**  
HHU Düsseldorf  
Gründungsmitglied des BioSC

Das Bioeconomy Science Center feiert sein zehnjähriges Bestehen. Das ist Anlass zurückzublicken, aber – und noch viel wichtiger – auch, den Blick nach vorne zu richten: Wohin soll die Reise gehen? Dem rational denkenden Teil der Menschheit ist schon seit Langem klar, dass wir wie bisher in unserer Energie-, Material- und Ernährungsökonomie nicht weiter wirtschaften können. Wir müssen weg von den auf fossilen Energien und Materialien beruhenden Produktionsweisen hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsform, die erneuerbare Energien bevorzugt nutzt und Abfälle möglichst vermeidet beziehungsweise als Rohstoffe in einer zirkulären Bioökonomie betrachtet.

Diese Fragestellung hat das Bioeconomy Science Center vor zehn Jahren aufgegriffen und begonnen, Methoden und Techniken für solch eine zirkuläre Bioökonomie zu entwickeln. Und dafür brauchten die Forscher und Forscherinnen gar nicht weit zu blicken, denn die Natur macht uns das seit Jahrtausenden vor – sie ist eine Meisterin des Recyclings. Der Einstieg in eine nachhaltige und zirkuläre Bioökonomie erfordert Naturwissenschaftler und Ingenieure, die diese Methoden und Techniken der Natur abschauen und zur Anwendungsreife entwickeln.

Es wird aber auch der kalte Blick der Ökonomie verlangt: Kann das neu entwickelte Verfahren überhaupt auf dem Markt bestehen beziehungsweise wann könnte es konkurrenzfähig sein?

Und schließlich müssen die Menschen für diese gewaltige Aufgabe begeistert werden. Forscher und Forscherinnen müssen aus ihrem Elfenbeinturm heraustreten und es als ihre vornehmste Aufgabe ansehen, an der Lösung der großen Probleme der Menschheit mitarbeiten zu dürfen. Solchen von ihrer Arbeit begeisterten Forschern wird es dann auch leicht gelingen, die Bevölkerung zu begeistern und auf dieser Reise mitzunehmen. All diese Aspekte hat das Bioeconomy Science Center schon seit der Gründung in seine Strategie einbezogen. Dafür gebührt ihm ein ganz dickes Lob!

In meiner langjährigen Tätigkeit als Prorektor für Forschung und Transfer der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf war mir das Bioeconomy Science Center immer eine Herzensangelegenheit – und es wird auch weiterhin in meinem Herzen bleiben! Ich wünsche dem Bioeconomy Science Center für die Zukunft alles Gute und den Mut, weiterhin beherzt an dieser großen Transformation der Wirtschaft in unserer Region mitzuwirken.



**Prof. Dr. Sandra Venghaus**  
Forschungszentrum Jülich  
Sprecherin der FocusLab-Leiter

6

Vor zehn Jahren wurde mit dem Bioeconomy Science Center ein Forschungsverbund ins Leben gerufen, der ein wissenschaftliches Umdenken hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie anstoßen sollte. Dies sollte durch interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Natur-, Agrar-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften über das gesamte Spektrum von Grundlagenforschung bis hin zur Demonstration und Anwendung erreicht werden.

Mit den FocusLabs wurde im Rahmen des NRW-Strategieprojektes BioSC ein Förderkonzept für große multidisziplinäre Verbundprojekte umgesetzt, mit deren Leitung Nachwuchswissenschaftler betraut wurden. Eine wesentliche Voraussetzung dafür, diese Aufgabe zu meistern, war die Bereitschaft und Fähigkeit, über den „eigenen Tellerrand“ hinauszuschauen und sich auf Einblicke in ganz andere Forschungsdisziplinen einzulassen. Oft bedeutete die interdisziplinäre Kooperation zunächst, sich gegenseitig verstehen zu lernen, bevor man eine „gemeinsame Sprache“ sprechen konnte.

Die Vielfalt der Perspektiven ist es, die für die komplexe Aufgabe einer Transformation hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie von entscheidender Bedeutung ist. Im Rahmen der BioSC Focus Labs wird schon jetzt der interdisziplinäre Gedanke in die unterschiedlichen Teilbereiche der Bioökonomie getragen, prägt Kooperationen mit Industriepartnern ebenso wie die Forschung in beteiligten Disziplinen.

Diese gemeinschaftliche und auf einen systemischen Ansatz ausgerichtete Forschung wollen wir auch in Zukunft weiterführen, um den Weg hin zu einer wissenschaftsbasierten Bioökonomie weiter mitzugestalten. Deshalb bringen wir unsere Ideen und Konzepte bereits vor Ort in Feldversuche und Pilotprojekte ein und zeigen neue Perspektiven auch über das BioSC hinaus auf.

Die Leitung solch umfänglicher standortübergreifender Projekte hat es uns FocusLab-Leitern ermöglicht, schon in einer Frühphase der wissenschaftlichen Karriere ein hohes Maß an Verantwortung für die Umsetzung eines Großprojektes zu übernehmen. Stellvertretend möchte ich mich an dieser Stelle für eine ausgezeichnete und erfolgreiche wissenschaftliche Zusammenarbeit bei all jenen bedanken, die dies ermöglicht haben.

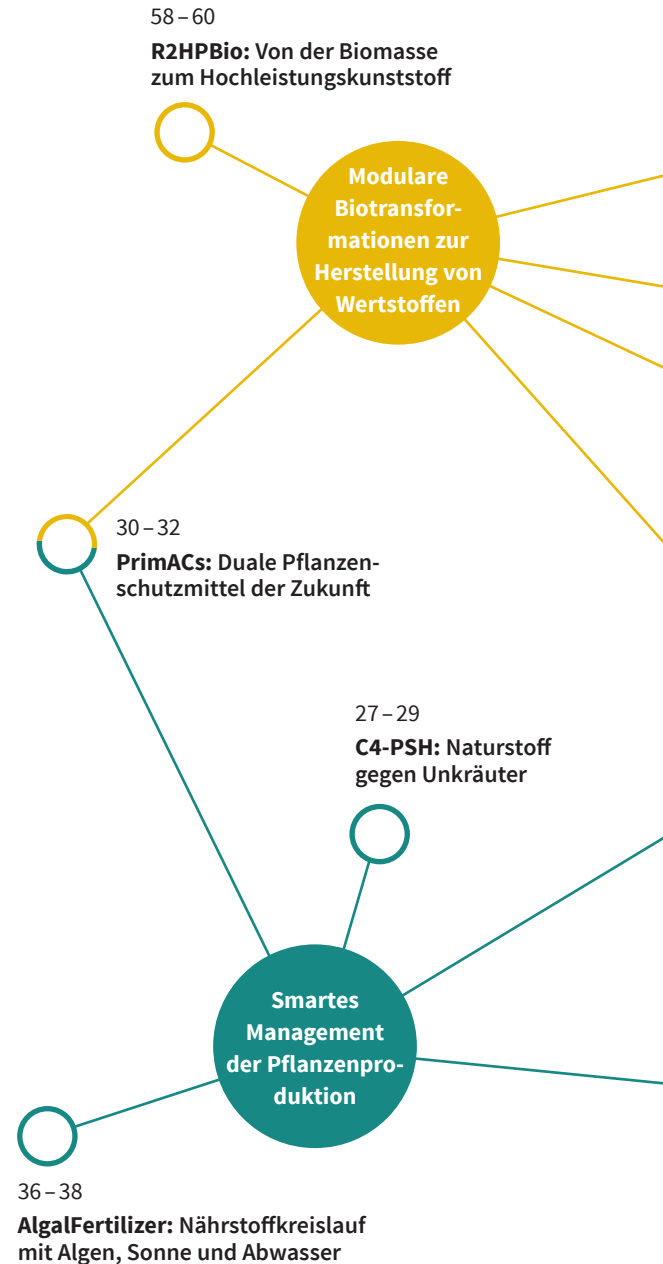
In diesem Sinne freuen wir uns, Ihnen in dieser Broschüre zentrale Erkenntnisse und Perspektiven aus den FocusLabs vorzustellen, und wünschen viel Freude bei der Lektüre.

Forschen • Ausbilden • Vernetzen  
Für eine nachhaltige Bioökonomie

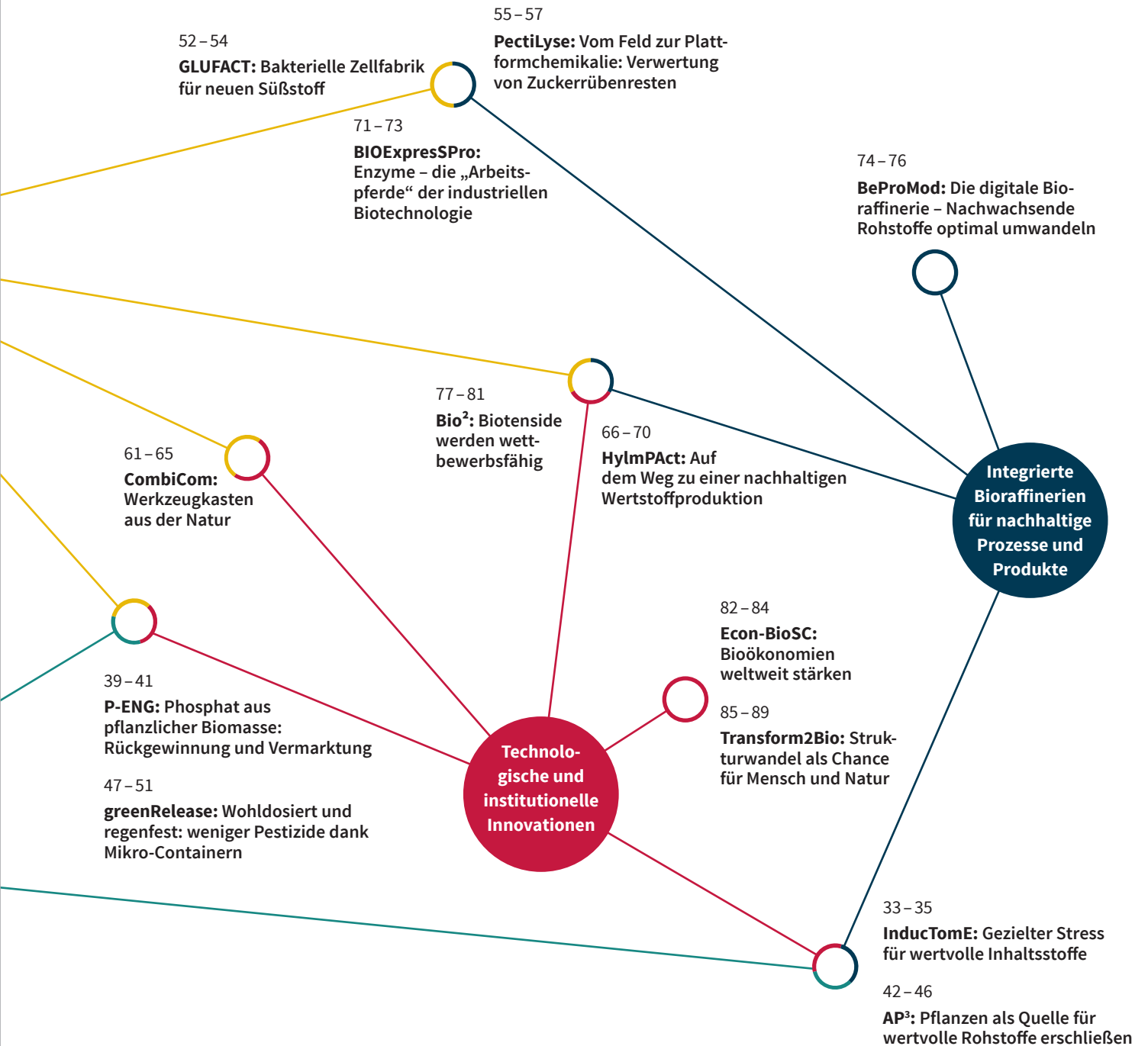
# INHALT

I	<b>Vorworte</b>	3 – 6
II	<b>IM FOKUS</b> <b>Das Bioeconomy Science Center</b>	10 – 13
III	<b>FOKUSTHEMEN UND PROJEKTE DES BIOSC</b>	
	● <b>Smartes Management der Pflanzenproduktion</b>	14 – 16
	● <b>Modulare Biotransformationen zur Herstellung von Wertstoffen</b>	17 – 20
	● <b>Integrierte Bioraffinerien für nachhaltige Prozesse und Produkte</b>	21 – 23
	● <b>Technologische und institutionelle Innovationen als Treiber biobasierter gesellschaftlicher Transformationen</b>	24 – 26
IV	<b>AUSBILDUNG</b> <b>Kann man Forschen für die Bioökonomie lernen?</b>	90 – 91
V	<b>SYNERGIEN IN DER REGION</b> <b>BioökonomieREVIER Rheinland – Modellregion für nachhaltiges Wirtschaften</b>	92 – 93
VI	<b>KOOPERATIONEN UND VERNETZUNG</b> <b>Zusammenarbeit für die Entwicklung der Bioökonomie</b>	94 – 96
VII	<b>IMPRESSUM</b>	98 – 99

8







## Das Bioeconomy Science Center

Die Menschheit steht vor großen Herausforderungen: Klimawandel, knapper werdende Ressourcen und eine wachsende Weltbevölkerung erfordern ein Umdenken und neues, nachhaltigeres Handeln und Wirtschaften als bisher. Diese großen gesellschaftlichen Herausforderungen lassen sich nur durch gemeinsames Handeln von der regionalen bis zur globalen Ebene

bewältigen. Dies haben auch die Vereinten Nationen (UN) erkannt und 2015 die Agenda 2030 verabschiedet, in der siebzehn Zielsetzungen und Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung, die sogenannten Sustainable Development Goals (SDGs, Abbildung unten) formuliert sind. In einem Zeitraum von fünfzehn Jahren sollen diese Zielsetzungen erreicht werden. Die

### ZIELE FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG



Developed in collaboration with TROLLBÄCK COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1212.528.1013  
For queries on usage, contact: dpcampaigns@un.org | Non official translation made by UNRIC Brussels (September 2015)

Zielerreichung erfordert eine große gemeinsame Kraftanstrengung für alle beteiligten Nationen und Akteure, die Generierung und sektoren- und disziplinübergreifende Verknüpfung neuen Wissens und moderner, umweltschonender Technologien, den Schutz und Erhalt natürlicher Ressourcen, eine Umstellung der Rohstoffbasis für die industrielle Produktion sowie vielfältige Maßnahmen für gesellschaftliche Umwandlungen. All das sind Grundprinzipien, die auch der Bioökonomie zugrunde liegen. Die Bioökonomie ist mit dreizehn der siebzehn Nachhaltigkeitsziele eng verknüpft.

Die Herausforderungen für die technologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Transformation zu einem nachhaltigen biobasierten Wirtschaften sind dabei ebenfalls vielfältig und groß. Alle Akteure – Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik – stehen vor neuen Fragestellungen, die nur durch gemeinsame Strategien und Kooperationen zur erforderlichen Transformation führen können. Nur eine nachhaltige Erzeugung gesunder Nahrungsmittel und nachwachsender Rohstoffe, moderne, biobasierte Herstellungsverfahren für hochwertige Produkte und klimaneutrale Energieträger können den notwendigen Transformationsprozess zum Erfolg führen.

Wissenschaftler des Bioeconomy Science Center (BioSC) haben bereits 2008 die Notwendigkeit und die Potenziale der Entwicklung einer nachhaltigen, auf Wissen basierenden Bioökonomie (Knowledge Based Bio-Economy, KBBE) erkannt, deren Konzept 2005 auf europäischer Ebene ihren Ursprung hatte. Die Idee, ein gemeinsames Kompetenzzentrum für Bioökonomieforschung zu gründen, entwickelte sich aufgrund einer breit gefächerten wissenschaftlichen Exzellenz, hoher Synergiepotenziale und Kooperationen in bioökonomie relevanten Forschungsfeldern, die bereits zwischen dem Forschungszentrum Jülich, der



**Pflanzen nehmen eine Schlüsselstellung bei der Etablierung einer nachhaltigen Bioökonomie ein.**

Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn existierten. Nach der Entwicklung eines langfristig ausgelegten Kooperationskonzepts wurde im Herbst 2010 der Gründungsvertrag für das Bioeconomy Science Center unterschrieben; im selben Jahr, in dem die Bundesregierung auch die erste Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 verabschiedete.



**Chemikalien und Materialien werden zukünftig vermehrt auf Grundlage biogener Rohstoffe produziert.**

Die vier Partnerinstitutionen begründeten mit dem BioSC eine institutionen- und disziplinübergreifende Zusammenarbeit in Forschung und Ausbildung für die Transformation zu einer nachhaltigen Bioökonomie, die bis heute einzigartig ist. Der Forschung im BioSC liegt ein systemischer, integrierender Ansatz zugrunde. Das integrierte Gesamtkonzept aus Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung in inter- und transdisziplinären Forscherteams (zum Beispiel Biotechnologen, Pflanzenwissenschaftler, Ingenieure, Ökonomen) sowie die Entwicklung und Nutzung moderner Technologieplattformen bietet einzigartige Voraussetzungen im regionalen Verbund zur Entwicklung biobasierter Herstellungsverfahren und bioökonomischer Konzepte. Das BioSC betreibt Forschung und Ausbildung zu nachhaltiger Pflanzenproduktion für Nahrungs- und Futtermittel, für erneuerbare Rohstoffe und deren molekulare und mikrobielle Umwandlung in hochwertige biobasierte Produkte (zum Beispiel Feinchemikalien, Biopolymere, Pharmazeutika, Enzyme, Proteine, Biokraftstoffe). Darüber hinaus entwickeln Wissenschaftler im BioSC technische Prozesse und integrierte Bioraffineriekonzepte etwa für Mehrfach-, Kreislauf- und Reststoffnutzung und wenden diese in verschiedenen Maßstäben an. In einem weiteren fachlichen Schwerpunkt wird der Bezug von technologischen Innovationen zu Märkten, Politik und Gesellschaft hergestellt und erforscht. Auf unterschied-

lichen Skalen wird untersucht, wie die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen beim Übergang von einer fossilen zu einer biobasierten Wirtschaft so gesteuert und gestaltet werden können, dass sie ökologisch verträglich, technisch möglich und gesellschaftlich akzeptiert sind. Aktuell bilden 67 Mitgliedsinstitute und Lehrstühle (Core Groups) mit circa 1.900 Mitarbeitern aus den vier Einrichtungen den wissenschaftlichen Kern des BioSC.

In dem vom Land Nordrhein-Westfalen seit 2013 in drei Förderphasen geförderten NRW-Strategieprojekt BioSC steht insbesondere die Integration der Forschungsdisziplinen und Themenfelder im Rahmen des systemischen Ansatzes im Vordergrund. In multidisziplinären, institutionsübergreifenden Forschungsprojekten werden konkrete wissenschaftliche Fragestellungen bearbeitet.

In der ersten Förderphase stand das Aufsetzen des BioSC als regionale Forschungsinfrastruktur in NRW und das Identifizieren und disziplinübergreifende Zusammenführen des wissenschaftlichen Potenzials der BioSC Core Groups im Vordergrund. Am Ende der ersten Förderphase wurde eine inhaltliche Fokussierung disziplinübergreifender Forschungsthemen erarbeitet. Daraus sind vier thematische Schwerpunkte definiert worden, die den inhaltlichen Rahmen im Strategieprojekt bilden.

Die vier Fokusthemenfelder sind:

- Smartes Management der Pflanzenproduktion
- Modulare Biotransformationen zur Herstellung von Wertstoffen
- Integrierte Bioraffinerien für nachhaltige Prozesse und Produkte
- Technologische und institutionelle Innovationen als Treiber biobasierter gesellschaftlicher Transformationen

Die Projektformate im NRW-Strategieprojekt BioSC reichen von ein- bis zweijährigen Seed-Fund-Projekten, in denen ganz neue, explorative Projektthemen getestet werden, über dreijährige Boost-Fund-Projekte, in denen bioökonomie-relevante Forschungsansätze aus dem BioSC weiterentwickelt werden, bis hin zu dreijährigen großen, multidisziplinären Verbundprojekten,

den sogenannten FocusLabs, die in der zweiten Förderphase aufgesetzt und von Nachwuchswissenschaftlern koordiniert wurden beziehungsweise werden. Allen Projektformaten ist eines gemeinsam: dem disziplin- und standortübergreifenden, integrierenden Ansatz des BioSC folgend, müssen in Projekten immer Wissenschaftler aus mindestens zwei fachlichen Schwerpunkten und zwei BioSC-Partnereinrichtungen mitwirken. In den Themenkapiteln der Broschüre werden 17 Projekte aus insgesamt 58 Projekten beispielhaft vorgestellt.

Neben einer intensiven Zusammenarbeit der 67 Core Groups spielen Kooperationen mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft im regionalen, nationalen und internationalen Raum eine große Rolle. Die gebündelte wissenschaftliche Stärke und das Innovationspotenzial sowie die etablierte Bioökonomie-Gemeinschaft des BioSC in der Region hat die Entwicklung der Strukturwandelinitiative BioökonomieREVIER maßgeblich befördert. Die Initiative zielt seit ihrer Einrichtung in 2019 darauf ab, im Rheinischen Revier eine Modellregion für ressourceneffizientes,



**Bei Ausstellungen, Wissenschaftsnächten und Bürgerforen findet ein intensiver Austausch mit der Zivilgesellschaft statt.**

nachhaltiges Wirtschaften zu entwickeln (siehe Kapitel V). Das BioSC unterstützt die Initiative durch systemische Forschung und schafft durch seine langfristig angelegte Förderung eine Wissensbasis und Innovationspotenzial für die Entwicklung einer nachhaltigen Bioökonomie in der Region und darüber hinaus.

Die Transformation zu einem ressourcenschonenden, biobasierten Handeln und Wirtschaften erfordert neue Ausbildungskonzepte für Nachwuchs und Weiterbildung in Wirtschaft und Wissenschaft (siehe Kapitel IV) und einen intensiven Dialog mit der Gesellschaft, der etwa durch BioSC-Ausstellungen, Beteiligung an Wissenschaftsnächten und Bürgerforen gelebt wird.

Zehn Jahre nach seiner Gründung hat sich das BioSC zu einem namhaften Kompetenzzentrum für Bioökonomieforschung in Deutschland und Europa entwickelt, in dem zahlreiche lösungsorientierte Innovationsansätze erarbeitet wurden. Seit 2013 sind aus dem NRW-Strategieprojekt BioSC rund 180 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften sowie zahlreiche Patente hervorgegangen. Auch die Ausbildung von jungen Wissenschaftlern mit exzellentem Fachwissen und profunder Bioökonomiesachverstand ist eine Erfolgsgeschichte, die neben Ausbildungsbeiträgen zu lebenslangem Lernen auch zukünftig ein wichtiges Element in der Mission des BioSC darstellen wird.

Das BioSC steht nun an der Schwelle zur dritten Förderphase des NRW-Strategieprojektes BioSC. Themenfelder mit hoher Relevanz für eine integrierte und nachhaltige Bioökonomie werden fortgeführt und weiterentwickelt, um die systemische Perspektive des BioSC für die Bioökonomieforschung umzusetzen. Das BioSC ist für diese Aufgabe gut aufgestellt, um mit regionalen, nationalen und internationalen Partnern in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft die Vision einer nachhaltigen, biobasierten Wirtschaft weiter Wirklichkeit werden zu lassen.

# Smartes Management der Pflanzenproduktion

Bei der Etablierung einer nachhaltigen Bioökonomie nehmen Pflanzen eine Schlüsselstellung ein. Sie müssen die Grundlage für die gesunde Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung liefern und werden darüber hinaus zukünftig als nachwachsende Rohstoffbasis benötigt, um fossile Rohstoffe wie zum Beispiel Erdöl zu ersetzen. Die global für die Landwirtschaft verfügbaren Flächen lassen sich jedoch nicht mehr nennenswert ausweiten. Die Steigerung der pflanzlichen Biomasseproduktion muss auf gleichbleibender Fläche und mit möglichst geringen Umweltbelastungen realisiert werden. Deshalb werden intelligente Lösungsansätze gebraucht, um den Ertrag von Nutzpflanzen zu steigern und dabei die Umwelt zu schonen. Das umfasst die effiziente und sparsame Nutzung von Wasser, Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln, den Schutz der Böden, das Schließen von Nährstoffkreisläufen und die Entwicklung neuer Konzepte für den Pflanzenschutz. Gleichzeitig müssen Nachernteverluste wie das Verrotten von Lebensmitteln erheblich verringert und Pflanzen durch Züchtung an die sich verändernden Klima- und Umweltbedingungen angepasst werden.

In den letzten 15 Jahren wurden mit den Methoden der modernen Pflanzenzüchtung vielfach Pflanzen gezüchtet, die beispielsweise Wasser und Nährstoffe effizienter nutzen können oder resistent gegen Krankheitserreger sind. Die Präzisionslandwirtschaft nutzt Sensoren, um innerhalb einer Ackerfläche genau an den aktuellen Bedarf angepasste Mengen von Dünger, Pflanzenschutzmitteln und Wasser zu verteilen. Bodenkundler untersuchen, wie die Zusammensetzung der Mikroorganismen im Boden das Pflanzenwachstum beeinflusst, und entwickeln gemeinsam mit Landwirten neue bodenschonende Anbaukonzepte. Durch die Entwicklung und Kombination von unterschiedlichen Anbausystemen und Technologien zur zum Beispiel gleichzeitigen Produktion von Energie und Pflanzen auf

einer Fläche (Agrophotovoltaik) können Flächenbedarf und Nutzungskonkurrenzen minimiert werden. Die Kombination der verschiedenen Ansätze und Expertisen ist der Schlüssel für eine leistungsfähige und umweltfreundliche Pflanzenproduktion.

## Forschung im BioSC

In Projekten des BioSC wird bislang zu folgenden Schwerpunkten des Fokusthemensfelds geforscht:

- Entwicklung neuer Pflanzenschutzstrategien unter Anwendung neuer selektiver Wirkstoffe oder Aktivatoren zur Verbesserung von Pflanzenertrag und Pflanzengesundheit.
- Neue Technologienplattformen zur kontrollierten Freisetzung und Applikation von bioaktiven Substanzen in Agrarsystemen, um den Einsatz zum Beispiel von Pestiziden, Fungiziden und Herbiziden signifikant zu reduzieren und Ertragsverluste im Anbau und nach Ernten zu minimieren.
- Identifizierung und Anbau von Pflanzen mit verbesserter Ressourcennutzung, höheren Erträgen und geeigneten reproduzierbaren Eigenschaften für eine stoffliche und energetische Nutzung.
- Rückgewinnung von Phosphat aus Pflanzenresten und Abwässern, um Nährstoffkreisläufe zu schließen.

Die Entwicklungen im Fokusthemensfeld werden durch zwei große Forschungsinfrastrukturen im BioSC unterstützt: a) das Jülicher Pflanzen-Phänotypisierungs-Zentrum (JPPC), das Technologieplattformen zur nichtinvasiven Phänotypisierung von Pflanzen auf Spross-, Wurzel- und Bestandesebene im Hochdurchsatz bereitstellt, sowie b) den Campus Kleinaltendorf, der als modern ausgestattete landwirtschaftliche Versuchsstation der Universität Bonn über eine große Vielfalt an Anbausystemen im Freiland und in Gewächshäusern verfügt.

## BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld

<b>C4-PSH</b> 01/14 – 12/15	C4 Plant Selective Herbicides: A New Approach to Combat C4 Weeds in Arable Crops	Biochemische Pflanzenphysiologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU) Systemische Mikrobiologie, Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>OrCaCel</b> 07/14 – 09/16	OrganoCat plant & pulping combinations for the full valorization of lignocellulose from perennial plants from marginal land	Botanik und Molekulare Genetik, Technische und Petrochemie (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>EtMeD</b> 08/14 – 07/15	Development of an ethylene measuring device for ethylene receptor characterization of plants	Bioverfahrenstechnik (RWTH) Biochemische Pflanzenphysiologie (HHU)
<b>MisQual</b> 11/14 – 12/15	Genotype and environment as driving factors for quality of lignocelluloses from Miscanthus as raw material for industry	Nachwachsende Rohstoffe (U Bonn) Mikrobielle Genetik, Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)
<b>GreenGel</b> 11/14 – 12/15	Bifunctional Nanogel-based Fertilizers for Controlled Nutrition of Plants	Biotechnologie, Funktionale und Interaktive Polymere (RWTH) Pflanzenernährung (U Bonn)
<b>LIPANO</b> 01/15 – 12/15	Glucosinolate break-down products as modifiers of soil fungal lipids, protein profiles and allelopathy: Impacts on nodulation, mycorrhiza and growth of Fabaceae	Biotechnologie der Pflanzen (U Bonn) Molekulare Enzymtechnologie (HHU)
<b>P-ENG</b> 01/15 – 12/16	Efficient phosphate recovery from agro waste streams by enzyme, strain and process engineering	Mikrobiologie, Biotechnologie (RWTH) • Systembiotechnologie (FZJ) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>NovoSurf</b> 04/15 – 03/16	Identification of novel natural microbial surfactants	Molekulare Phytomedizin (U Bonn) Mikrobiologie (RWTH)
<b>BiFuProts</b> 04/15 – 06/17	Bifunctional proteins for plant protection	Biotechnologie, Pflanzenphysiologie (RWTH) Biochemie I (HHU) Gartenbauwissenschaften (U Bonn)
<b>PhytaPhoS</b> 04/15 – 03/18	Optimizing the Phosphorus Cycle in the Sugar Beet Production Process by Phytase Supplement	Biotechnologie (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>RIPE</b> 10/15 – 12/17	Ripening delay of climacteric fruits by peptides	Biochemische Pflanzenphysiologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU) Biotechnologie, Funktionale und interaktive Polymere (RWTH) Gartenbauwissenschaften (U Bonn)
<b>AlgalFertilizer</b> 11/15 – 10/17	Algae delivering waste phosphorus to soil and crops	Quantitative und Theoretische Biologie, Biochemie der Pflanzen (HHU) Pflanzenwissenschaften, Agrosphäre (FZJ) Bodenwissenschaften (U Bonn)
<b>PrimACs</b> 11/15 – 10/17	Priming-Active Compounds for Plant Protection	Pflanzenphysiologie, Bioverfahrenstechnik (RWTH) Bioorganische Chemie (HHU)



## BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld

<b>InducTomE</b> 11/15 – 12/17	Induction of secondary metabolites in tomato by-products for extraction and economic evaluation of the model process	Botanik und Molekulare Genetik, Fluidverfahrenstechnik (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ) Gartenbauwissenschaften, Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>SPREAD</b> 11/15 – 10/18	Silphium Perfoliatum – Resource Evaluation And Development	Entwicklungs- und Molekularbiologie der Pflanzen (HHU) Nachwachsende Rohstoffe (U Bonn) Enzymprozesstechnik (RWTH)
<b>PlaMint</b> 11/15 – 10/18	Investigate plant-microbe interactions to improve plant health and productivity	Chemical Signalling (U Bonn) Mikrobiologie (HHU) Pflanzenphysiologie, Botanik und Molekulare Genetik (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>AP<sup>3</sup></b> 04/17 – 12/20	Advanced Pulping for Perennial Plants: A holistic and sustainable integrated lignocellulose biorefinery concept	Pflanzenwissenschaften (FZJ) Botanik und Molekulare Genetik, Technische und Petrochemie, Fluidverfahrenstechnik, Systemverfahrenstechnik (RWTH) Entwicklungs- und Molekularbiologie der Pflanzen, Pflanzliche Zellbiologie und Biotechnologie (HHU) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>greenRelease</b> 01/18 – 06/21	GreenRelease for Plant Health	Biotechnologie, Pflanzenphysiologie, Funktionale und interaktive Polymere (RWTH) Technologie- und Innovationsmanagement, Gartenbauwissenschaften, Molekularbiologie der Rhizosphäre (U Bonn) Biochemische Pflanzenphysiologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>QuantiP</b> 11/18 – 12/19	P-quantification in vivo and in vitro by Raman spectroscopy and NMR	Biotechnologie (RWTH) Pflanzenwissenschaften, Analytik (FZJ)
<b>iBiomass</b> 11/18 – 12/19	Improve maize biomass for processing applying OrganoCat technology	Mikrobiologie, Pflanzliche Zellbiologie und Biotechnologie (HHU) Technische und Petrochemie (RWTH)
<b>PepUse</b> 09/19 – 02/21	Peptide adhesion promoters for user centered plant health applications	Biotechnologie (RWTH) Physikalische Biologie (HHU) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>TaiLead</b> 08/20 – 10/21	Lead verification of tailored prodiginine derivatives	Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Bioorganische Chemie (HHU) Molekulare Phytomedizin (U Bonn)



## Modulare Biotransformationen zur Herstellung von Wertstoffen

Die Produktion von Chemikalien und Materialien in einer nachhaltigen Bioökonomie ist durch neue Prozessketten gekennzeichnet, in denen die Biokatalyse mit Mikroorganismen und Enzymen eine wichtige Rolle spielt. Biogene Rohstoffe umfassen ein weites Spektrum von mehrjährigen Biomassepflanzen bis hin zu landwirtschaftlichen Abfallströmen. Dazu kommen vermehrt nichtbiogene Kohlenstoffquellen wie CO<sub>2</sub> oder kommunale Abfallströme, wie beispielsweise Kunststoffabfälle. Um diesem breiten Spektrum an Ausgangsstoffen gerecht zu werden, muss das konventionelle „Ein Rohstoff – ein Produkt“-Konzept zu flexiblen und modularen „Multi-Rohstoff – Multi-Produkt“-Prozessketten weiterentwickelt werden, in denen Chemokatalyse und Biokatalyse kombiniert werden.

Die synthetische Biologie als Impulsgeber für die molekulare Biotechnologie liefert vielfältige neue Konzepte, um diesen veränderten Anforderungen zu begegnen. Eine der größten Herausforderungen besteht darin, die daraus resultierenden Produktionsprozesse und Produkte für die Praxis nutzbar und konkurrenzfähig gegenüber vorhandenen erdölbasierten Verfahren zu machen. Dabei bestehen die größten Erfolgsaussichten im Bereich höherwertiger Stoffe mit zum Teil neuen Funktionalitäten, das heißt Feinchemikalien, Naturstoffe oder Proteine. Da diese Stoffklassen komplexe Synthesewege aufweisen, sind modulare mehrschrittige Verfahren am erfolgversprechendsten. Auch bei der Nutzung von Nebenströmen bioökonomischer Prozessketten können erhebliche zusätzliche Wertschöpfungen erreicht werden, wenn neben den Hauptprodukten weitere wertvolle Feinchemikalien oder pharmazeutisch nutzbare Stoffe gewonnen werden können.

### Forschung im BioSC

In Projekten des BioSC wird bislang zu folgenden Schwerpunkten des Fokusthemenfelds geforscht:

- Hybride Verfahren, die Ganzzelltransformationen, enzymatische und chemische Transformationen modular kombinieren und dabei maßgeschneiderte Bio- und Chemokatalysatoren einsetzen.
- Identifizierung natürlich vorkommender bioaktiver Substanzen und ihrer Synthesewege sowie Modellierung neuer bioaktiver Substanzen und Synthesewege mit Methoden der Bioinformatik.
- Etablierung von Synthesewegen für bioaktive Substanzen, insbesondere für sekundäre Stoffwechselprodukte, sowie von synthetischen Enzymkaskaden für die flexible modulare Synthese von Feinchemikalien.
- Entwicklung synthetischer Mikrokompartimente und Enzym-Immobilisierung für den Umgang mit gering konzentrierten, unlöslichen, instabilen oder toxischen Zwischenverbindungen.
- Bereitstellung systembiologisch gut charakterisierter und genetisch zugänglicher Plattformorganismen (Chassis-Organismen, Mikrobielle und pflanzliche Zellfabriken).

Zwei große Forschungsinfrastrukturen unterstützen die Entwicklungen im Fokusthemenfeld: a) das am Forschungszentrum Jülich aufgebaute „Microbial Phenotyping Center“ (JMPC), das die detaillierte quantitative Charakterisierung von Bioprozessen auf allen Ebenen der Omics-Methoden, der Einzelzellanalyse und der Prozesscharakterisierung ermöglicht, und b) die in Düsseldorf, Jülich und Aachen vorhandenen Plattformen für Bioanalytik und Bioinformatik, die eine Bearbeitung der Themen mit modernsten Methoden erlauben.

BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld		
<b>CoSens</b> 01/14 – 12/14	Genetically encoded biosensors for dynamic and quantitative sensing of metabolic cofactors in subcellular compartments	Chemical Signalling (U Bonn) Molekulare Enzymtechnologie, Biochemie der Pflanzen (HHU)
<b>UstiLyse</b> 01/14 – 12/14	Improving plant biomass conversion by Ustilago maydis for sustainable production of platform chemicals	Mikrobiologie (HHU) Mikrobiologie (RWTH)
<b>PNP-EXPRESS</b> 01/14 – 12/15	Discovery and microbial production of natural products from plants	Systemische Mikrobiologie (FZJ) Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)
<b>BIOExpresS-Pro</b> 01/14 – 12/16	Research and technology platform for the identification production, secretion and optimization of enzymes	Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Systembiotechnologie, Systemische Mikrobiologie (FZJ) Botanik und Molekulare Genetik, Biotechnologie (RWTH)
<b>GLUFACT</b> 01/14 – 12/16	Gluconobacter-Factory: Strains and processes for stereoselective oxidative conversion of renewable carbon sources to industrial products	Systemische Mikrobiologie (FZJ) Botanik und Molekulare Genetik, Bioverfahrenstechnik (RWTH) Mikrobiologie und Biotechnologie (U Bonn)
<b>FlowCom</b> 07/14 – 09/15	Everything in Flow – New Compartments for Cascade Reactions	Physikalische Chemie, Enzymprozess-technik (RWTH) Bioorganische Chemie (HHU)
<b>MoRe-Plants</b> 07/14 – 06/16	Towards Alkaloids: Monooxygenases from Plants in Reaction Cascades	Bioorganische Chemie, Biochemie II (HHU) Bioverfahrenstechnik, Biotechnologie, Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)
<b>GreenGel</b> 11/14 – 12/15	Bifunctional Nanogel-based Fertilizers for Controlled Nutrition of Plants	Biotechnologie, Funktionale und interaktive Polymere (RWTH) Pflanzenernährung (U Bonn)
<b>BioBreak</b> 11/14 – 12/16	Enzymes for Biomass Breakdown	Molekulare Enzymtechnologie, Biochemie I (HHU) Enzymprozess-technik, Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>TPOT</b> 01/15 – 12/15	A proof of concept for an E. coli hydroxylation platform with efficient terpene/terpenoid translocation through the outer membrane	Biotechnologie, Botanik und Molekulare Genetik (RWTH) Biochemie II (HHU)
<b>P-ENG</b> 01/15 – 12/16	Efficient phosphate recovery from agro waste streams by enzyme, strain and process engineering	Mikrobiologie, Biotechnologie (RWTH) Systembiotechnologie (FZJ) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>CatIBs</b> 01/15 – 12/17	Catalytically active inclusion bodies: New carrier-free enzyme immobilisates for biocatalysis	Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Bioverfahrenstechnik (RWTH) Systembiotechnologie (FZJ)
<b>UstiOpt</b> 03/15 – 03/16	Defining optimum growth conditions for Ustilago maydis to increase the production of recombinant proteins	Mikrobiologie (HHU) Bioverfahrenstechnik (RWTH)

## BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld

<b>DiPro</b> 04/15 – 03/16	Dirigent Proteins in Bioeconomy	Bioorganische Chemie (HHU) Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)
<b>ROXENSE</b> 04/15 – 03/16	Efficient Redox sensing and engineering for optimization of biocatalysis	Mikrobiologie (RWTH) Chemical Signalling (U Bonn)
<b>MoniCon</b> 04/15 – 03/16	Establishing online-methodology to monitor growth of single species in fungal consortia	Bioverfahrenstechnik (RWTH) Mikrobiologie (HHU)
<b>BiFuProts</b> 04/15 – 06/17	Bifunctional proteins for plant protection	Biotechnologie, Pflanzenphysiologie (RWTH) Biochemie I (HHU) Gartenbauwissenschaften (U Bonn)
<b>VariSurf</b> 09/15 – 11/16	Production of glycolipid variants for industrial application by smart genetic engineering	Molekulare Enzymtechnologie, Mikrobiologie (HHU) Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>BioSAF</b> 10/15 – 12/16	Carotenoid cleaving enzymes for efficient biosynthesis of Saffron	Biotechnologie, Botanik und Molekulare Genetik (RWTH) Molekulare Enzymtechnologie (HHU)
<b>RIPE</b> 10/15 – 12/17	Ripening delay of climatic fruits by peptides	Biochemische Pflanzenphysiologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU) Biotechnologie, Funktionale und interaktive Polymere, (RWTH) Gartenbauwissenschaften (U Bonn)
<b>PrimACs</b> 11/15 – 10/17	Priming-Active Compounds for Plant Protection	Pflanzenphysiologie, Bioverfahrenstechnik (RWTH) Bioorganische Chemie (HHU)
<b>PectiLyse</b> 11/15 – 10/17	Activation of intrinsic enzymes for degradation of plant biomass side-streams	Mikrobiologie (HHU) Mikrobiologie, Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>BioCaPS</b> 01/16 – 12/16	Structural insights of biohybrid catalysts for Polyactide synthesis	Metallorganische Chemie, Biotechnologie (RWTH) Biochemische Pflanzenphysiologie, Physikalische Biologie (HHU)
<b>HiQFlux</b> 11/16 – 12/17	Quantifying metabolic network operation in compartmentalized organisms – yeast as a eucaryotic model	Mikrobiologie (RWTH) Systembiotechnologie (FZJ)
<b>CombiCom</b> 05/17 – 12/20	Combinatorial creation of structural diversity for novel high-value compounds	Molekulare Enzymtechnologie, Mikrobiologie, Synthetische Biologie, Bioorganische Chemie (HHU) Biotechnologie, Bioverfahrenstechnik (RWTH), Pflanzenwissenschaften (FZJ) Molekulare Phytomedizin, Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>Bio<sup>2</sup></b> 05/17 – 12/20	Integration of next generation biosurfactant production into biorefinery processes	Mikrobiologie, Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Bioverfahrenstechnik, Mikrobiologie, Fluidverfahrenstechnik, Chemische Verfahrenstechnik (RWTH) Systemforschung und Technologische Entwicklung (FZJ)



## BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld

<b>greenRelease</b> 01/18 – 06/21	GreenRelease for Plant Health	Biotechnologie, Pflanzenphysiologie, Funktionale und interaktive Polymere (RWTH) Technologie- und Innovationsmanagement, Gartenbauwissenschaften, Molekularbiologie der Rhizosphäre (U Bonn) Biochemische Pflanzenphysiologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>HylmPAct</b> 01/18 – 09/21	Hybrid processes for Important Precursor and Active pharmaceutical ingredient	Systembiotechnologie (FZJ) Bioorganische Chemie (HHU) Fluidverfahrenstechnik, Operations Management (RWTH)
<b>HySyn</b> 10/18 – 12/19	Fatty acid decarboxylases for hydrocarbon synthesis	Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Botanik und Molekulare Genetik (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>R2HPBio</b> 10/18 – 12/20	Renewables to high-performance bioplastics through sustainable production ways	Bioanorganische Chemie, Fluidverfahrenstechnik (RWTH) Makromolekulare Chemie (HHU)
<b>XyloSens</b> 10/18 – 03/21	Development of a xylose sensor toolbox for microbial process monitoring and control	Systembiotechnologie (FZJ) Physikalische Biologie (HHU) Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>QuantiP</b> 11/18 – 12/19	P-quantification in vivo and in vitro by Raman spectroscopy and NMR	Biotechnologie (RWTH) Pflanzenwissenschaften, Analytik (FZJ)
<b>GlycoHype</b> 09/19 – 10/20	Synthesis of Glycosides by Hyperthermophilic Glycosidases	Biotechnologie und Biomaterialien, Bioverfahrenstechnik (RWTH) Molekulare Enzymtechnologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU)
<b>PepUse</b> 09/19 – 02/21	Peptide adhesion promoters for user centered plant health applications	Biotechnologie (RWTH) Physikalische Biologie (HHU) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>HaloEnz</b> 09/19 – 08/21	Enzymatic halogenation: Enzyme identification, characterization, application	Medizinische und Pharmazeutische Chemie, Bioorganische Chemie (HHU) Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)
<b>TailLead</b> 08/20 – 10/21	Lead verification of tailored prodiginine derivatives	Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Bioorganische Chemie (HHU) Molekulare Phytomedizin (U Bonn)
<b>DesignR</b> 08/20 – 10/21	Tailoring Biosurfactants – Production of Designer Rhamnolipids	Bioverfahrenstechnik (RWTH) Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Fluidverfahrenstechnik (RWTH)

# Integrierte Bioraffinerien für nachhaltige Prozesse und Produkte

Die Entwicklung von Bioraffineriekonzepten und -systemen, in denen Bereitstellung von Biomasse und deren Umwandlung in Produkte integriert sind, stellen ein Kernelement für die Transformation von einer erdölbasierten Ökonomie zur Bioökonomie dar. Dabei müssen viele verschiedene biobasierte Rohstoffe nutzbar gemacht werden: Eigens angebaute Pflanzen für energetische beziehungsweise stoffliche Nutzung, die gegebenenfalls durch Züchtung für die spätere Nutzung verbessert worden sind, aquatische Pflanzen, Abfallstoffe beziehungsweise Nebenströme aus der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie und Forstwirtschaft sowie Reststoffe aus der Papierindustrie. Bei der Verwendung von Energie- beziehungsweise Stoffpflanzen sind mehrjährige Pflanzen möglicherweise zu bevorzugen, wenn diese auf ansonsten nicht genutzten, für die landwirtschaftliche Gewinnung von Nahrungsmitteln ungeeigneten mageren Böden entsprechende Erträge liefern können.

Eine Bioraffinerie muss nicht nur eine breitere und variabelere Spanne an Edukten verarbeiten können als konventionelle Rohölraffinerien. Vielmehr müssen völlig neue Prozesse und Verfahren entwickelt werden. Während in etablierten petrochemischen Verfahren die Rohstoffe in organischen Lösungsmitteln bei oft hohen Temperaturen umgewandelt werden, erfordern die Bestandteile von Biomasse Umwandlungsprozesse bei niedrigen Temperaturen in elektrolythaltigen Lösungsmitteln. Biotechnologische Prozesse zur Herstellung von Plattformchemikalien benötigen große Mengen an Hilfsstoffen und Wasser. Um ein Skalieren in den Produktionsmaßstab zu ermöglichen, werden Techniken zur möglichst vollständigen Rückführung von Lösungsmitteln, Katalysatoren und Prozesswasser innerhalb einer Bioraffinerie benötigt. Für Reststoffe aus der verarbeiteten Biomasse wie Mineralien oder organische Reststoffe müssen Möglichkei-

ten für eine Rückführung in Stoffkreisläufe geschaffen werden beispielsweise als landwirtschaftlicher Dünger.

## Forschung im BioSC

In Projekten des BioSC wird bislang zu folgenden Schwerpunkten des Fokusthemenfelds geforscht:

- Entwicklung und Optimierung chemischer Verfahren zum Aufschluss lignocellulosehaltiger Biomasse.
- Identifikation geeigneter Enzyme für den Aufschluss lignocellulosehaltiger Biomasse und Entwicklung von Produktionsplattformen zu ihrer kostengünstigen Herstellung.
- Mikrobielle Erschließung von Zuckerrübenresten.
- Verfahren zur schonenden Abtrennung wertvoller pflanzlicher Inhaltsstoffe wie Lignin oder Sekundärmetabolite.
- Integrierte Prozesse zur Produktion und Aufreinigung von Wertstoffen unter Verwendung neuer Trenntechnologien.
- Computergestützte Modellierung von Bioraffinerieprozessen.

Die Entwicklungen im Fokusthemenfeld werden durch die Forschungsbioraffinerie NGP<sup>2</sup> der RWTH Aachen unterstützt. Das flexible, modulare Konzept der Bioraffinerie NGP<sup>2</sup> ermöglicht den Einsatz diverser Biomassequellen und Reststoffströme wie auch das Abtrennen wertvoller pflanzlicher Inhaltsstoffe und die Rückführung von Lösungsmitteln und Hilfsstoffen. Dadurch wird die Grundlage für eine techno-ökonomische Analyse geschaffen, die die Basis für die Bewertung von möglichen Geschäftsmodellen darstellt.

<b>BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld</b>		
<b>UstiLyse</b> 01/14 – 12/14	Improving plant biomass conversion by <i>Ustilago maydis</i> for sustainable production of platform chemicals	Mikrobiologie (HHU) Mikrobiologie (RWTH)
<b>EnZIP</b> 01/14 – 12/15	Enzymatische Zellwandmodifikation in Pflanzen zur verbesserten Biomassenutzung	Molekulare Biotechnologie, Botanik und Molekulare Genetik (RWTH) Biochemie II (HHU) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>GLUFACT</b> 01/14 – 12/16	Gluconobacter-Factory: Strains and processes for stereoselective oxidative conversion of renewable carbon sources to industrial products	Systemische Mikrobiologie (FZJ) Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)
<b>BIOExpresS-Pro</b> 01/14 – 12/16	Research and technology platform for the identification, production, secretion and optimization of enzymes	Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Systembiotechnologie, Systemische Mikrobiologie (FZJ) Botanik und Molekulare Genetik, Biotechnologie (RWTH)
<b>OrCaCel</b> 07/14 – 09/16	OrganoCat plant & pulping combinations for the full valorization of lignocellulose from perennial plants from marginal land	Botanik und Molekulare Genetik, Technische und Petrolchemie (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>BEProMod</b> 07/14 – 06/17	Incremental multi-scale and multi-disciplinary Modeling of Processes in Bioeconomy	Systembiotechnologie (FZJ) Systemverfahrenstechnik, Software and Tools for Computational Engineering (RWTH)
<b>BioBreak</b> 11/14 – 12/16	Enzymes for Biomass Breakdown	Molekulare Enzymtechnologie, Biochemie I (HHU) Enzymprozesstechnik, Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>MoniCon</b> 04/15 – 03/16	Establishing online-methodology to monitor growth of single species in fungal consortia	Bioverfahrenstechnik (RWTH) Mikrobiologie (HHU)
<b>PectiLyse</b> 11/15 – 10/17	Activation of intrinsic enzymes for degradation of plant biomass side-streams	Mikrobiologie (HHU) Mikrobiologie, Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>InducTomE</b> 11/15 – 12/17	Induction of secondary metabolites in tomato by-products for extraction and economic evaluation of the model process	Botanik und Molekulare Genetik, Fluidverfahrenstechnik (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ) Gartenbauwissenschaften, Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>SPREAD</b> 11/15 – 10/18	Silphium Perfoliatum – Resource Evaluation And Development	Entwicklungs- und Molekularbiologie der Pflanzen (HHU) Nachwachsende Rohstoffe (U Bonn) Enzymprozesstechnik (RWTH)
<b>MetEvo</b> 01/16 – 12/16	Metabolic evolution of microorganisms for the efficient utilization of carbon sources	Bioverfahrenstechnik (RWTH) Systemische Mikrobiologie (FZJ)
<b>AquaPro</b> 04/16 – 03/17	Using invasive alien aquatic plant biomass for bioenergy production	Biochemie der Pflanzen (HHU) Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>BioDeg</b> 12/16 – 12/17	Boosting plant biomass degradation by combined use of lignin- and cellulose-degrading enzymes	Biochemie II (HHU) Botanik und Molekulare Genetik (RWTH)



## BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld

<b>AP<sup>3</sup></b> 04/17 – 12/20	Advanced Pulping for Perennial Plants: A holistic and sustainable integrated lignocellulose biorefinery concept	Pflanzenwissenschaften (FZJ) Botanik und Molekulare Genetik, Technische und Petrochemie, Fluidverfahrenstechnik, Systemverfahrenstechnik, Technologie- und Innovationsmanagement (RWTH) Entwicklungs- und Molekularbiologie der Pflanzen, Pflanzliche Zellbiologie und Biotechnologie (HHU)
<b>Bio<sup>2</sup></b> 05/17 – 12/20	Integration of next generation biosurfactant production into biorefinery processes	Bioverfahrenstechnik, Mikrobiologie, Fluidverfahrenstechnik, Chemische Verfahrenstechnik (RWTH) Mikrobiologie, Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Systemforschung und Technologische Entwicklung (FZJ)
<b>HylmPAct</b> 01/18 – 09/21	Hybrid processes for Important Precursor and Active pharmaceutical ingredient	Systembiotechnologie (FZJ) Bioorganische Chemie (HHU) Fluidverfahrenstechnik, Operations Management (RWTH)
<b>XyloSens</b> 10/18 – 03/21	Development of a xylose sensor toolbox for microbial process monitoring and control	Systembiotechnologie (FZJ) Physikalische Biologie (HHU) Bioverfahrenstechnik (RWTH)
<b>iBiomass</b> 11/18 – 12/19	Improve maize biomass for processing applying OrganoCat technology	Mikrobiologie, Pflanzliche Zellbiologie und Biotechnologie (HHU) Technische und Petrochemie (RWTH)
<b>Lignin2Value</b> 09/19 – 02/21	Valorization of lignin from agricultural residues for integrated biorefinery	Biochemie II (HHU) Pflanzenwissenschaften, Systembiotechnologie (FZJ)
<b>DesignR</b> 08/20 – 10/21	Tailoring Biosurfactants – Production of Designer Rhamnolipids	Bioverfahrenstechnik (RWTH) Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Fluidverfahrenstechnik (RWTH)
<b>LIFT</b> 07/20 – 6/21	Lignin fractionation and separation to produce different technical lignins	Pflanzenwissenschaften (FZJ) Fluidverfahrenstechnik (RWTH)

# Technologische und institutionelle Innovationen als Treiber biobasierter gesellschaftlicher Transformationen

Das Ziel einer ökonomisch, ökologisch und sozial nachhaltigen Bioökonomie ist es, den Wohlstand heutiger und zukünftiger Generationen innerhalb der planetaren Grenzen zu sichern. Das wird nur mit umfassenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Veränderungen möglich sein. Neue Güter müssen mit neuen Rohstoffen und Verfahren produziert werden, aber das kann nur gelingen, wenn sie auch nachgefragt und gesellschaftlich akzeptiert werden. Der Übergang von einer fossilbasierten zu einer biobasierten Wirtschaft wird sich nur mit erheblichen Veränderungen etwa in Konsummustern, Wertschöpfungsnetzwerken, Geschäftsmodellen, Infrastrukturen und regulatorischen Rahmenbedingungen vollziehen.

Technologische und institutionelle Innovationen sind wesentliche Treiber solcher Transformationsprozesse. Sie müssen jedoch begleitet werden von der Analyse von möglichen Zielkonflikten wie Ernährung versus stoffliche Nutzung von Pflanzen, von der Analyse der Wettbewerbsfähigkeit neuer Produkte gegenüber etablierten erdölbasierten Alternativen und von Untersuchungen zur gesellschaftlichen Akzeptanz neuer Technologien. So können systematisch Transformationspfade identifiziert werden, die zugleich (a) aus Nachhaltigkeitssicht wünschenswert, (b) aus techno-ökonomischer Sicht möglich und (c) aus gesellschaftlicher Sicht akzeptabel sind.

## Forschung im BioSC

In Projekten des BioSC wird bislang zu folgenden Schwerpunkten des Fokusthemensfelds geforscht:

- Märkte in der Bioökonomie: Welche gesellschaftlichen Bedürfnisse und Herausforderungen bestehen heute und in der Zukunft? Wie kann die Entwicklung neuer Technologien mit den Bedarfen und Märkten in Einklang gebracht werden?
- Innovation und Technologietransfer: Welche Faktoren fördern oder hemmen Innovationen? Wie lassen sich neue Schlüsseltechnologien frühzeitig erkennen? Was sind die Potenziale und Risiken verschiedener Anwendungsbereiche von Biomasse?
- Wertschöpfungsketten: Wie können bestehende Industriesektoren und Wertschöpfungsketten neu vernetzt werden, so dass neue Technologien Eingang finden? Welche Faktoren fördern oder hemmen die Entstehung neuer Wertschöpfungsketten?
- Nachhaltigkeit: Wie werden Nutzen und Risiken neuer Technologien wie der synthetischen Biologie gesellschaftlich wahrgenommen? Wie können Zielkonflikte wie Nutzungskonkurrenz entschärft werden? Wie wirken sich regionale Bioökonomiestrategien und unterschiedliche regulatorische Rahmenbedingungen auf die Entwicklung regionaler Bioökonomien aus?

Im BioSC sind Kompetenzen und wissenschaftliche Expertise der Agrarökonomie, der Wirtschaftswissenschaften, Politikwissenschaft, wirtschaftlicher Entwicklung, Verbraucherpsychologie und sozio-technischer Systemanalyse vorhanden. Deren Bündelung und Integration mit naturwissenschaftlich-technischer Kompetenz ermöglicht eine integrierende, systematische Erarbeitung von System- und Transformationskonzepten für die Implementierung einer in allen drei Dimensionen nachhaltigen Bioökonomie in regionalen und globalen Ansätzen.



<b>BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld</b>		
<b>Econ-BioSC</b> 03/15 – 02/16	Biomass flows and technological innovation win the bioeconomy: A global scenario analysis	Ökonomik nachhaltiger Landnutzung und Bioökonomie, Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>P-ENG</b> 01/15 – 12/16	Efficient phosphate recovery from agro waste streams by enzyme, strain and process engineering	Mikrobiologie, Biotechnologie (RWTH) Systembiotechnologie (FZJ) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>InducTomE</b> 11/15 – 12/17	Induction of secondary metabolites in tomato by-products for extraction and economic evaluation of the model process	Botanik und Molekulare Genetik, Fluidverfahrenstechnik (RWTH) Pflanzenwissenschaften (FZJ) Gartenbauwissenschaften, Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>AP<sup>3</sup></b> 04/17 – 12/20	Advanced Pulping for Perennial Plants: A holistic and sustainable integrated lignocellulose biorefinery concept	Pflanzenwissenschaften (FZJ) Botanik und Molekulare Genetik, Technische und Petrochemie, Fluidverfahrenstechnik, Systemverfahrenstechnik, Technologie- und Innovationsmanagement (RWTH) Entwicklungs- und Molekularbiologie der Pflanzen, Pflanzliche Zellbiologie und Biotechnologie (HHU)
<b>CombiCom</b> 05/17 – 12/20	Combinatorial creation of structural diversity for novel high-value compounds	Molekulare Enzymtechnologie, Mikrobiologie, Synthetische Biologie, Bioorganische Chemie (HHU) Biotechnologie, Bioverfahrenstechnik (RWTH) Molekulare Phytomedizin, Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>Bio<sup>2</sup></b> 05/17 – 12/20	Integration of next generation biosurfactant production into biorefinery processes	Bioverfahrenstechnik, Mikrobiologie, Fluidverfahrenstechnik, Chemische Verfahrenstechnik (RWTH) Mikrobiologie, Molekulare Enzymtechnologie (HHU) Systemforschung und Technologische Entwicklung (FZJ)
<b>greenRelease</b> 01/18 – 06/21	GreenRelease for Plant Health	Biotechnologie, Pflanzenphysiologie, Funktionale und interaktive Polymere (RWTH), Technologie- und Innovationsmanagement, Gartenbauwissenschaften, Molekularbiologie der Rhizosphäre (U Bonn) Biochemische Pflanzenphysiologie, Pharmazeutische und Medizinische Chemie (HHU) Pflanzenwissenschaften (FZJ)
<b>HylmPAct</b> 01/18 – 09/21	Hybrid processes for Important Precursor and Active pharmaceutical ingredient	Systembiotechnologie (FZJ) Bioorganische Chemie (HHU) Fluidverfahrenstechnik, Operations Management (RWTH)



## BioSC-Forschungsprojekte im Fokusthemenfeld

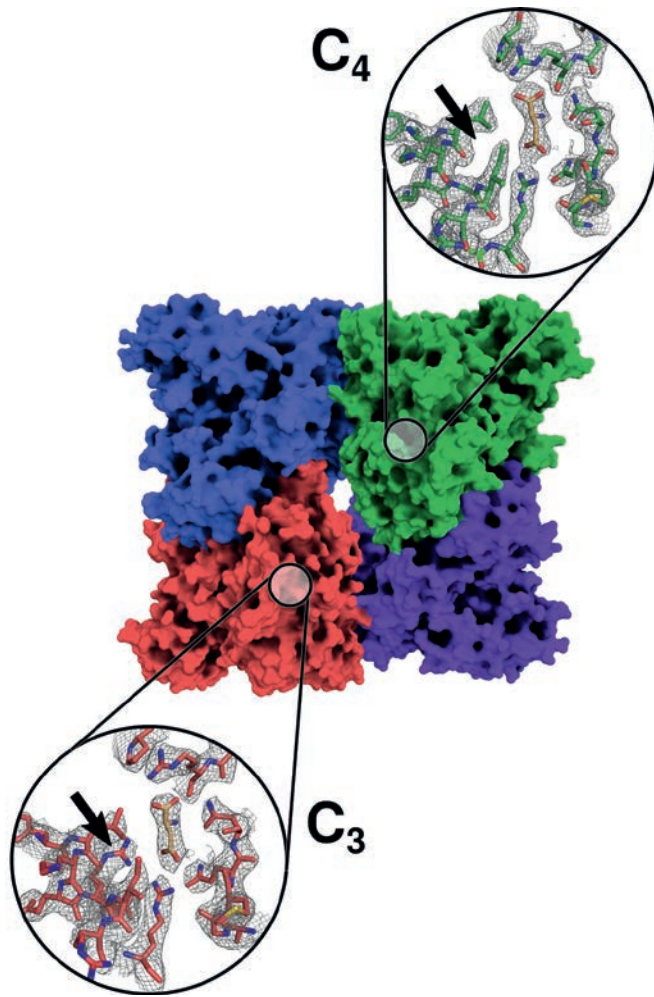
<b>PepUse</b> 09/19 – 02/21	Peptide adhesion promoters for user centered plant health applications	Biotechnologie (RWTH) Physikalische Biologie (HHU) Technologie- und Innovationsmanagement (U Bonn)
<b>GreenToxiCo-nomy</b> 09/19 – 08/21	Green Toxicology for a Green Bioeconomy	Umweltforschung, Mikrobiologie, Funktionale und interaktive Polymere (RWTH) Mikrobiologie (HHU)
<b>Transform2Bio</b> 09/19 – 08/22	Integrated Transformation Processes and their Regional Implementations: Structural Change from Fossil Economy to Bioeconomy	Systemforschung und Technologische Entwicklung, Pflanzenwissenschaften (FZJ) Ökonomik nachhaltiger Landnutzung und Bioökonomie, Ökonomischer und technologischer Wandel, Ökonomische Modellierung von Agrarsystemen, Technologie- und Innovationsmanagement, Marktforschung der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Wirtschafts- und Agrarpolitik, Produktionsökonomik (U Bonn) Operations Management (RWTH)

## Naturstoff gegen Unkräuter

**Ein kleiner, aber feiner Unterschied zwischen dem Photosyntheseweg vieler Nutzpflanzen und dem von Unkräutern, die deren Ertrag mindern können, öffnet Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des BioSC die Tür zu einem selektiven und nachhaltigen Pflanzenschutz. Schlüsselemente in diesem Konzept sind ein Enzym, das wesentlich an der Biomasseproduktion vieler Unkräuter beteiligt ist, und ein Naturstoff aus Holzabfällen, der dieses hemmt.**

Die heimische und weltweite Landwirtschaft wird in den kommenden Jahren vor vielfältigen Herausforderungen stehen, um die nachhaltige Versorgung der Bevölkerung mit Lebensmitteln und anderen Agrarprodukten zu gewährleisten. Hierzu zählen unter anderem die zunehmende Verknappung der Produktionsfaktoren Boden und Wasser, die starke Abhängigkeit der Ernterträge von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie der zunehmende Klimawandel. Aktuelle Klimamodelle prognostizieren immer längere Dürreperioden und höhere Durchschnittstemperaturen im Sommer, der Hauptvegetationsperiode unserer Landwirtschaft.





### 3D-Struktur des pflanzlichen Schlüsselenzyms Phosphoenolpyruvat-Carboxylase.

Der kreisförmige Einschub auf beiden Seiten zeigt die molekulare und für die selektive Bindung des Naturstoffs Okanin entscheidenden Unterschiede in der Rückkopplungsbindungsstelle der C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Form des Enzyms.

### Kleiner Unterschied – große Wirkung

Der Stoffwechselweg, durch den unsere Nutzpflanzen aus Sonnenlicht, Wasser und Kohlenstoffdioxid Nährstoffe bilden, ist nicht darauf ausgelegt, längere Trockenperioden und hohe Temperaturen zu tolerieren. Beispiele für heimische Nutzpflanzen, die diesen als „C<sub>3</sub>-Photosynthese“ bezeichneten Stoffwechselweg für ihr Wachstum und ihre Entwicklung verwenden, sind Raps und Zuckerrübe. Im Gegensatz zu diesen beiden typischen Vertretern des C<sub>3</sub>-Photosynthesewegs nutzt der an trockenere und wärmere Standorte angepasste Wilde Amarant so wie viele andere der weltweit vorkommenden aggressivsten Unkräuter einen anderen Stoffwechselweg für sein Wachstum und seine Entwicklung. Dieser als „C<sub>4</sub>-Photosynthese“ bezeichnete Weg macht diese Pflanzen außergewöhnlich konkurrenzstark, besonders mit Blick auf die kommenden klimatischen Veränderungen.

Die Erforschung des C<sub>4</sub>-Wegs und die Unterschiede zum C<sub>3</sub>-Stoffwechsel, den die meisten Nutzpflanzen verwenden, stand im Zentrum des BioSC Boost-Fund-Projektes C4-PSH. Ziel des Projektes war es, molekulare Unterschiede in den beiden Photosynthesewegen zu identifizieren. Diese können dann als Angriffspunkt genutzt werden, um umweltverträgliche Pflanzenschutzmittel zu entwickeln, die spezifisch auf den von den Unkräutern genutzten C<sub>4</sub>-Weg wirken, Nutzpflanzen mit C<sub>3</sub>-Weg jedoch nicht beeinflussen.

Biochemische und strukturelle Arbeiten an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf konnten einen wirksamen Angriffspunkt in einem Schlüsselenzym des C<sub>4</sub>-Photosynthesewegs, der Phosphoenolpyruvat-Carboxylase, identifizieren. Dieses kommt zwar auch in C<sub>3</sub>-Pflanzen vor, besitzt aber dort keine zentrale Bedeutung für Wachstum und Entwicklung. C<sub>4</sub>-Pflanzen können dagegen ohne eine funktionierende Form dieses Enzyms nicht wachsen beziehungsweise überleben. Über den Vergleich der molekularen Struktur der C<sub>4</sub>-Form mit der in C<sub>3</sub>-Pflanzen vorkommenden Isoform des Enzyms konnten die Düsseldorfer Teams Unterschiede in einem bestimmten Bindungsbereich dieses hochkomplexen Moleküls ausmachen, der die Enzymfunktion stilllegen kann.



**Beiträge der einzelnen Projektgruppen** im disziplin- und forschungsbereichsübergreifenden Konsortium bei der Entdeckung des Naturstoffs Okanin für den selektiven Pflanzenschutz

### Akribische Suche zahlt sich aus

Basierend auf der Architektur der beiden Enzym-Isoformen und den strukturellen Unterschieden identifizierten die Forschenden mithilfe von computerbasierten Verfahren eine Reihe von Substanzen, welche an die C<sub>4</sub>-Isoform, nicht jedoch oder nur sehr schlecht an die C<sub>3</sub>-Form binden. Sie filterten die aussichtsreichsten Kandidaten aus umfangreichen Wirkstoff-Bibliotheken, bestehend aus über 20 Millionen Verbindungen. In diesen Analysen wurde mit dem Naturstoff Okanin eine Substanz entdeckt, die nahezu perfekt an die Bindungsstelle des C<sub>4</sub>-Enzyms passt. Okanin kann nicht nur auf synthetischem Wege gewonnen werden, sondern auch durch Extraktion direkt aus dem Holz verschiedener industriell genutzter Baumarten. Im Gegensatz dazu zeigt die Verbindung keinen oder nur stark eingeschränkten Zugang zu der entsprechenden Bindungstasche in der C<sub>3</sub>-Phosphoenolpyruvat-Carboxylase. Nachfolgende Laborexperimente mit den beiden gereinigten Enzym-Formen konnten die selektive Hemmung des C<sub>4</sub>-Enzyms bestätigen.

Dass der Naturstoff Okanin nicht nur im Reagenzglas eine Hemmung der gereinigten C<sub>4</sub>-Phosphoenolpyruvat-Carboxylase bewirkt, sondern auch das Wachstum typischer C<sub>4</sub>-Unkrautpflanzen hemmt und dabei C<sub>3</sub>-Nutzpflanzen wie Raps oder Zuckerrübe nicht beeinflusst, konnte in vergleichenden Pflanzenstudien am Forschungszentrum Jülich nachgewiesen werden. Ebenso zeigten mikrobiologische Tests in den Jülicher Laboren, dass Okanin

keine negativen Einflüsse auf typische Vertreter der bakteriellen Bodenflora hat. Okanin sowie von diesem Stoff abgeleitete natürliche und synthetische Derivate sind damit attraktive neue Verbindungen für den selektiven Pflanzenschutz.

Durch disziplinübergreifende Forschung aus den Bereichen Strukturforschung, molekulare Bioinformatik, Mikrobiologie und Pflanzenwissenschaften konnte im Rahmen des C<sub>4</sub>-PSH Projektes somit gezeigt werden, wie die Entdeckung eines umweltfreundlichen Pflanzenschutzmittels gelingen und anfängliche Grundlagenforschung in angewandte, gesellschaftlich relevante Forschung münden kann.

#### Ansprechpartner

**Prof. Dr. Georg Groth**,  
Institut für Biochemische Pflanzenphysiologie, HHU Düsseldorf,  
georg.groth@hhu.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Georg Groth, Dr. Giang Nguyen**,  
Institut für Biochemische Pflanzenphysiologie, HHU Düsseldorf  
**Prof. Dr. Holger Gohlke, Dr. German Erenkamp**,  
Institut für Pharmazeutische und Medizinische Chemie, HHU Düsseldorf  
**Prof. Dr. Michael Bott, Dr. Andreas Küberl**,  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich  
**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Fabio Fiorani**,  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich

## Duale Pflanzenschutzmittel der Zukunft

**Um den Ertragsverlust bei Nutzpflanzen möglichst gering zu halten, besteht inzwischen ein großes Interesse an natürlichen oder naturnahen Substanzen, die einen effektiven und zugleich umwelt- und verbraucherfreundlichen Pflanzenschutz ermöglichen. Besonders vielversprechend sind chemische Stoffe, die nicht nur einen möglichen Schadorganismus bekämpfen, sondern auch das pflanzliche Immunsystem stärken und die Pflanze auf einen möglichen Befall vorbereiten. Im interdisziplinären Boost-Fund-Projekt „Priming-Active Compounds for Plant Protection“ (PrimACs) wurden solche Substanzen identifiziert.**

Die Entwicklung von Wirkstoffen hat in Deutschland eine lange Tradition und einen hohen Stellenwert. Sie hat in den vergangenen Jahrzehnten zur Vermarktung vieler Medikamente und Pestizide geführt, die einen wesentlichen Anteil am wirtschaftlichen Erfolg der großen Pharma- und Agrarunternehmen haben. Zum Beispiel betrug der Inlandsumsatz des deutschen Pflanzenschutzmarktes im Jahr 2019 fast 1,2 Milliarden Euro. Trotz der großen Effektivität von Pestiziden gehen aber noch immer mindestens 40 Prozent des möglichen Nutzpflanzenertrags durch Krankheiten und umweltbedingten Stress, wie zum Beispiel Trockenheit, verloren. Dieser Ertragsverlust bei Nutzpflanzen stellt



ein dringend zu lösendes Problem dar. Denn einerseits wächst nach wie vor die Weltbevölkerung und andererseits werden Pflanzen in zunehmenden Maße außer zur Nahrungsmittelproduktion auch zur Gewinnung von Energie und verschiedenen Produkten wie Fasern oder Inhaltsstoffen verwendet. Aufgrund der in Europa geringen Akzeptanz gentechnisch veränderter Pflanzen beim gleichzeitigen Wunsch nach einer umweltfreundlichen Landwirtschaft besteht inzwischen ein großes Interesse an natürlichen oder naturnahen Substanzen, die einen effektiven und nachhaltigen Pflanzenschutz ermöglichen.

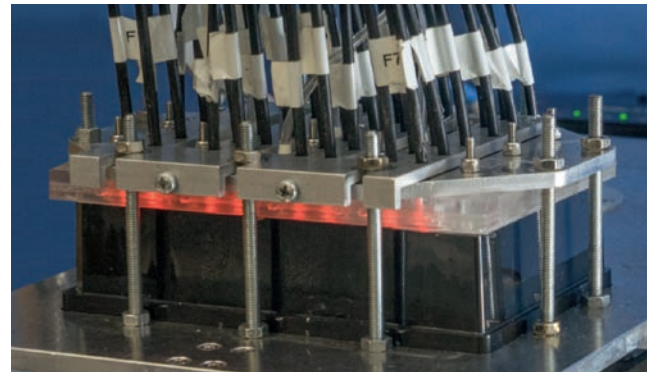
### Vorteile dualer Wirkstoffe

Natürliche oder naturnahe Substanzen sind im umweltfreundlichen Pflanzenschutz besonders erfolgreich, wenn sie nicht nur einen möglichen Krankheitserreger oder Schädling bekämpfen, sondern auch das pflanzliche Immunsystem stärken. So wird die Pflanze auf einen möglichen Befall durch Krankheitserreger oder Schadinsekten vorbereitet. Solche dual wirkenden Substanzen beeinflussen die Pflanzen ansonsten kaum. Sie wirken sich deshalb – im Gegensatz zu Substanzen, die pflanzliche Abwehrreaktionen direkt aktivieren – nicht ertragsmindernd aus. Hinzu kommt, dass Pflanzenpathogene und Schädlinge keine Resistenzen gegen dual wirkende Substanzen entwickeln können. Aus den genannten Gründen sind Wirkstoffe, die Krankheitserreger oder Schädlinge bekämpfen und gleichzeitig das pflanzliche Immunsystem stärken, die Verkaufsschlager der großen Pflanzenschutzunternehmen. Oft wurden Pflanzenschutzmittel aber ausschließlich aufgrund ihrer Giftwirkung gegen Krankheitserreger und Schädlinge entwickelt, sodass die immunstimulierende, die sogenannte primende Aktivität von dualen Wirkstoffen erst nach ihrer Markteinführung erkannt wurde. Die gezielte Optimierung als dualer Wirkstoff blieb bei der Produktentwicklung also aus. Diese Optimierung erfordert geeignete Testsysteme, die sich zum Erkennen der immunstimulierenden Aktivität von Substanzen eignen.

### Neue Substanzen gezielt finden

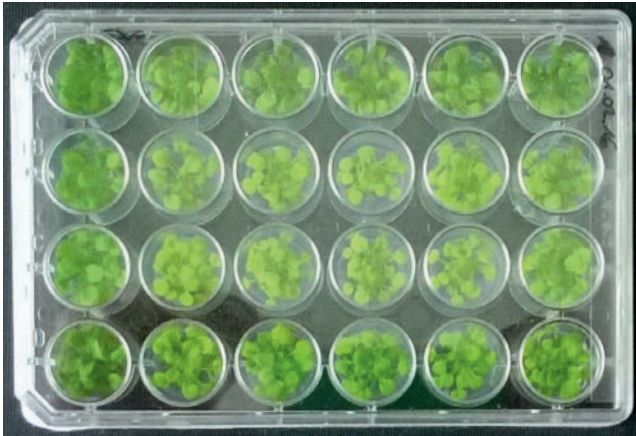
An diesem Bedarf setzt das Projekt PrimACs an. Ein bislang zum Auffinden „primender“ Substanzen erfolgreich eingesetztes Testsystem an der RWTH Aachen verwendet Suspensionszellen der Petersilie. Wenn diese „geprimt“ sind, geben sie nach Kontakt

mit einem Pathogen mehr antimikrobielle Sekundärstoffe in ihr Kulturmedium ab, als es bei „ungeprimten“ Zellen der Fall ist. Weil die Sekundärstoffe im ultravioletten Licht fluoreszieren, lassen sie sich leicht nachweisen und quantifizieren. Das Petersilie-Testsystem hat sich bei der Suche nach „primenden“ Substanzen seit vielen Jahren in mehrfacher Hinsicht bewährt, zum Beispiel hinsichtlich Verlässlichkeit und Geschwindigkeit. Allerdings ist es auf die undifferenzierten Kulturzellen und auf die Petersilie beschränkt. Um „primende“ Substanzen mithilfe von intakten Pflanzen von verschiedenen Arten identifizieren zu können, schlossen sich Expertinnen und Experten unterschiedlicher Fachrichtungen aus der Universität Düsseldorf und der RWTH Aachen zusammen, um neue PrimACs zu identifizieren.



**Das neuartige Miniatur-Testsystem (µRAMOS),** mit dem die Bestimmung der Atmungsaktivität in jedem einzelnen Näpfchen einer Mikrotiterplatte möglich ist

Das Forscherteam synthetisierte zunächst hinreichende Mengen von mehr als 50 neuen, funktionell und strukturell verschiedenartigen Substanzen in guter bis exzellenter Qualität. Zudem bezogen die Forschenden auch eine kommerzielle Substanzbibliothek in die Auswahl ein, sodass insgesamt 76 Substanzen auf ihre Fähigkeit getestet wurden, das „Priming“ in Pflanzen zu aktivieren. Dazu verwendeten die Kooperationspartner ein neuartiges Miniatur-Testsystem, das sogenannte µRAMOS, in welchem Keimlinge der Ackerschmalwand in Mikrotiterplatten angezogen wurden. Nach einer Behandlung der Keimlinge mit einer zu testenden Substanz diente die Atmung der Keimlinge



**Keimlinge der Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*)** in einer Mikrotiterplatte

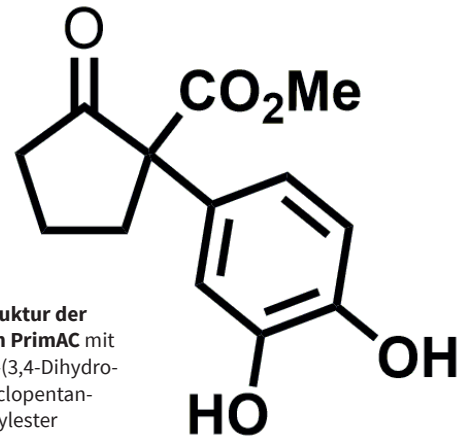
als Auswahlkriterium, weil sich diese bei der Aktivierung des „Primings“ erhöht. Mit dieser Vorgehensweise wurden acht Substanzen als neue PrimACs identifiziert.

Zu ihnen gehörten der vom interdisziplinären Team synthetisierte 1-(3,4-Dihydroxyphenyl)-2-Oxocyclopentan-1-Carbonsäuremethylester, kurz Tyr020 genannt, und einige andere Tyr-Derivate. Die „primende“ Funktionsweise der neu identifizierten PrimACs wurde nachfolgend im Labor in einschlägigen biochemisch-molekularbiologischen Analysen untersucht. Dazu gehörte die Analyse der Aktivität von Eiweißmolekülen und Genen, die für die Abwehr von Krankheiten in Pflanzen wichtig sind. Die Analysen ergaben, dass eine Behandlung von Keimlingen der Ackerschmalwand mit den neu identifizierten PrimACs dazu führt, dass Abwehr-Gene bei einem nachfolgenden Kontakt mit Krankheitserregern stärker aktiviert werden, als es in „ungeprimten“ Pflanzen der Fall ist. Damit war die „primende“ Wirkung der neu aufgefundenen PrimACs bestätigt.

### **Erfolgreiche Tests im Gewächshaus**

Im Folgenden hat das Konsortium die sechs vielversprechendsten PrimACs an ein großes Agrarunternehmen übergeben, bei dem die Substanzen in einschlägigen Gewächshaustests auf ihre Eignung für den angewandten Pflanzenschutz überprüft

wurden. Dabei zeigte sich, dass insbesondere Tyr020 beispielsweise der Gurke einen guten Schutz vor der sogenannten Brennfleckenkrankheit verlieh. Zwar schützte Tyr020 die Gurke und andere Testpflanzen nicht ausreichend vor weiteren Krankheiten und die Wirkung der anderen PrimACs war insgesamt zu gering, um daraus ein marktfähiges Pflanzenschutzmittel zu entwerfen. Dennoch steht mit der entwickelten Methodik ein neuer und vielversprechender Ansatz zur Verfügung, um neue Wirkstoffe für den Pflanzenschutz zu identifizieren.



**Die chemische Struktur der neu identifizierten PrimAC** mit der Bezeichnung 1-(3,4-Dihydroxyphenyl)-2-Oxocyclopentan-1-Carbonsäuremethylester (Deckname Tyr020)

#### **Ansprechpartner**

**Prof. Dr. Uwe Conrath,**  
ABBT – Pflanzenphysiologie, RWTH Aachen,  
uwe.conrath@bio3.rwth-aachen.de

#### **Beteiligte Core Groups**

**Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs,**  
AVT – Bioverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Jörg Pietruszka,**  
Institut für Bioorganische Chemie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Uwe Conrath,**  
ABBT – Pflanzenphysiologie, RWTH Aachen



## Gezielter Stress für wertvolle Inhaltsstoffe

**Tomaten werden über viele Monate in Gewächshäusern kultiviert. Zum Ende der Produktionsphase im Herbst werden die verbleibenden Tomatenpflanzen kompostiert. Kann man diese Reste nicht noch besser nutzen? Eine Idee, sie aufzuwerten, wurde im Projekt „InducTomE“ etabliert. Tomatenblätter enthalten unter anderem die Stoffe Rutin und Solaneseol, die bereits als Nahrungsergänzungs- beziehungsweise Arzneimittel vermarktet werden. Um die Konzentrationen dieser Phytochemikalien deutlich zu steigern, wurden die Tomatenpflanzen gezielt Umweltstressen ausgesetzt.**

Tomaten gehören zu den meist angebauten Früchten in der Welt. In Deutschland werden Tomaten hauptsächlich in Gewächshäusern angebaut. Dort produzieren die Pflanzen monatelang ihre Früchte. Zum Ende der Tomatenproduktion im Herbst sind die Pflanzen beeindruckend hoch. Diese großen Pflanzen bleiben dann als Restbiomasse übrig und auch zwischen den einzelnen Fruchternten werden immer wieder Blätter von den Pflanzen abgetrennt. Diese Blätter und Restpflanzen enthalten bioaktive Inhaltsstoffe, die von industriellem Nutzen sein können. Sie besitzen zum Beispiel antioxidative, antimikrobielle oder auch viruzide Aktivitäten. Solche sogenannten Phytochemikalien haben oft auch pharmakologische Wirkung und



können als Nahrungsergänzungsmittel dienen. So zeigt das in Tomatenblättern enthaltene Flavonoid Rutin antioxidative und entzündungshemmende Wirkung. Daher werden Rutin-Derivate in der Venentherapie eingesetzt. Das Isoprenoid Solanesol ist die Vorstufe für das Coenzym Q10 und Vitamin K, die in der Kosmetikbranche und als Nahrungsergänzungsmittel Verwendung finden.

### **Vielfacher Nutzen**

Pflanzen produzieren solche bioaktiven Substanzen zu ihrem eigenen Schutz in Reaktion auf Umwelteinflüsse sowie zur Interaktion mit der Umwelt. So werden einige Phytochemikalien bei Umweltstress vermehrt produziert und schützen die Pflanzen vor Schäden. Diese Tatsache wollten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Projektes „InducTomE“ nutzen: Die Tomatenpflanzen sollten nach der letzten Fruchternte noch im Gewächshaus gezielten Umweltstressoren wie zum Beispiel Hitze, Kälte oder Nährstoffmangel ausgesetzt werden, um die gewünschten Inhaltsstoffe Rutin und Solanesol anzureichern. Dadurch würden die Pflanzenreste aufgewertet, die sonst zum

Ende der Tomatenproduktion üblicherweise nur noch als Kompost dienen. Die zweifache Nutzung der Pflanzen zur Tomatenproduktion und zur Extraktion von wertvollen Inhaltsstoffen bedeutet eine Erweiterung der Wertschöpfungskette. Zudem kann die Biomasse zur Gewinnung von Energie und sogenannten Massenchemikalien, zum Beispiel Zucker oder Bioethanol, genutzt werden. Dies wurde im Projekt bereits mitgeplant. Solche Wertschöpfungsketten sind ressourcenschonend, da der Anbau entsprechender Energie- und Heilpflanzen eingespart würde.

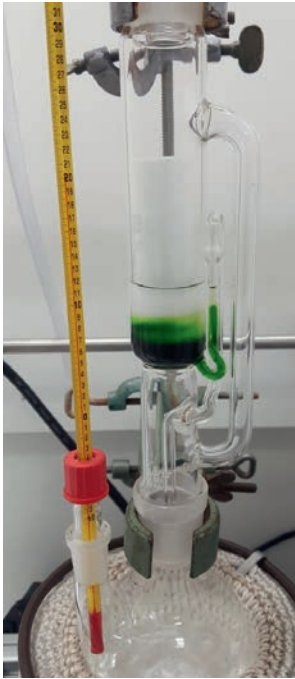
Pflanzenwissenschaftler des Forschungszentrums Jülich und der RWTH Aachen haben zusammen mit Gartenbauwissenschaftlern der Universität Bonn getestet, unter welchen Umweltbedingungen Rutin und Solanesol angereichert werden. Dabei wurden zunächst viele verschiedene Stressbedingungen an jungen Pflanzen erprobt, wovon die geeignetsten in Produktionsgewächshäuser übertragen wurden. Mit einer Kombination von Nährstoffmangel, Kälte und erhöhter Lichtintensität konnte eine maximale Steigerung des Rutingehaltes erreicht werden. Hitze steigerte den Gehalt an Solanesol. Auch die Option der Veränderung von Anzuchtbedingungen schon während der Fruchtproduktion und der Einfluss auf den Inhaltsstoffgehalt der Blätter sowie Fruchtqualität und Ertrag wurden untersucht. Um außerdem weitere nutzbare Phytochemikalien zu identifizieren, wurden genetische Expressionsstudien und ungerichtete Inhaltsstoffanalysen durchgeführt. Diese neuen Inhaltsstoffe könnten dann durch Extraktion oder durch eine biotechnologische Produktion nach Aufklärung ihrer Biosynthesewege ebenfalls produziert und vermarktet werden.

### **Nachweis an der Pflanze**

Zur Überprüfung der erfolgreichen Anwendung der Stressbedingungen wurden optische Verfahren entwickelt, welche die Erhöhung der Menge an Rutin und Solanesol anzeigen. Hierzu wurden verschiedene optische Verfahren untersucht, die auch von gartenbaulichen Produzenten im Gewächshaus durchgeführt werden können. Sowohl Fluoreszenzmessungen als auch eine einfache Quantifizierung der Blattfarbe konnten etabliert werden, um den Erfolg der angewandten Stressbedingungen zu überprüfen. Die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen am Versuchszentrum Gartenbau in Straelen unterstützte das



**Messungen von Fluoreszenzparametern im Gewächshaus**



### Extraktion von Inhaltsstoffen aus Tomatenblättern

Projekt durch eine aktive Bereitstellung von Versuchsaufbauten und durch Beratung der Projektpartner. Die Aufgabe der Verfahrenstechniker an der RWTH Aachen war die Entwicklung von Extraktions- und Aufreinigungsprozessen der Phytochemikalien aus Tomatenblättern und anschließender Bioaffinierung. Es wurden Konzepte für einen effizienten, umweltfreundlichen Prozess erarbeitet, der den Anforderungen der möglichen Marktsektoren für Rutin und Solanesol entsprach. Eine wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens ergab, dass die Gesamtkosten durch eine sequenzielle Extraktion der Inhaltsstoffe signifikant reduziert würden. Auch die weitere Verwertung der Tomatenbiomasse in Bioaffinerieprozessen erwies sich als geeignetes und effizientes Verfahren.

### Wirtschaftlichkeit steigern

Agrarökonominnen der Universität Bonn untersuchten mögliche Wege zur Einführung der Zweifachnutzung von Tomatenpflanzen

in den Markt. Hierbei wurden zunächst Sektoren identifiziert, in denen Rutin oder Solanesol vermarktet werden können, und die entsprechenden Regularien geprüft. Daraufhin wurden die involvierten Teilnehmer der Produktionsketten identifiziert sowie deren Innovationsbereitschaft untersucht. Zudem wurden verschiedene Markteintrittsbarrieren der neuen Wertschöpfungskette bewertet, die hier eine Hürde darstellen können. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit deutlich erhöht werden kann: Erstens durch die Gewinnung und Vermarktung mehrerer bioaktiver Substanzen und zweitens durch das Senken der Produktionskosten, indem man beispielsweise zentrale Extraktionsanlagen nutzt.

Inzwischen hat das InducTomE-Konsortium die Idee, Phytochemikalien aus Blättern und Restpflanzen zu gewinnen, auf die Paprikaproduktion übertragen. Das BMBF-Projekt „TaReCa“ lief von 2017 bis 2020 in Zusammenarbeit mit einem Beirat aus der Aroma- und Duftindustrie, der Biozidindustrie und dem Gartenbau, der die Interessen und Möglichkeiten potenzieller Industriepartner einbrachte.

### Ansprechpartnerin

**Dr. Alexandra Wormit**,  
ABBT – Botanik und Molekulargenetik, RWTH Aachen,  
awormit@bio1.rwth-aachen.de

### Beteiligte Core Groups

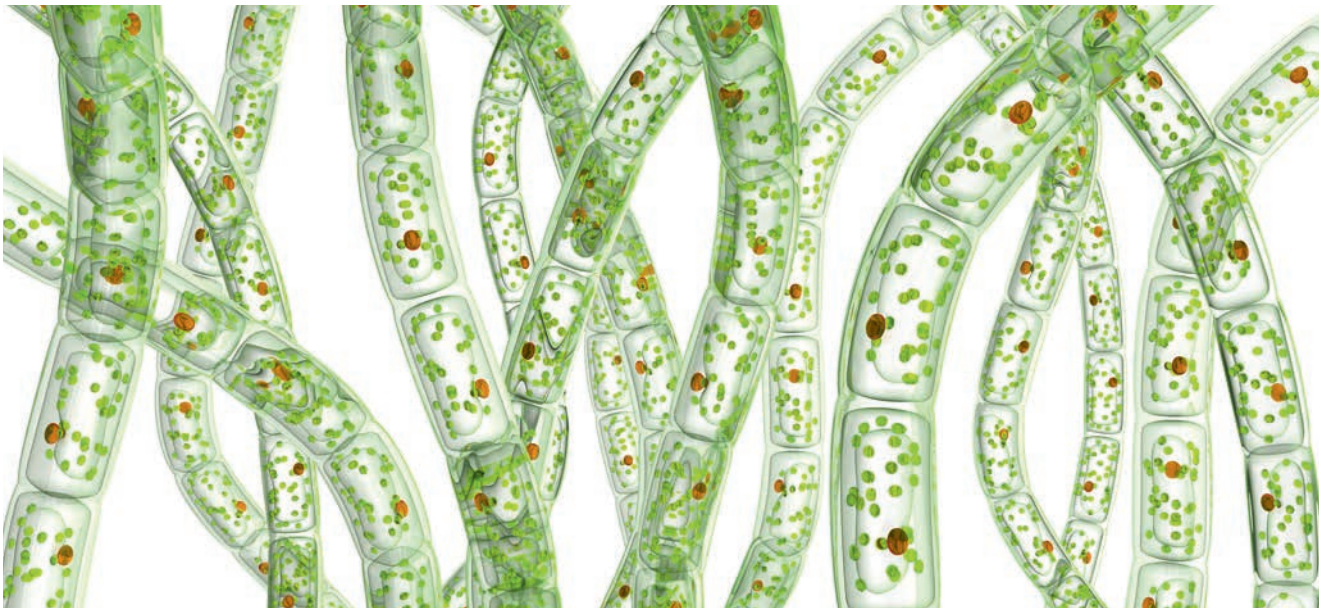
**Prof. Dr. Björn Usadel<sup>1</sup>, Dr. Alexandra Wormit, Dr. Julia J. Reimer**,  
ABBT – Botanik und Molekulargenetik, RWTH Aachen  
**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Anika Wiese-Klinkenberg<sup>1</sup>, Dr. Björn Thiele**,  
Dr. Laura Junker-Frohn,  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich  
**Prof. Dr. Georg Noga, PD Dr. Mauricio Hunsche**,  
**Dr. Simone Röhlen-Schmittgen, Dr. Tanja Groher**,  
INRES – Gartenbauwissenschaft, Universität Bonn  
**Prof. Dr. Andreas Jupke, Andreas Bednarz, Manuel Lück**,  
AVT – Fluidverfahrenstechnik, RWTH Aachen  
**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Dr. Laura Carraresi, Joana Wensing**,  
ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship,  
Universität Bonn

<sup>1</sup> Neue Adresse: IBG-4 Bioinformatik, Forschungszentrum Jülich

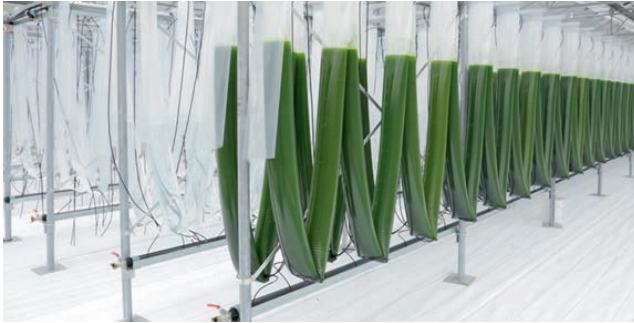
## AlgalFertilizer – Nährstoffkreislauf mit Algen, Sonne und Abwasser

**Unsere Nährstoffströme sind ineffizient und teilweise verschwenderisch in Bezug auf Substanz, Energie und Wasser. Jede Möglichkeit, einen echten Kreislauf zu etablieren, um unabhängiger und zukunftsfähiger zu werden, sollte genutzt werden. Schnell wachsende und inhaltsstoffreiche Mikroalgen sind hierbei eine vielversprechende und flexible Ressource der Zukunft. Der effektive Nährstofftransfer zurück zur Pflanze via Mikroalgendünger wurde erfolgreich im Projekt „AlgalFertilizer“ gezeigt.**

Pflanzen benötigen außer Licht und Wasser auch Nährstoffe, insbesondere viel Phosphor und Stickstoff. Bisher kommen dafür große Mengen mineralischen Düngers zum Einsatz. Darin enthaltener Phosphor wird aus phosphohaltigem Gestein gewonnen, das sich über Millionen Jahre gebildet hat. Die weltweiten Vorkommen sind begrenzt und konzentrieren sich auf wenige ergiebige Orte. Im Hinblick auf eine unabhängige Nahrungsmittelproduktion ist daher, besonders hinsichtlich Phosphor, eine möglichst effiziente Ressourcenrückgewinnung eine wichtige Investition in die Zukunft. Algen können hierbei eine wichtige Rolle spielen – sie nehmen Phosphor sehr effektiv aus ihrer Umgebung auf und wachsen unter entsprechenden Licht-



bedingungen und unter Aufnahme von klimaschädlichem CO<sub>2</sub> deutlich schneller als Landpflanzen. Das Projekt „AlgalFertilizer“ hat mit fünf Core Groups im BioSC die Phosphor-Aufnahme von Mikroalgen aus phosphathaltigem Wasser und Abwasser und den Transfer dieses Phosphors von der Mikroalgenmasse zu Weizenpflanzen untersucht.



**Algen werden in Schläuchen im Gewächshaus oder Freiland kultiviert** und später als Dünger verwendet.

### **Gut für die Umwelt**

Zunächst interessierte es die Forschenden, wie genau die erstaunlich gute Phosphoraufnahme in die Algenzellen funktioniert. Denn mit diesem wissenschaftlichen Verständnis konnten sie besonders effektive Algenarten identifizieren und weitere Optimierungen umsetzen. In der Folge untersuchten die Forscherteams, ob diese Algen Phosphor vollständig aus dem Wasser aufnehmen. Damit können Algen einen wichtigen Beitrag zur Wasserreinigung in Klärwerken leisten, da die Grenzwerte für Phosphat in geklärtem Abwasser zukünftig noch weiter gesenkt werden – effiziente Abtrennungsmethoden sind somit essenziell. Gleichzeitig wird auch Stickstoff von den Algen mit aufgenommen, beide Nährstoffe führen in Flüssen und Seen zur Eutrophierung, einer Überdüngung, wenn sie im Übermaß vorhanden sind.

Eine weitere Frage ist, ob eine Pflanze mit dem Eintrag nährstoffreicher Algenbiomasse ausreichend versorgt werden kann. Die im Projekt untersuchten Algenzellen enthalten die Nährstoffe

Phosphor und Stickstoff in einer optimalen Mischung für das Pflanzenwachstum. Kommen diese Nährstoffe auch bei der Pflanze an? Ist ein auf Algen basierender Dünger einem Mineraldünger sogar überlegen, weil die Nährstoffe erst nach und nach aus den Algenzellen freigesetzt werden und daher langfristiger als eine Art Depotnährstoff wirken? Für die Antworten auf diese Fragen bedeutete dies, Nährstoffe, Wasser, Algen, Boden und Pflanzen experimentell zusammenzubringen, um den Nährstofftransfer ganz genau nachzuverfolgen.

### **Erfolgreiche Tests**

Die Algenproduktion erfolgte zunächst in einem sogenannten biomimetischen Bioreaktor im Forschungszentrum Jülich. Dieser brachte durch eine besonders effektive Lichtverteilung mehr als doppelt so hohe Zelldichten hervor. Diese Algen wurden für die Charakterisierung der Phosphoraufnahme erzeugt. Für die deutlich größeren Mengen an Algenbiomasse, die in den Feld- und Topfversuchen gebraucht wurden, produzierten die Forscher die gleichen Algen im Gewächshaus in Schläuchen. Ein Liter Algenlösung liefert gewöhnlich nur ein bis zwei Gramm getrockneter Algenbiomasse. Somit müssen mehrere Kubikmeter Algenlösung für ausreichend Dünger kultiviert werden. Da dies mithilfe von Sonnenlicht im Gewächshaus geschieht, ist diese Art der Produktion weniger gleichmäßig als im Labor, liefert aber zuverlässig die benötigte Biomasse.

Bei der Nährstoffaufnahme aus Wasser zeigte sich, dass bestimmte, vormals ausgehungerte Algen der *Chlorella*-Arten weit mehr Phosphor aufnehmen, als sie für ihren eigenen Stoffwechsel brauchen. Diese sogenannte Luxusaufnahme macht dann bis zu acht Prozent der Trockenmasse aus, während der Phosphorgehalt normalerweise nur etwa ein Prozent beträgt. Um die hier zugrunde liegenden Prozesse genau zu verstehen, analysierten die Wissenschaftler die tatsächliche Menge des Phosphors in den Zellen und die Formen, in denen er vorliegt. Denn er kann zum Beispiel als freies Phosphat, als aneinandergelagerte Polyphosphatketten oder organisch gebunden vorkommen.

Diese Formen beeinflussen die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors nach Abbau der Algenbiomasse im Boden. Es konnte gezeigt werden, dass sich Phosphor größtenteils in Polyphosphat-

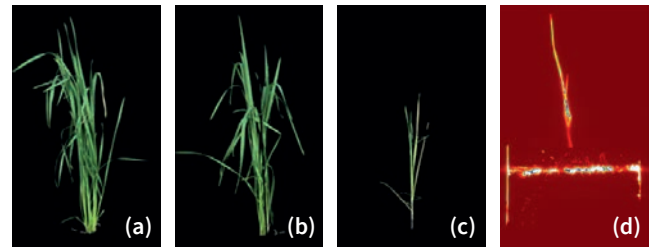
ketten in der Zelle ansammelt, einer schnell verfügbaren Speicherform. Ein ergänzendes Computermodell der Heinrich-Heine-Universität zum Phosphor-Stoffwechsel simuliert mit den so erhaltenen Daten das Wachstum der Algen. Es beschreibt die Dynamik und den Umbau zwischen den verschiedenen Phosphorformen in der Zelle. Fazit: Algen bieten sehr gute Voraussetzungen, Phosphat aus Wasser oder Abwasser zu entfernen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann eine erfolgversprechende Algendüngestrategie entwickelt werden.

### In der Natur bestätigt

In einem ersten Feldversuch auf vormals normal gedüngtem Boden verglichen Forscher der Universität Bonn den Effekt von Algen-, Hühnerkot- und Mineraldünger auf Keimung und Wachstum von Weizenpflanzen. Das Ergebnis: Die Pflanzen wuchsen in allen drei Versuchsanordnungen ungehindert. Es folgten vom Forschungszentrum Jülich und der Universität Bonn gemeinsam gestaltete automatisierte Topfexperimente zum Vergleich der Darreichungsform: Trockene beziehungsweise frische Algenbiomasse und als Kontrolle Mineraldünger in einer Standard- und einer Mangeldüngung. Die Analyse des Wachstums wie auch die Bewässerung fand mit einem kameraausgerüsteten Kransystem statt und ermöglichte eine statistische Auswertung. Die mit Algenbiomasse gedüngten Weizenpflanzen waren sowohl bei trockenem als auch frischem Algendünger dem Mineraldünger annähernd gleichwertig.

Es blieb die Frage, ob der von den Pflanzen aufgenommene Phosphor tatsächlich von den Algen stammt oder von Mikroorganismen, die die Algen kompostieren, beziehungsweise ob bereits im Boden festgelegtes Phosphor durch diese Prozesse wieder gelöst wird. Daher wurden in einem kontrollierten Laborexperiment Algen mit radioaktivem  $^{33}\text{P}$  Phosphor versorgt und anschließend als Dünger in sogenannten Rhizotronexperimenten verwendet. Die so gedüngten Weizenpflanzen wurden in verschiedenen Entwicklungsstufen zeitaufgelöst mit einem „Bio-Imager“, der zur Sichtbarmachung vorhandener Radioaktivität dient, charakterisiert.

Es zeigte sich in Wurzeln und Blättern, dass in der Tat der algenbürtige Phosphor in die Pflanze aufgenommen wurde – zunächst



**Der Wuchs von Weizenpflanzen** mit Mineraldünger (a), mit Algendünger (b) und ohne Dünger (c). Eine Spezialkamera zeigt, dass das durch die Pflanze aufgenommene Phosphor (d, rot leuchtend) tatsächlich aus den Algen stammt.

zeitverzögert im Vergleich zu mineralischem Phosphor, nach etwa drei Wochen jedoch in der gleichen Größenordnung. Die verzögerte Verfügbarkeit deutet auf einen vorgelagerten Freisetzungsmechanismus und damit auf längeren bioverfügbaren Verbleib im Oberboden. Algengetragener Phosphor verzögert somit die schnelle Phosphorbindung an Minerale wie eine Verlagerung in den Unterboden und minimiert damit den Verlust des Nährstoffs in Bezug auf die Nutzung durch Pflanzen.

AlgalFertilizer bestätigt mit diesen Ergebnissen das Potenzial von Algen im Nährstoffkreislauf. Zukünftige Projekte sollen dann die bioökonomische Evaluation und Nutzung ermöglichen.

#### Ansprechpartner

**Prof. Dr. Oliver Ebenhöf,**  
Institut für Quantitative und Theoretische Biologie, HHU Düsseldorf,  
oliver.ebenhoeh@hhu.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Christina Kuchendorf (Autorin),  
Dr. Ladislav Nedbal (Autor),**  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Wulf Amelung, Dr. Henning Schiedung,**  
INRES – Bodenwissenschaften, Universität Bonn

**Prof. Dr. Harry Vereecken, Dr. Diana Hofmann, Dr. Nina Siebers,**  
IBG-3 Agrosphäre, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Andreas Weber, Dr. Tabea Mettler-Altmann,**  
Institut für Biochemie der Pflanzen, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Oliver Ebenhöf,**  
Institut für Quantitative und Theoretische Biologie, HHU Düsseldorf

## Phosphat aus pflanzlicher Biomasse: Rückgewinnung und Vermarktung

**Die Notwendigkeit, essenzielle Ressourcen, wie zum Beispiel Phosphor aus Neben- oder Abfallströmen, zurückzugewinnen, stellt bestehende Industriezweige vor zahlreiche Herausforderungen. Biobasierte Technologien können hier die Lösung sein. Bisherige Hürden sind jedoch hohe Umstellungskosten, fehlende Qualitäts- oder Industriestandards sowie unsichere rechtliche Rahmenbedingungen. Im Projekt „P-ENG“ wurde eine Methode zur Rückgewinnung von Phosphat aus Rapspresskuchen etabliert und es wurde untersucht, wie neue Wertschöpfungsketten aussehen könnten, welche die Vermarktung dieses Phosphats ermöglichen.**

Phosphor als fossile Ressource ist endlich und wird nur in wenigen Regionen der Erde, unter anderem in Marokko, in Minen abgebaut. Der Rohstoff ist jedoch eine nicht ersetzbare Ressource für Lebewesen und viele Industrien, wie zum Beispiel als Dünger in der Landwirtschaft oder als Säureregulator in der Lebensmittelproduktion. Die weltweiten Phosphaterzvorkommen werden nur noch für circa 300 Jahre ausreichen. Daher müssen Strategien für eine nachhaltige Phosphatnutzung und Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphat aus ungenutzten Nebenströmen gefunden werden. Ein Beispiel stellt die Speiseölproduktion in Ölmühlen dar. Hier wird neben dem Speiseöl, das rund 40 Pro-



zent der Produktion ausmacht, auch das Koppelprodukt Ölpressekuchen hergestellt. In diesen restlichen 60 Prozent der Gesamtproduktion steckt eine beachtliche Menge pflanzlich gebundenen Phosphors in Form des Speichermoleküls Phytat. Der Ölpressekuchen wird in der aktuellen Wertschöpfungskette vor allem in der Futtermittelproduktion weiterverarbeitet.

### Hefen als Helfer

Hier knüpfte das BioSC-Projekt „P-ENG“ an. Zunächst wurde die Rückgewinnung von Phosphat aus Ölpressekuchen mithilfe einer Phytase etabliert. Phytasen sind Enzyme, die Phosphat durch Abspaltung aus Phytat freisetzen können. Mit biotechnologischen Methoden wurde die Phytase so optimiert, dass sie hitzestabil ist. Die Produktion der Phytase erfolgte mithilfe einer Hefe, welche Methanol als Kohlenstoffquelle verwenden kann.

Untersucht wurde die Konzentration von Phosphat mittels Hefen, welche Phosphat als Polyphosphat speichern können. Polyphosphatreicher Hefeextrakt oder reines biobasiertes Polyphosphat können als Lebensmitteladditiv verwendet werden und stellen so eine biologische Alternative zum chemisch hergestellten Polyphosphat dar.

Darüber hinaus bietet diese Technologie die Chance, Futtermittel mit einem geringeren Phosphatgehalt zu produzieren. Denn Nutztiere wie Schweine oder Geflügel können pflanzlich gebundenes Phosphat im Futtermittel nicht adäquat verdauen, so dass das Phosphat ungenutzt durch die Ausscheidungen der

Tiere in das Abwasser und durch Gülledüngung auch auf die Felder gelangt. Hier belasten die Phosphate dann Flüsse und Seen. Die Rückgewinnung des Phosphats vor der Weiterverarbeitung zu Futtermitteln würde dieser Problematik entgegenwirken.

### Märkte neu vernetzen

Die Marktimplementierung dieses technischen Prozesses geht allerdings mit Herausforderungen und Veränderungen in bestehenden Wertschöpfungsketten einher. Im Rahmen des P-ENG-Projektes wurden Experten klassischer Polyphosphathersteller, Ölmühlen, Enzymhersteller sowie Futtermittelproduzenten befragt, um diese Herausforderungen für den bisherigen Markt zu untersuchen.

Momentan existieren zwischen der Wertschöpfungskette der Ölmühle und der des Polyphosphatproduzenten keine Verknüpfungen. Im Fall der Phosphatrückgewinnung aus Ölpressekuchen und der anschließenden Weiterverarbeitung zu Polyphosphat müssen neue Wertschöpfungsnetzwerke erschlossen werden. Die Forscherteams leiteten unterschiedliche Szenarien ab in Abhängigkeit davon, welcher Akteur den Prozess der enzymatischen Phosphorabspaltung übernimmt. Eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung des Prozesses ist die Investition in einen Bioreaktor, den keiner der bestehenden Akteure bisher besitzt. Angenommen, der klassische Polyphosphathersteller übernimmt die Phosphorextraktion, so stünde dieser vor den Herausforderungen des fehlenden biotechnologischen Know-hows sowie der geografischen Fragmentierung des Ölsektors.

40

**Produktion von biobasiertem Polyphosphat** mittels mit Phytase behandelten Pflanzenmaterials und Phosphat-akkumulierender Hefe

$$\text{O} \quad \text{O} \quad \text{O}$$

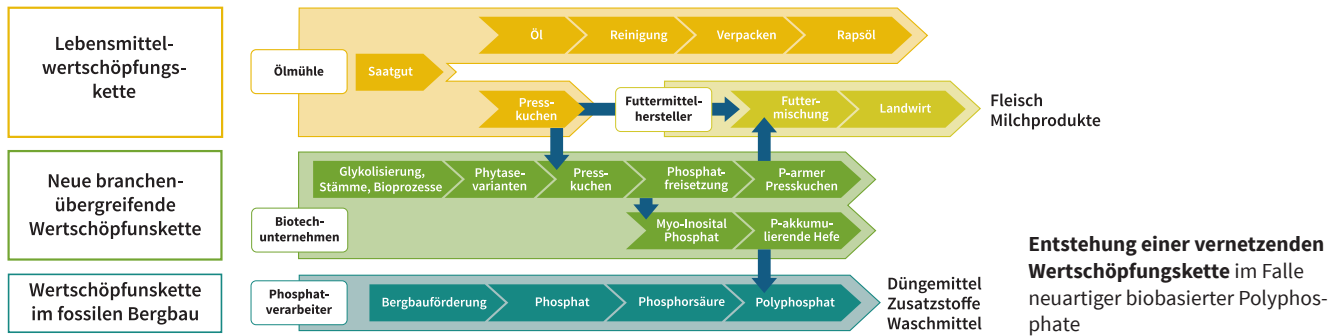
$$\parallel \quad \parallel \quad \parallel$$

$$\text{O} - \text{P} - \text{O} - \left[ \text{O} - \text{P} - \text{O} \right]_n - \text{P} - \text{O}^-$$

$$\parallel \quad \parallel \quad \parallel$$

$$\text{O}^- \quad \text{O}^- \quad \text{O}^-$$





Außerdem müssen spezifische rechtliche sowie kundenspezifische Anforderungen an das Polyphosphat je nach Anwendungsfeld eingehalten werden. Das neue biobasierte Polyphosphat geht mit Unsicherheiten einher, da die genauen Eigenschaften noch erforscht werden müssen. Darüber hinaus stellen fehlende Standards für das neue biobasierte Polyphosphat eine Hürde dar, die eine Marktimplementierung erschwert. Je nachdem, welcher Akteur die Phosphorextraktion übernimmt, ist eine Vorwärts- (zum Beispiel Ölmühle) oder Rückwärtsintegration (zum Beispiel Polyphosphathersteller) in der Wertschöpfungskette notwendig. Insgesamt wurden organisatorische, regulatorische, wirtschaftliche, geografische und produktbezogene Herausforderungen für die gesamte Wertschöpfungskette abgeleitet.

### Biotechnologie als Mittler

Demgegenüber stehen die enormen Chancen für die Unternehmen, einen Beitrag zu einer nachhaltigen Phosphatwirtschaft zu leisten. Das Ergebnis der im Rahmen von P-ENG durchgeführten Interviews mit den bestehenden Marktteilnehmern war ein komplett neues Szenario: In diesem etablieren die Forscherinnen und Forscher einen zusätzlichen Akteur, den sogenannten Collector. Da keiner der zurzeit am Markt tätigen Industriezweige über alle notwendigen Kompetenzen verfügt, könnte der neue Akteur als Vermittler zwischen den bisher getrennten Wertschöpfungsketten fungieren. Dieser sollte geografisch günstig positioniert sein, um eine Art biobasierten Polyphosphat-Distrikt zu schaffen, welcher dabei hilft, die Logistik- und Transportkosten zu senken und den gesamten Prozess nachhaltiger zu gestalten.

Die Technologie muss, basierend auf zuverlässigen Daten zur Wirtschaftlichkeit, einen höheren Reifegrad erlangen. Nur so können die bestehenden Geschäftsmodelle der etablierten Akteure verändert und die Markteinführung der neuen Technologie erleichtert werden. Entscheidend ist eine engere Vernetzung zwischen Wissenschaft und Industrie, um den Technologietransfer zu realisieren und den Marktanforderungen gerecht zu werden.

In Folgeprojekten an der RWTH Aachen, dem DBU-Projekt „Value-PP“ und dem MWIDE-Projekt „Business-P“, wurde in den vergangenen Jahren ein Prozess von der Freisetzung des Phosphats mittels Phytase über die Generierung von Phosphat-akkumulierenden Hefezellen bis hin zur Herstellung von biobasiertem Polyphosphat entwickelt. Die Zukunft wird zeigen, ob die oben skizzierte Wertschöpfungskette realisierbar ist.

#### Ansprechpartner

**Prof. Dr. Lars M. Blank,**  
ABBT – Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen,  
lars.blank@rwth-aachen.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Lars M. Blank, Jana Fees (Autorin),**  
ABBT – Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Dr. Laura Carraresi, Carolin Block (Autorin),**  
ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship,  
Universität Bonn

**Prof. Dr. Ulrich Schwaneberg, Dr. Anna Joëlle Ruff,**  
ABBT – Biotechnologie, RWTH Aachen

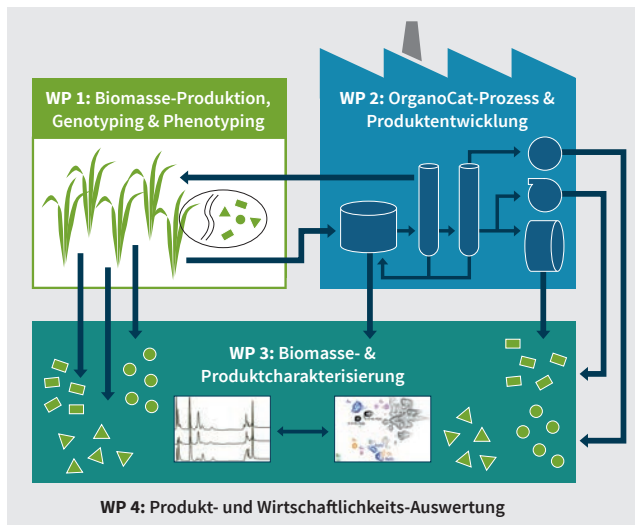
**Prof. Dr. Wolfgang Wiechert, Prof. Dr. Marco Oldiges,**  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich

## Pflanzen als Quelle für wertvolle Rohstoffe erschließen

**Bioraffineriekonzepte der zweiten Generation nutzen den pflanzlichen Rohstoff Lignocellulose und können einen vielversprechenden Beitrag zu einem biobasierten Wirtschaftssystem leisten, sofern zeitgleich auch ökologische Gesichtspunkte und Aspekte der Nachhaltigkeit bei ihren Entwicklungen berücksichtigt werden. Das FocusLab „AP<sup>3</sup>“ setzte sich zum Ziel, neuartige Wertschöpfungsketten auf Basis einer ganzheitlichen Verwertung von Lignocellulose zu erforschen und zu etablieren. Dabei konzentrierte sich das Projekt auf Pflanzen, die nicht oder kaum mit Nahrungs- oder Futtermittelpflanzen um Anbauflächen konkurrieren.**

Lignocellulosen machen in Landpflanzen bis zu 95 Prozent der Trockenbiomasse aus und sind daher eine wichtige Ressource für biogene Produkte. Ihre vollständige Verwertung kann dabei einen großen wirtschaftlichen und ökologischen Fortschritt darstellen. Für die Umwandlung von Lignocellulose in Plattformchemikalien muss sie zunächst aufgeschlossen und in ihre chemischen Grundbestandteile – Lignin, Cellulose und Hemicellulose – getrennt werden. Diese Bestandteile können als Rohstoffe für eine breite Produktpalette wie biogene Chemikalien, Materialien und Kraftstoffe dienen. Insbesondere die Gewinnung von qualitativ hochwertigem Lignin kann die Wirtschaftlichkeit solcher Konzepte verbessern.





**Die Forschungsstruktur des FocusLabs „AP³“** mit den vier wissenschaftlichen Arbeitspaketen und ihrer Zusammenarbeit untereinander

Eine vielversprechende Neuerung auf diesem Gebiet ist die OrganoCat-Technologie. Hierbei wird ein zweiphasiges System aus Wasser und einem biogenen Lösemittel verwendet. Als Katalysator wird eine organische Säure, zum Beispiel Oxalsäure, eingesetzt, um Lignocellulose aufzuschließen und dabei Lignin, Cellulose und Hemicellulose in drei getrennten Phasen zu erhalten. Diese werden in Folgeschritten getrennt und dann weiter veredelt oder sie dienen als wertvolle Rohstoffe.

Im Rahmen des Vorläuferprojektes „OrCaCel“ wurde die OrganoCat-Technologie erfolgreich an verschiedenen krautigen Pflanzen mit variabler Zusammensetzung getestet. Als ein Ergebnis des Projektes konnte der Einsatz des Katalysators und des Lösemittels erfolgreich reduziert und die Prozessströme recycelt werden.

### Schön und nützlich

Zur Vermeidung von Landnutzungskonflikten ist es erforderlich, die Verwendung von Pflanzen zu erforschen, die nicht oder kaum mit Nahrungs- oder Futtermittelpflanzen um Anbauflächen konkurrieren. Insbesondere mehrjährige Pflanzen, die auf

kargen Böden mit nur wenig Düngung angebaut werden können, sind vielversprechende Alternativen zu konventionellen Nutzpflanzen. Im Rahmen der Projekte OrCaCel und SPREAD wurde das Potenzial mehrjähriger Stauden wie das Malvengewächs *Sida hermaphrodita* und der Korbblütler *Silphium perfoliatum* erforscht. Beide wachsen bis zu drei Meter hoch und können durch ihre zahlreichen Blüten und eine lange Blühperiode eine Nahrungsquelle für Bienen und andere Insekten darstellen. Im Projekt wurden verschiedene Anbaustrategien für diese Pflanzen untersucht und eine Reihe vielversprechender Szenarien für die Produktion von lignocellulosehaltiger Biomasse durch diese Pflanzen identifiziert. Zudem wurden Sammlungen unterschiedlicher Genotypen der einzelnen Pflanzenspezies erstellt und mit ihrer Hilfe genetische Untersuchungen durchgeführt, die eine wichtige Grundlage für nachfolgende Studien in AP³ bildeten.



**Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*)** ist eine der anspruchslosen mehrjährigen Pflanzen, die als nachhaltige biogene Rohstoffquelle in Frage kommen.

### Stickstoffquelle entscheidend

Pflanzenernährung oder die Form der Düngung kann einen wesentlichen Einfluss auf die Menge und Zusammensetzung der Pflanzenbiomasse haben und letztendlich auch auf die Effizienz einer nachfolgenden Verwertung. Stickstoff ist ein wichtiger Pflanzennährstoff und kommt in unterschiedlichen chemischen Formen in mineralischen und organischen Düngemitteln vor.

Der Einfluss dieser Stickstoffformen wurde an verschiedenen genetisch unterschiedlichen Sorten von *Sida* und der Modellpflanze *Brachypodium distachyon*, einem einjährigen Süßgras, getestet. *Sida*-Pflanzen reagierten unter Gewächshausbedingungen unterschiedlich auf Nitrat oder Ammonium. Unter kontrollierten Bedingungen in Anzucht-kammern zeigte sich, dass sich die Zusammensetzung der Lignocellulose von *Brachypodium* besonders in den frühen Wachstumsstadien je nach Stickstoffquelle verändert. Auch im Stroh dieser Pflanzen wurde gezeigt, dass insbesondere der Ligningehalt als Reaktion auf die Stickstoffdüngung verändert wird. Diese Ergebnisse zeigen die Möglichkeit auf, die Zusammensetzung von Lignocellulose durch gezielte Pflanzenernährung auf eine Verwertung hin anzupassen.

### Rentable Bioraffinerien entwerfen

Durch ihre Komplexität und Variabilität hat Lignocellulose eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber einer anschließenden Verwertung. Dies stellt eine große Herausforderung in Bioraffinerien dar. Diese Widerstandsfähigkeit wird durch spezifische Faktoren beeinflusst. Zum Beispiel sind die Kristallinität der Cel-

lulose, der Ligningehalt, sowie dessen Struktur und Zusammensetzung wichtige Faktoren. Die Widerstandsfähigkeit unterscheidet sich nicht nur zwischen den Pflanzenarten und den Entwicklungsstadien der Pflanzen, sondern hängt auch vom gewählten Aufschlussprozess ab, da unterschiedliche Chemikalien und Prozessbedingungen zu unterschiedlichen Produktausbeuten und -qualitäten führen. Im Rahmen von AP<sup>3</sup> wurde eine Auswahl sehr verschiedener lignocellulosehaltiger Biomassen mit dem Ziel analysiert, gemeinsame Merkmale zu identifizieren, welche die Widerstandsfähigkeit speziell für den OrganoCat-Prozess beeinflussen. Hierbei wurden die Zugänglichkeit der abgetrennten Cellulose für den enzymatischen Abbau, die Effizienz der Hemicellulose-Aufspaltung und die Ausbeute und Qualität des extrahierten Lignins bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere das relative Verhältnis zwischen den Ligninbausteinen Sinapylalkohol und Coniferylalkohol einen hohen Einfluss hat. Zudem korrelieren spezifische Parameter der enthaltenen Mehrfachzucker mit der Widerstandsfähigkeit gegenüber dem OrganoCat-Verfahren. Bei Gräsern ist unterdessen ein geringer Anteil an Arabinosylresten günstig für die Prozessierung. Es ist somit möglich, die Produktausbeuten und -qualitäten im OrganoCat-Verfahren anhand des chemischen Profils der Biomasse vorherzusagen. Insbesondere Energiegräser weisen hinsichtlich einer effektiven Prozessierung und Fraktionierung eine gute Vorhersagbarkeit auf.

### Energiegünstige Strategie gefunden

Die Verwertung von Lignin kann ein entscheidender Schritt hin zu wirtschaftlich rentableren Bioraffinerien sein. Daher wurde im Projekt ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung von Strategien zur Aufarbeitung von Lignin gelegt. Zunächst wurde ein Verfahren zur Abtrennung des Lignins aus dem organischen Lösungsmittel entwickelt, das es darüber hinaus ermöglicht, die Lösungsmittel zu recyceln. Ein naheliegender Ansatz – die Rückgewinnung durch Verdampfung – ist im technischen Maßstab ungünstig, da eine vollständige Verdampfung energetisch auf-

**Fraktionierungsreaktoren für die Realisierung des OrganoCat-Prozesses** in der Pilot-Bioraffinerie NGP<sup>2</sup> an der RWTH Aachen



wendig ist und zu Verkrustungen auf der Verdampferoberfläche führt. Aus diesem Grund wurde ein neues Konzept, basierend auf der Zugabe eines Fällungsmittels, erfolgreich etabliert und entwickelt.

In einem ersten Schritt wurden verschiedene Fällungsmittel evaluiert, die Lignin aus dem organischen Lösungsmittel ausfällen. Das als Kälte- und Schäumungsmittel bekannte n-Pentan zeigte hierbei hohe Ausbeuten bei der Lignin-Fällung und konnte energieeffizient zurückgewonnen werden. Daher wurde basierend auf experimentellen Daten und Prozesssimulationen ein energetisch optimiertes Konzept für n-Pentan entwickelt. Dies besteht aus einer Lösungsmittelvorverdampfung, der Lignin-Fällung durch ein Fällungsmittel und der Rückgewinnung des Fällungsmittels durch Rektifikation. Dieses Konzept wurde erfolgreich im Labormaßstab durchgeführt und führte zu Lignin, das durch Filtration von der organischen Phase getrennt werden konnte. Nachfolgende Untersuchungen zeigten, dass verschiedene Fraktionen, die bei unterschiedlichen zugesetzten Konzentrationen des Fällungsmittels erhalten wurden, auch unterschiedliche molekulare Eigenschaften aufweisen. Somit können auf diese Weise sogar definierte, homogene Lignin-Fraktionen erstellt werden.

### **Erfolgreich in größeren Maßstab umgesetzt**

Eines der Hauptziele in AP<sup>3</sup> war die Verbesserung des Technologie-Reifegrades der OrganoCat-Technologie. Dazu wurde der Prozess in der modularen Bioraffinerie im Technikum der RWTH Aachen in größerem Maßstab durchgeführt. 2,5 Kilogramm Buchenholz wurden mit Oxalsäure erfolgreich in Lignin, Cellulose und Hemicellulose – als Hydrolysat – fraktioniert. Die Realisierung des Verfahrens in größerem Maßstab bewies die grundsätzliche Machbarkeit des Konzepts. Insbesondere die Partikelbildung des Lignins und ihre Zusammensetzung unter verschiedenen Prozessbedingungen werden in Zukunft weiter erforscht.

Bioraffinerie-Technologien, wie sie in AP<sup>3</sup> entwickelt wurden, veranschaulichen die komplexe Realität, mit der aufkommende nachhaltigkeitsorientierte Technologien konfrontiert sind. Einerseits kann ihre Entwicklung die vollständige Verwertung von

Lignocellulose zu marktfähigen Produkten erschließen. Andererseits befinden sie sich noch in einem formativen Stadium und ihre Rentabilität ist oftmals ungewiss. Die erfolgreiche Entwicklung solcher Technologien erfordert ein tiefes Verständnis und Wissen aus verschiedenen Disziplinen. Es bedarf daher mehr Einblickes in die zugrunde liegenden Prinzipien des gesamten Innovationssystems einer Lignocellulose-Bioraffinerie. Antworten auf die Fragen, welche Industriezweige und Unternehmen für die Entwicklung von Technologien relevant oder bereits in diesem Bereich tätig sind und inwiefern sie eine Rolle in der neuen Wertschöpfungskette spielen, sind entscheidend, um Hürden und Fallstricke dieser Konzepte zu identifizieren.



**Abfälle aus der Holzwirtschaft** stellen eine große Ressource für neue Wertschöpfungsketten dar.

### **Partner gesucht**

In AP<sup>3</sup> wurden folgende relevante Sektoren identifiziert: die Land- und Forstwirtschaft in der Rolle der Rohstofflieferanten, die Zellstoff- und Papierindustrie mit dem Potenzial, Bioraffinerie-Technologien in ihre bestehende Infrastruktur zu integrieren, der Chemie- und Energiesektor, in dem aus Bioraffinerien gewonnene Produkte einen Markt finden können, und der Biotechnologiesektor, in dem Unternehmer mit wissenschaftlichem Hintergrund häufig neue Verarbeitungstechnologien oder Produktanwendungen entwickeln. Diese auf Deutschland fokussierte Studie hat gezeigt, dass das hier bestehende Forschungsumfeld mit gut ausgebauten Netzwerken aus Fördereinrichtungen, Gründerzentren und Universitäten förderlich sein kann. Was



### Agrar- und Forstwirtschaft

- + Erzeuger von lignocellulosehaltigen Pflanzen
- + mögliche Diversifizierung von Einnahmequellen
- keine starke Verknüpfung zu anderen Sektoren



### Papierindustrie

- + Zugang zu Rohmaterialien (z. B. Holz)
- + möglicher Zugang zu neuen Märkten
- Mangel an Innovation und F&E-Ressourcen



### Chemiesektor

- + Zugang zu Produktmärkten
- + Verfügbarkeit von finanz./materiellen Ressourcen
- hohe Kosten der Umstellung weg vom Rohöl



### Biotechnologiesektor

- + Zugang zu Forschungsnetzwerken
- + gute Technologiekenntnisse
- oftmals Start-ups mit nur begrenzten Ressourcen



### Energiesektor

- + Vorhandenes Vertriebsnetz
- + Verfügbarkeit von finanz./materiellen Ressourcen
- hohe Kosten der Umstellung weg vom Rohöl

**Relevante Sektoren** für die Entwicklung von Bioraffinerie-Technologien für lignocellulosehaltige Biomasse

jedoch der Weiterentwicklung dieser Technologien in Richtung wirtschaftlicher Anwendung noch fehlt, sind insbesondere industrielle Akteure, die Ressourcen bereitstellen und in weiterentwickelte Bioraffinerieanlagen im kommerziellen Maßstab investieren.

Darüber hinaus wurde der Markt für Bioraffinerieprodukte in den letzten Jahrzehnten durch die Politik in Richtung Biokraftstoffe geprägt, aber die Entwicklung neuer Produkte – Biochemikalien, innovative Materialien – ist von immer größerer Bedeutung. Technologien, die auf der Nutzung von Biomasse basieren, sollen ganzheitlich, nachhaltig und effizient sein. In diesem Zusammenhang benötigen Bioraffineriekonzepte zur

Verwertung von Lignocellulose, Akteure, die Verarbeitungstechnologien für verschiedene Arten von Biomasse entwickeln, testen und kommerzialisieren. In AP<sup>3</sup> wurden Industrieakteure identifiziert, die diese Rollen bereits ausfüllen könnten. Unternehmen aus der Chemie-, Textil- sowie Zellstoff- und Papierbranche haben bereits ähnliche Konzepte im kommerziellen Maßstab umgesetzt oder mit dem Bau solcher Anlagen begonnen. Gleichzeitig schaffen innovative Start-ups sowie kleine und mittlere Unternehmen Technologie- und Produktvariabilität.

Die im FocusLab „AP<sup>3</sup>“ gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse verbreitern die Grundlage für die Integration lignocellulosebasierter Bioraffineriekonzepte in industriellen Anwendungen. Diese wissenschaftlichen und technologischen Fortschritte sind wertvolle Bausteine, um solche Konzepte und Technologien in naher Zukunft weiter umzusetzen und in der Industrie zu etablieren.

### Ansprechpartner

**Dr. Holger Klose,**  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich,  
h.klose@fz-juelich.de

### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Holger Klose, Dr. Silvia Schrey, Dr. Philipp M. Grande,**  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Björn Usadel<sup>1</sup>, Sabine Dietrich,**  
ABBt – Botanik und Molekulare Genetik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Walter Leitner, Dennis Weidener,**  
ITMC – Technische und Petrochemie, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Peter Westhoff, Dr. Elena Pestsova,**  
Institut für Entwicklungs- und Molekularbiologie der Pflanzen,  
HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Markus Pauly, Dr. Murali Dama,**  
Institut für Pflanzliche Zellbiologie und Biotechnologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke, Arne Holtz, Martin Leipnitz,**  
AVT – Fluidverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr.-Ing. Alexander Mitsos, Dr.-Ing. Jörn Viell, Alexandra Weber-Bernard,**  
AVT – Systemverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Dr. Laura Carraresi, Lora Tsvetanova,**  
ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship,  
Universität Bonn

<sup>1</sup> Neue Adresse: IBG-4 Bioinformatik, Forschungszentrum Jülich

## Wohldosiert und regenfest: weniger Pestizide dank Mikro-Containern

**Das übergeordnete Ziel des FocusLabs „greenRelease“ ist es, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln signifikant zu reduzieren und damit einen Beitrag zu einer nachhaltigen Landwirtschaft und Bioökonomie zu leisten. Dreh- und Angelpunkte der von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern entwickelten und erfolgreich patentierten greenRelease-Technologie sind Mikrogele, die mit Wirkstoffen beladen werden und durch maßgeschneiderte Moleküle längerfristig an den Pflanzen haften.**

Im Laufe des Projektes haben die Forschenden die greenRelease-Technologie, die in den BioSC-Projekten „GreenGel“, „BiFuProts“ und „RIPE“ initiiert wurde, zu einer robusten und im Feld validierten Plattformtechnologie für den Pflanzenschutz entwickelt. Die Technologie wurde in Feldversuchen eingesetzt, die von der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen im Jahr 2020 durchgeführt wurden. Es konnte der gleiche Schutz gegen Apfelschorf mit einem dreifach reduzierten Fungizideinsatz im Vergleich zu kommerziellen Produkten erzielt werden. Parallel dazu wurde eine regulatorische und wirtschaftliche Bewertung der Technologie durchgeführt, um das Technologietransferpotenzial von greenRelease zu evaluieren.



## Dem Regen trotzen

Viele Pflanzenschutzmittel haben eine inhärente Schwäche: Die Wirkstoffe haften nicht ausreichend an den zu schützenden Pflanzen und werden durch Regen in den Boden sowie in das Grundwasser ausgewaschen. Genau diese Herausforderungen werden durch die greenRelease-Technologie angegangen. Sie basiert auf der Kombination von biokompatiblen Mikrogel-Containern, die nur 100 Nanometer bis zehn Mikrometer messen, und speziellen Molekülen, sogenannten Ankerpeptiden, mit ebenfalls winzigen Maßen von weniger als zehn Nanometern. Mikrogele sind weiche, poröse Polymerkolloide, die mit Wirkstoffen beladen werden und durch maßgeschneiderte Ankerpeptide auf Pflanzenblättern bei Umgebungstemperatur durch einfache Sprühanwendungen anhaften.

Der Hauptvorteil der greenRelease-Technologie gegenüber bestehenden Freisetzungstechnologien ist zunächst die kontrollierte und induzierte Freisetzung von Wirkstoffen über Wochen und Monate hinweg. Zudem verzeichnet die neue Technologie minimierte Verluste durch eine hohe Regenfestigkeit und eine sehr gute Pflanzenverträglichkeit. Darüber hinaus ist die biologische Abbaubarkeit der Mikrogele einstellbar. Im Jahr 2018 wurde die greenRelease-Technologie mit dem Innovationspreis der BioRegionen in Deutschland ausgezeichnet.

## Maßgeschneiderte Moleküle für bessere Haftung

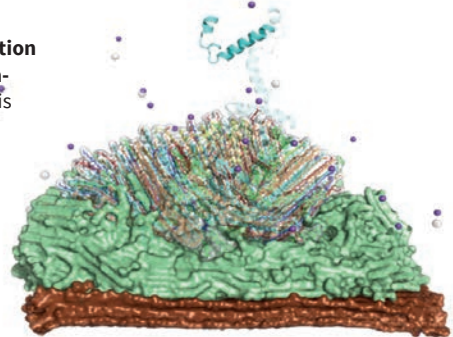
Ankerpeptide sind winzige Eiweißmoleküle und bestehen aus nur zehn bis 100 Aminosäuren. Durch ihre spezielle Struktur binden sie bei Raumtemperatur auch bei einfacher Sprühanwendung an Oberflächen. Die Bindungsstärke eines Ankerpeptids an eine bestimmte Oberfläche kann durch „Protein-Engineering“ für die vorherrschenden Bedingungen maßgeschneidert werden. Im Rahmen des greenRelease-Projektes wurden Ankerpeptide mit einer starken Bindung an Blätter und Früchte aller ausgewählten Zielkulturen, Apfel, Zuckerrübe, Kartoffel und Gerste, identifiziert. Die Forscher entwickelten ein Protokoll für die gelenkte Evolution von Ankerpeptiden, um die Regenfestigkeit dieser Moleküle weiter zu erhöhen. Um die Ankerpeptide für eine regenfeste Bindung weiter zu optimieren ist es wichtig, die Interaktionen zwischen Ankerpeptiden und der Blattoberfläche zu verstehen. Deshalb wurde die gelenkte Evolution durch Computer-

simulationen komplementiert und erste Erkenntnisse über die Bindung der Ankerpeptide an Pflanzenblättern wurden gewonnen.

## Wirkstoffe gezielt freisetzen

Mikrogele sind „intelligente“ Materialien, die eine schnelle Reaktion auf äußere Reize zeigen. Sie sind vielversprechende Kandidaten für viele Anwendungsbereiche, zum Beispiel zum Transport von Proteinen, Mikronährstoffen und Vitaminen oder die gezielte Freisetzung von Medikamenten. Das Team entwickelte Mikrogel-Container mit polaren oder unpolaren Domänen und belud diese mit verschiedenen Wirkstoffen, wie Pestiziden und Herbiziden, damit die Wirkstoffe anschließend über mehrere Wochen hinweg freigesetzt werden. Mittels Molekulardynamik-Simulationen konnten nicht nur Einblicke gewonnen werden, wie die kleinsten Mikrogel-Bausteine auf unterschiedliche Temperaturen reagieren, sondern auch in ihren Wachstumsprozess. Diese Modelle wurden verwendet, um die Aufnahme- und Freisetzungprozesse von Fungiziden und Herbiziden zu beschreiben. Mit den gewonnenen Erkenntnissen optimierten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anschließend die Mikrogele für eine langsame und langfristige Freisetzung von Wirkstoffen.

**Gesteuerte Simulation der Molekulardynamik** zum Verständnis der Bindung von Ankerpeptiden an die Oberfläche eines Apfelblatts



Innerhalb von nur zwei Jahren gelang es, die Produktmenge der greenRelease-Formulierung von nur 150 Millilitern für Laborversuche auf 120 Liter für einen ersten Einsatz im Feld zu steigern. Im Jahr 2020 starteten dann erste Freilandversuche in einer Apfelplantage bei der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.



## Schlagkräftiges Duo

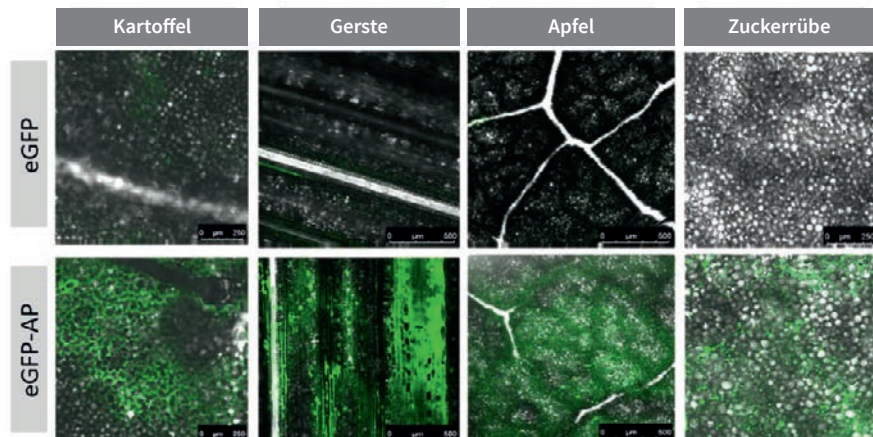
Damit die mit Wirkstoffen beladenen Mikrogel-Container besser an Blatt- oder Fruchtoberflächen haften, wurden sie mit Ankerpeptiden bestückt. Diese Biohybride werden im Folgenden als „greenRelease-Mikrogele“ bezeichnet. Die Bindung der Mikrogele mittels Ankerpeptiden an der Oberfläche ausgewählter Zielpflanzen wurde mittels Fluoreszenz- und Elektronenmikroskopie bestätigt. Es wurden Ankerpeptide identifiziert, welche die Mikrogele regenfest an die Blattoberfläche binden. Zudem zeigte die Elektronenmikroskopie, dass sich die Mikrogele nach dem Besprühen gleichmäßig in einer homogenen Schicht auf den Blattoberflächen verteilen und somit eine optimale Schutzwirkung gegen Krankheitserreger gewährleistet werden kann.

Die greenRelease-Mikrogele wurden mit zwei Fungiziden und zwei Herbiziden beladen und ihre Freisetzungseigenschaften bestimmt. Ein besonderer Fokus wurde auf das Kontaktfungizid Kupfer gelegt, da eine Reduktion der Aufwandmenge sowohl für die integrierte als auch die ökologische Landwirtschaft von großer Bedeutung ist. Die Sprühanwendung der Mikrogele veränderte oder beeinflusste weder die photosynthetische Aktivität noch das Blattwachstum negativ, was auf keine phytotoxischen Effekte auf Nutzpflanzen schließen lässt. Ein weiterer Aspekt der Biokompatibilitätstests und der allgemeinen Nachhaltigkeit ist die Einschätzung von potenziellen Effekten der greenRelease-

Technologie auf die boden- und blattassoziierten Mikrobiome. Mikroorganismen des Bodens können umfangreich zu Pflanzenwachstum und -gesundheit beitragen und stellen einen wichtigen Faktor in der Bewertung von Umweltauswirkungen verschiedener Substanzen dar.

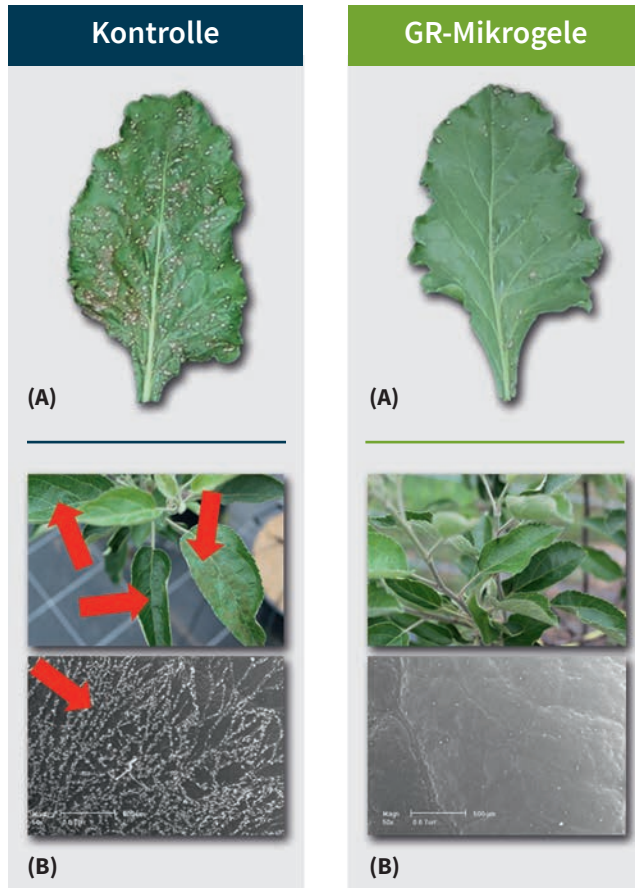
Die Auswirkungen der Mikrogele wurden sowohl im Labor als auch in Feldexperimenten durchgeführt. In Laborexperimenten wurde beobachtet, inwiefern sich die Aktivität und Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft ändert, nachdem Bodenproben mit verschiedenen Komponenten der greenRelease-Technologie versetzt wurden. Dies wurde anhand von Hochdurchsatz-Sequenzierungen zur Analyse mikrobieller Gemeinschaften und mikrobieller Respirationsmessungen – also der Atmungsaktivität der Kulturen – ermittelt. Der sich zeigende Anstieg der relativen Häufigkeit weniger Bakterienstämme über die Zeit infolge der Inkubation mit greenRelease-Mikrogelen, gekoppelt an einen temporären Anstieg der Atmungsaktivität, deuten auf Reaktionen der Bodenmikroorganismen hin. Diese Ergebnisse werden in laufenden Experimenten bis zum Projektende weiter intensiv untersucht. Bislang belegen unsere Experimente, dass die greenRelease-Technologie eine vielversprechende Formulierung von Agrochemikalien darstellt, ohne das Pflanzenwachstum, die Pflanzengesundheit und die umgebende Umwelt, wie das Mikrobiom, negativ zu beeinflussen.

**Mit Ankerpeptiden bestückte Mikrogele** unter dem Mikroskop. Ein Fluoreszenzmarker macht hierbei die Ankerpeptidmoleküle sichtbar.



## Geringer Einsatz – große Wirkung

Die schützende Wirkung der greenRelease-Technologie wurde für Zuckerrüben und Äpfel bewertet. Die Wirksamkeit der mit Kupfer beladenen Mikrogele wurde in Labor- sowie in Feldversuchen bestätigt. Es zeigte sich, dass eine Behandlung von Zuckerrübenpflanzen mit kupferbeladenen greenRelease-Mikrogelen



**greenRelease-Mikrogele (GR-Mikrogele) mit inkorporiertem Kupfer** schützen Zuckerrüben und Äpfel vor einer Infektion mit pilzlichen Pathogenen. Auch mit bloßem Auge ist der Schutz von Zuckerrüben gegen den Pilz *Cercospora beticola* zu erkennen (A). Der Schutz von Äpfeln gegen den im Obstbau gefürchteten Pilz *Venturia inaequalis* wird unter dem Mikroskop sehr deutlich (B).

dazu führt, dass die Symptomausprägung der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, verursacht durch den Pilz *Cercospora beticola*, deutlich reduziert wird. Zudem wurde der Befall mit Apfelschorf an Apfelbäumen, verursacht durch den im Obstbau gefürchteten Pilz *Venturia inaequalis*, nach einer Behandlung mit kupferbeladenen Mikrogelen stark vermindert.

Unter kontrollierten Laborbedingungen reichte bereits eine rund 40-fach geringere Kupferkonzentration aus, als sie üblicherweise in kommerziellen Referenzprodukten vorhanden ist, um einen Befall mit *Cercospora beticola* zu verhindern. Die beladenen greenRelease-Mikrogele vermitteln bei diesen geringen Konzentrationen einen besseren Schutz als kommerzielle Referenzprodukte, vor allem dann, wenn Niederschläge simuliert wurden, die ein Abwaschen der Fungizide zur Folge haben.

Bei den Versuchen mit Äpfeln schützten die mit Kupfer beladenen greenRelease-Mikrogele bei sehr geringen Kupferkonzentrationen sowohl unter kontrollierten Bedingungen als auch in Freilandversuchen besser vor einer Infektion mit *Venturia inaequalis* als die eingesetzten kommerziellen Produkte. Auch hier lag unter kontrollierten Bedingungen die Kupferkonzentration rund 40-fach niedriger als in kommerziellen Referenzprodukten.

Vor allem die Freilandversuche in der Apfelbaumplantage, welche durch die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurden, konnten eindrucksvoll bestätigen, dass der Einsatz der greenRelease-Technologie zukünftig dabei helfen kann, den Gesamtkupfereintrag pro Saison stark zu reduzieren. Im Vergleich zu Standard-Kupferformulierungen benötigte die greenRelease-Technologie im Freiland dreimal weniger Kupfer, um Apfelpflanzen effektiv vor Apfelschorf zu schützen. Durch eine Weiterentwicklung der Technologie wird eine weitere deutliche Reduktion der Einsatzmengen erwartet, da dies unter kontrollierten Bedingungen bereits erfolgreich demonstriert wurde.

## Erfolgreich im Wettbewerb

Die Technologieentwicklung wird durch eine wirtschaftliche und regulatorische Bewertung der greenRelease-Technologie komplementiert. Unter anderem wurde die Technologielandschaft von Mikrogelen und Ankerpeptiden für die Pflanzengesundheit



**Übersicht über das Versuchsfeld in Köln** bei der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Hier wurde das Konzept der greenRelease-Technologie im Feldversuch validiert.

evaluiert. Des Weiteren bewerteten die Forschenden verschiedene Markteintrittsoptionen sowie Technologietransfermechanismen, um so eine Gesamtübersicht des Technologietransferpotenzials der greenRelease-Technologie zu erhalten. Durch die Entwicklung eines Businessplans wurden verschiedene Markteintrittsoptionen und Technologietransfermechanismen abgeleitet und bewertet.

Das Forscherteam führte mehrere Experteninterviews mit Landwirten, zwei Geschäftsmodell-Workshops mit Projektpartnern und eine strukturierte Nutzerbefragung mit 150 potenziellen Anwendern der greenRelease-Technologie durch. Darüber hinaus entwickelte das Team sogenannte Customer Journey Maps für den Anbau verschiedener Nutzpflanzen. Hierbei wurden landwirtschaftspezifische Problemfelder identifiziert, die zeigen, an welchem Punkt während einer Saison ein Landwirt mit bestimmten Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Anbau einer bestimmten Nutzpflanze konfrontiert ist.

Aufbauend auf den spezifischen Problemfeldern und Berührungspunkten konnte gezeigt werden, wie greenRelease bestimmte Herausforderungen angeht und Landwirte in ihrem Tagesgeschäft unterstützen kann. Um das Marktpotenzial der greenRelease-Technologie besser abschätzen zu können, wurden ihre Vorteile mit Industriepartnern aus dem Technologietransfer-Beirat sowie mit weiteren Akteuren entlang der Wertschöpfungskette, wie zum Beispiel landwirtschaftlichen Zulieferern, diskutiert. Im Businessplan stellen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Geschäftsidee, die Zielkundengruppe so-

wie die Ergebnisse der Anwenderbefragung und der Geschäftsmodell-Workshops dar.

Dieser umfangreich recherchierte und ausgefeilte Businessplan wurde 2019 beim Biogründer-Wettbewerb eingereicht. Hier konnten sowohl die Jurymitglieder aus verschiedenen Branchen sowie der Politik vom hohen Transferpotenzial der greenRelease-Technologie überzeugt und damit der erste Platz vor 40 weiteren Mitbewerbertteams belegt werden.

Das postulierte Ziel, eine im Feld validierte Freisetzungstechnologie zu entwickeln, wurde von den Partnern erfolgreich erreicht und die greenRelease-Technologie ist nun bereit für Folgeprojekte und Innovationen in einer nachhaltigen Landwirtschaft und Bioökonomie.

#### Ansprechpartner

**Dr. Felix Jakob,**  
 ABBt – Biotechnologie, RWTH Aachen,  
 f.jakob@biotec.rwth-aachen.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Ulrich Schwaneberg, Dr. Felix Jakob, Christin Brethauer, Liudmyla Goncharenko,**  
 ABBt – Biotechnologie, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Uwe Conrath, Dr. Caspar Langenbach, Patrick Schwinges,**  
 ABBt – Pflanzenphysiologie, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Andrij Pich, Alexander Töpel, Tim Sassmann, Xu Wenjing,**  
 ITMC – Funktionale und interaktive Polymere, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Dr. Michael Wustmans,**  
 ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship, Universität Bonn

**Prof. Dr. Georg Groth, Dr. Alexander Hofmann,**  
 Institut für Biochemische Pflanzenphysiologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Holger Gohlke, Jonas Dittrich,**  
 Institut für Pharmazeutische und Medizinische Chemie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Georg Noga, Dr. Shyam Pariyar,**  
 INRES – Gartenbauwissenschaften, Universität Bonn

**Prof. Dr. Claudia Knief, Janina Zierul, Romy Geer,**  
 INRES – Molekularbiologie der Rhizosphäre, Universität Bonn

**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Fabio Fiorani, Dr. Henning Lenz,**  
 IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich

## Bakterielle Zellfabrik für neuen Süßstoff

**Bioprozesse mit Mikroorganismen als Biokatalysatoren spielen bei der Etablierung einer nachhaltigen Bioökonomie eine entscheidende Rolle. Im Rahmen des BioSC Boost-Fund-Projektes „Gluconobacter Factory“ wurde in einem interdisziplinären Forschungsansatz das Essigsäurebakterium *Gluconobacter oxydans* hinsichtlich molekularer Grundlagen und Anwendungspotenziale erforscht. Daraus resultierte unter anderem ein hocheffizienter Produktionsprozess für einen potenziellen neuen Süßstoff, der natürlich und kalorienarm ist.**

Viele biotechnologische Produktionsprozesse gehen von Zuckern wie Glucose, Fruktose oder Saccharose aus. Diese werden von Mikroorganismen üblicherweise zunächst in das Innere der Zelle, das Cytoplasma, transportiert und dort über eine Vielzahl von enzymkatalysierten Schritten in das gewünschte Produkt umgesetzt, das dann wieder aus dem Cytoplasma exportiert werden muss. Bei *Gluconobacter* laufen zahlreiche Produktionsprozesse jedoch außerhalb des Cytoplasmas ab, im Periplasma, dem Raum zwischen der Cytoplasmamembran und der äußeren Membran. Dort sitzen Enzyme, genannt Dehydrogenasen, die Zucker und andere Kohlenhydrate hochspezifisch an einem bestimmten Kohlenstoffatom oxidieren. Die dabei frei werdenden





Elektronen werden über andere Enzyme (Cytochrom-Oxidasen) auf Sauerstoff übertragen, der dabei zu Wasser umgesetzt wird. Solche spezifischen Oxidationen sind rein chemisch nur sehr schwierig oder überhaupt nicht möglich, weshalb hier die überlegenen Fähigkeiten von Mikroorganismen gefragt sind. Das Bakterium *Gluconobacter oxydans* wird aus diesen Gründen bereits seit den 1930er Jahren industriell bei der Herstellung von Vitamin C genutzt. Um das biokatalytische Potenzial dieses Bakteriums noch besser und breiter nutzen zu können, arbeitete ein interdisziplinäres Team an der detaillierten Analyse der genetischen Information und der Entwicklung neuer Produktionsstämme und Produkte.

### 2.664 Gene analysieren

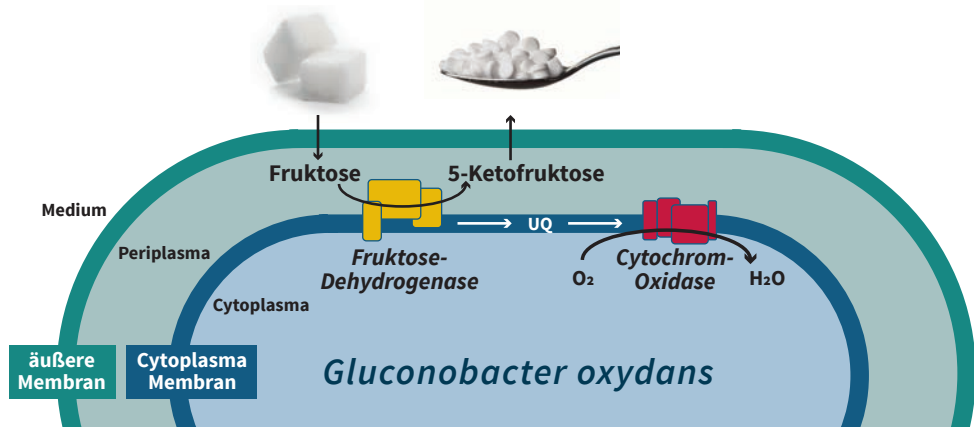
Die genetische Information von *Gluconobacter oxydans* in Form von Desoxyribonukleinsäure (DNS) ist in einem zirkulären Chromosom aus 2,7 Millionen Basenpaaren mit 2.432 Genen und fünf Plasmiden mit nochmals insgesamt 232 Genen organisiert. Die Frage, wie die mehr als 2.600 Gene von *Gluconobacter oxydans* in Transkriptionseinheiten organisiert sind und welche Kontrollsequenzen die Übersetzung der DNS in Ribonukleinsäuren (RNS) steuern, wurde durch die Sequenzierung der RNS und anschließende bioinformatische Analysen beantwortet. Diese umfang-

Im **BioSC Boost-Fund-Projekt „Gluconobacter Factory“** arbeiten Mikrobiologen, Molekulargenetiker, Bioinformatiker und Bioverfahrenstechniker zusammen, um die besonderen Fähigkeiten der mikrobiellen Zellfabrik *Gluconobacter oxydans* für die Entwicklung neuer Bioprozesse im Kontext der Bioökonomie zu nutzen.

reichen Informationen werden der wissenschaftlichen Gemeinschaft auf einer frei zugänglichen webbasierten Bioinformatik-Plattform unter [www.gluconobacterfactory.de](http://www.gluconobacterfactory.de) zur Verfügung gestellt.

Bei der industriellen Nutzung von *Gluconobacter oxydans* müssen zunächst einmal große Mengen an Zellen des Bakteriums gezüchtet werden. Dabei haben die speziellen Eigenschaften von *Gluconobacter oxydans* einen Nachteil: Aus einem Kilogramm Glucose können nur etwa 100 Gramm Zellen gewonnen werden, während bei Bakterien mit gewöhnlichem Stoffwechsel etwa 500 Gramm Zellen erhalten werden. Das heißt, die Zellgewinnung ist bei *Gluconobacter oxydans* deutlich teurer. Durch gezielte Veränderung der Glucose-Verstoffwechslung, dem sogenannten Metabolic Engineering, konnte ein Stamm konstruiert werden, der 160 Gramm Zellen pro einem Kilogramm Glucose liefert und damit eine Verringerung der Kosten für die Zellgewinnung ermöglicht.

**Umwandlung von Fruktose in 5-Ketofruktose** mit *Gluconobacter oxydans*: Mithilfe der Fruktose-Dehydrogenase wird Fruktose hochspezifisch zu 5-Ketofruktose oxidiert und die dabei frei werdenden Elektronen durch die Cytochrom-Oxidase auf Sauerstoff übertragen, der dabei zu Wasser reduziert wird.



### Kalorienarmen Süßstoff produzieren

Aufgrund seiner speziellen Eigenschaften ist *Gluconobacter oxydans* hervorragend geeignet, um membrangebundene periplasmatische Enzyme auch aus anderen Bakterien zu synthetisieren und ihre Eigenschaften und Anwendungspotenziale zu untersuchen. Als besonders vielversprechend erwies sich dabei die Fruktose-Dehydrogenase aus dem verwandten Bakterium *Gluconobacter japonicus*. Dieses Enzym besteht aus drei verschiedenen Untereinheiten und katalysiert hochspezifisch die Oxidation von Fruktose zu 5-Ketofruktose. 5-Ketofruktose ist ein sehr interessantes Produkt, weil die Verbindung einerseits einen vergleichbaren Geschmack und eine ähnliche Süßkraft hat wie die Fruktose selbst, aber andererseits im Gegensatz zu Fruktose von unserer Darmflora anscheinend nicht oder nur geringfügig verstoffwechselt wird. Das sind genau die Eigenschaften, die ein kalorienarmer Süßstoff besitzen sollte. Das Potenzial zur technischen Herstellung von 5-Ketofruktose aus Fruktose mit *Gluconobacter oxydans*-Zellen, welche die Fruktose-Dehydrogenase überproduzieren, wurden vom Projekt-Team durch Methoden der Bioverfahrenstechnik evaluiert und optimiert. Dabei konnte ein Prozess entwickelt werden, mit dem 490 Gramm 5-Ketofruktose pro Liter mit einer Produkt-Ausbeute von 0,92 Gramm pro eingesetztem Gramm Fruktose und einer Raum-Zeit-Ausbeute von 7 Gramm pro Liter und Stunde produziert werden konnte. Damit wurde gezeigt, dass eine wirtschaftliche Herstellung dieses potenziellen Süßstoffs möglich ist. In weiteren Studien muss nun die Verträglichkeit der 5-Ketofruktose nachgewiesen werden.

### Patent angemeldet

Das Projekt zeigt, dass das Konzept der interdisziplinären Zusammenarbeit im Rahmen von Boost-Fund-Forschungsprojekten erfolgreich und auch für die Zukunft äußerst vielversprechend ist. Es ermöglicht Grundlagenforschung als Basis für Innovationen und die Etablierung einer auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Bioökonomie. Aus dem GLUFACT-Projekt resultierten eine Patentanmeldung und sieben Originalpublikationen in begutachteten Fachzeitschriften. Es folgten zwei BMBF-geförderte Forschungsverbünde (IMPRES und IMPRES-2), in denen die 5-Ketofruktose-Produktion weiterentwickelt sowie neue Produkte für die humane Ernährung etabliert wurden.

#### Ansprechpartner

Prof. Dr. Michael Bott,  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich,  
m.bott@fz-juelich.de

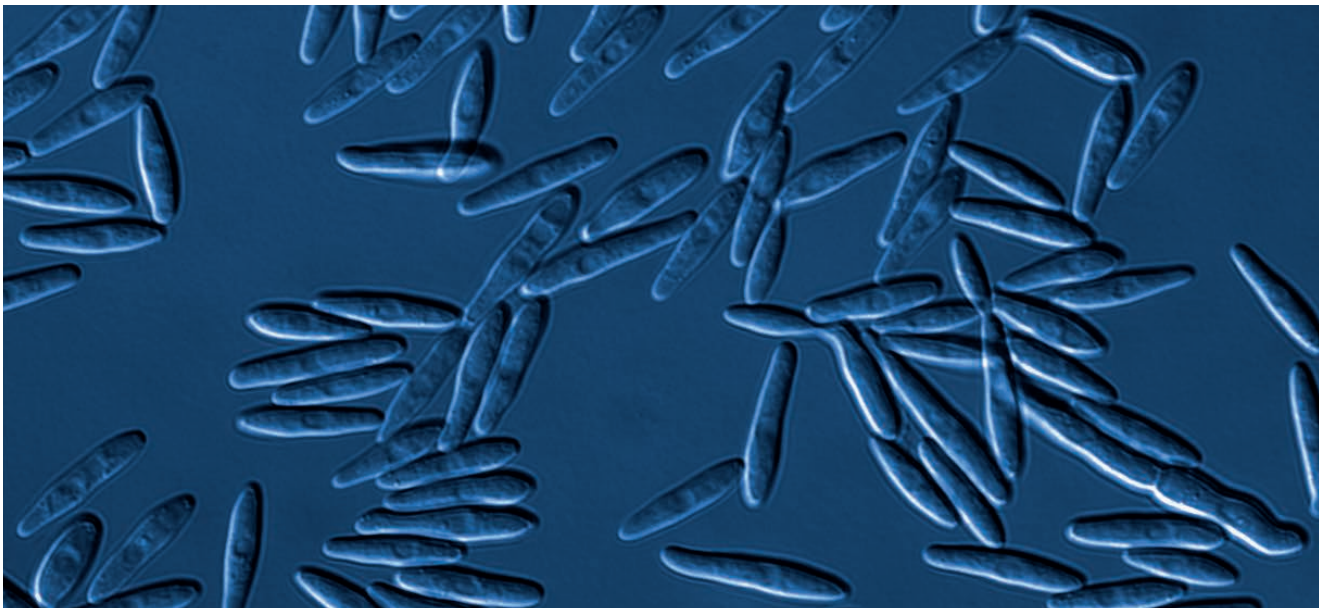
#### Beteiligte Core Groups

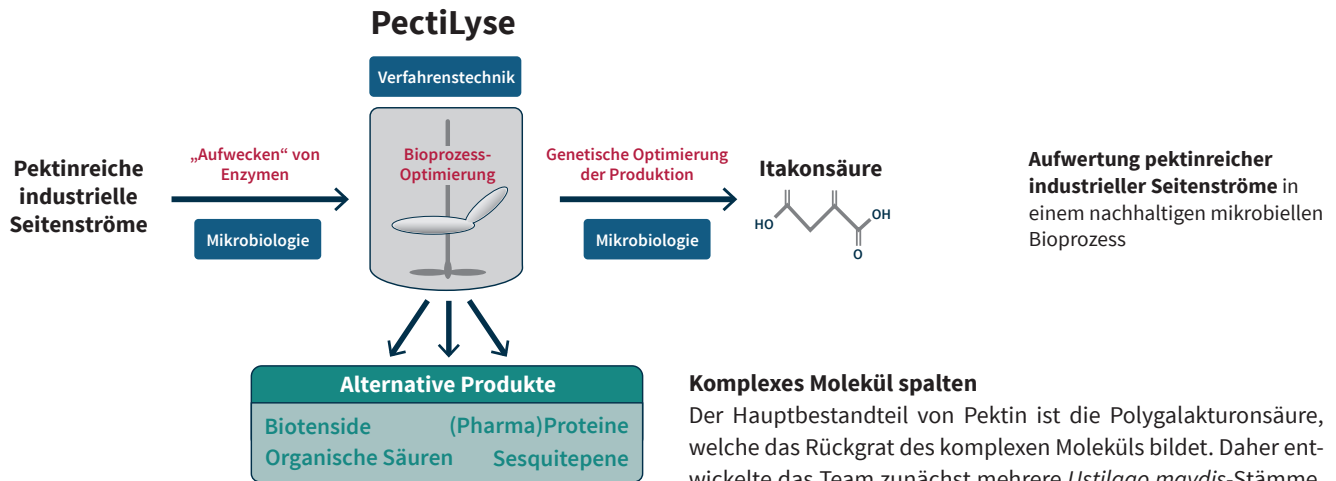
Prof. Dr. Michael Bott, Dr. Stephanie Bringer, Dr. Ines Kiefler,  
Dr. Tino Polen, Dr. Angela Kranz,  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich  
Prof. Dr. Björn Usadel, Dr. Alexander Vogel,  
IBG-4 Bioinformatik, Forschungszentrum Jülich  
Prof. Dr. Uwe Deppenmeier, Dr. Konrad Kosciow, Dr. Anna Siemen,  
Institut für Mikrobiologie und Biotechnologie, Universität Bonn  
Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs, Dr. Elena Herweg,  
AVT – Bioverfahrenstechnik, RWTH Aachen

## Vom Feld zur Plattformchemikalie: Verwertung von Zuckerrübenresten

Das BioSC Boost-Fund-Projekt „PectiLyse“ hatte das Ziel, für den Abbau von pektinreicher Biomasse den pilzlichen Modell-Organismus *Ustilago maydis* einzusetzen. Bei der Zuckerproduktion aus Zuckerrüben fallen große Mengen von organischen Seitenströmen an. Diese weisen einen hohen Gehalt des komplexen Polysaccharids Pektin auf. Bisher werden die pektinhaltigen Seitenströme mit geringer Wertschöpfung als Tierfutter verkauft. Im Projekt „PectiLyse“ sollten grundlegende Methoden etabliert werden, um in Zukunft aus diesen organischen Resten wertvollere Produkte in einem integrierten Bioprozess zu gewinnen.

Ein Konsortium von Forscherinnen und Forschern verschiedener Fachrichtungen erlaubte es dabei, die Fragestellung des Projektes interdisziplinär anzugehen: Mikrobiologen mit der Expertise für die genetische Manipulation des Pilzes sowie für die Produktion von organischen Säuren haben mit führenden Bioprozesstechnikern ein schlagkräftiges Team gebildet. Dies ermöglichte die Verfolgung eines ganzheitlichen Ansatzes, in dem optimierte Stämme effizient mittels Online-Analytik charakterisiert werden konnten.





Der Pilz *Ustilago maydis* besitzt einige Attribute, die ihn für die Entwicklung eines integrierten Bioprozesses besonders qualifizieren. Im Gegensatz zu anderen bekannten pektinabbauenden Pilzen kann *Ustilago maydis* nicht nur filamentös, sondern auch hefeartig wachsen. Dies bringt entscheidende Vorteile in der Handhabung und vor allem in der Kultivierung mit sich. *Ustilago maydis* infiziert in der Natur Maispflanzen und löst den sogenannten Beulenbrand aus. Für den Menschen ist er jedoch ungefährlich. Infizierte Maiskolben sind sogar für den menschlichen Konsum geeignet und werden in Mexiko als Delikatesse gehandelt. Hefeartig wachsende Laborstämme sind für Pflanzen nicht infektiös und eignen sich hervorragend für die Biotechnologie.

Die Eigenschaft des Pflanzenpathogens spiegelt sich im Enzymrepertoire von *Ustilago maydis* wider: Im Gegensatz zu anderen Modellpilzen wie der Bäckerhefe besitzt *Ustilago maydis* bereits Enzyme für die Verstoffwechslung vieler in Pektin enthaltener Einzelzucker. Zudem existieren weitere Enzyme, die für den Pektinabbau in diese Einzelzucker von Nutzen sind. Leider werden diese nur in der infektiösen Phase während der Maisbesiedlung gebildet. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die entsprechenden Enzyme durch molekularbiologische Veränderungen quasi aufgeweckt und damit aktiviert. Mithilfe dieses „sleeping beauty“-Prinzips konnten die gewünschten Enzyme nun auch erfolgreich in der Hefe-Phase produziert und aus der Zelle ausgeschleust werden. Dies ermöglicht eine Ausweitung des Substratspektrums.

### Komplexes Molekül spalten

Der Hauptbestandteil von Pektin ist die Polygalakturonsäure, welche das Rückgrat des komplexen Moleküls bildet. Daher entwickelte das Team zunächst mehrere *Ustilago maydis*-Stämme, die unterschiedliche Enzyme für den Abbau von Polygalakturonsäure produzieren und ausscheiden. Dabei untersuchten die Forschenden zum Beispiel das pilzeigene Enzym Endo-Polygalakturonase und bewerteten seine Effektivität. Darüber hinaus übertrugen sie per Gentransfer weitere bereits charakterisierte, potente Enzyme aus anderen Bakterien und Pilzen in ihren Modellorganismus *Ustilago maydis*. Das Ergebnis: Auch die fremden Enzyme werden erfolgreich von diesem Labor-Pilz produziert und problemlos in das Nährmedium abgegeben. Für die Produktion der bakteriellen Enzyme wird der Umstand ausgenutzt, dass *Ustilago maydis* über einen unkonventionellen Sekretionsweg verfügt, der diese Enzyme unverändert – also mit vollem Aktivitätspotenzial – in die Umgebung entlässt.

Dieser breit gefächerte Ansatz ermöglichte die Identifizierung von Pilz-Stämmen, die verschiedene aktive pektinolytische Enzyme exportierten. Durch den Einsatz von Mischkulturen, von Stämmen mit komplementären Enzymaktivitäten, wurde abschließend ein effizienter Abbau von Polygalakturonsäure (PolyGalA) zum Baustein Galakturonsäure (GalA) erzielt, die daraufhin vom Pilz verstoffwechselt wurde. Das Projekt legte somit den Grundstein für weitere Schritte in Richtung des Abbaus pektinreicher Biomasse.

Um den Polygalakturonsäureabbau erfolgreich zu etablieren, war der Einsatz von moderner Online-Analytik aus der Bioverfahrenstechnik zur Evaluierung der erstellten Stämme maßgebend.



lich. Dabei wurden die Pilz-Stämme auf Polygalakturonsäure kultiviert und zeitgleich ihre Atmungsrate im Verlauf der Kultivierung ermittelt. Die Auswertung der Daten ermöglichte eine Charakterisierung der einzelnen Stämme in Bezug auf den jeweiligen Substratumsatz und die Enzymaktivität. So konnte eine indirekte Quantifizierung der Polygalakturonsäurekonzentration basierend auf der Atmungsrate erreicht werden. Auch Mischkulturen konnten auf diese Weise effizient analysiert werden.

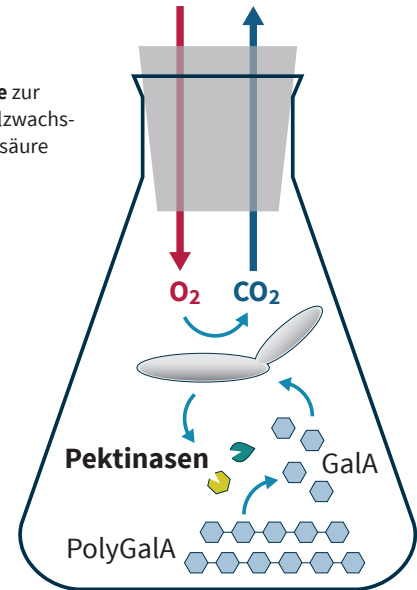
### Weitere Produkte im Fokus

Als Beispiel für ein wertvolles Industrieprodukt fokussierte sich das Forscherteam zunächst auf die organische Säure Itakonat, die von *Ustilago maydis* natürlicherweise unter Stickstoffmangel produziert wird. Sie ist eine wichtige Plattformchemikalie in der Polymerchemie. Ihr Einsatzfeld reicht von der Produktion von Farben und Lacken über Verdickungsmittel für Fette, Pharmazeutika oder als Herbizid bis hin zu biologisch abbaubaren Polymeren. Die Biosynthese von Itakonat wird durch ein Gencluster reguliert und erwies sich beim Vergleich unterschiedlicher *Ustilago maydis*-Stämme als stark schwankend. Besonders in dem für die Sekretion von pektinabbauenden Enzymen genutzten Stammhintergrund war nur eine geringe Itakonatproduktion zu beobachten. Durch den Vergleich der biosynthetischen Enzyme auf Genomebene mit verwandten Brandpilzen konnten neue genetische Ansätze entwickelt werden, um diese Schwankungen zu beheben. Dem Team gelang es hierbei, den zentralen Regulator des Genclusters durch einen genetischen Kniff dauerhaft zu aktivieren. Dies erwies sich als hervorragende Stellschraube für ein hohes Grundniveau der Itakonatproduktion. Das Verfahren legt den Grundstein für den angestrebten Bioprozess.

In „PectiLyse“ konnten somit sowohl auf der Ebene des Substratabbaus als auch auf der Ebene der Itakonatproduktion erste grundlegende Schritte auf dem Weg zu einem effizienten Bioprozess etabliert werden. Dies war nur durch ein Team möglich, das in den Bereichen Mikrobiologie, Biotechnologie und Bioingenieurwissenschaften eng zusammenarbeitete. Zukünftig werden die Forscherinnen und Forscher den Pilz weiter für den Abbau von Pektin optimieren. Gleichzeitig arbeiten sie an einem konsolidierten Bioprozess, bei dem aus den frei werdenden fermentierbaren Zuckern weitere wertvolle Moleküle entstehen.

Neben Itakonat sind auch andere Produkte wie Biotenside, organische Säuren, Sesquiterpene, die als Duft- und Aromastoffe eingesetzt werden, oder Pharmaproteine denkbar. Die Produktion von Biotensiden wurde im BioSC „FocusLab Bio<sup>24</sup>“ erfolgreich etabliert. Somit könnte *Ustilago maydis* basierend auf den interdisziplinären Arbeiten im Rahmen des BioSC zeitnah als flexibler Plattformorganismus für die industrielle Biotechnologie dienen.

**Online-Messtechnologie** zur Charakterisierung des Pilzwachstums auf Polygalakturonsäure



57

#### Ansprechpartnerin

**Dr. Kerstin Schipper**,  
Institut für Mikrobiologie, HHU Düsseldorf,  
schipper@hhu.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Michael Feldbrügge, Dr. Kerstin Schipper,  
Dr. Benedikt Steuten, Dr. Peter Stoffels**,  
Institut für Mikrobiologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Lars M. Blank, Prof. Dr. Nick Wierckx<sup>1</sup>,  
Dr. Elena von Helden (née Geiser)**,  
ABBt – Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen

**Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs, Dr. Markus Müller, Dr. Tino Schlepütz**,  
AVT – Bioverfahrenstechnik, RWTH Aachen

<sup>1</sup> Neue Adresse: IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich

● SEED FUND 2.0 **R2HPBio**

## Von der Biomasse zum Hochleistungskunststoff

**Im Projekt „R2HPBio“ wurde ein integrativer Ansatz entlang der ganzen Wertschöpfungskette für die Herstellung von Biokunststoffen verfolgt. Ein speziell entwickeltes Kristallisationsverfahren reinigt aus einer Fermentationsbrühe eine Bandbreite an potenziellen Plattformchemikalien auf. Diese werden mit neuartigen Katalysatoren zu Kunststoffen verarbeitet, welche durch nachfolgende Modifikationen mit maßgeschneiderten Eigenschaften versehen werden können. Die so entstehenden Materialien sind bioabbaubar, aus nachwachsenden Rohstoffen herstellbar und haben Potenzial für eine Vielzahl praktischer Anwendungen.**

„R2HPBio“ umfasst den gesamten Lebenszyklus von neuartigen Biokunststoffen. Das Projekt ist eng mit dem FocusLab „HyMPAct“ verknüpft, welches aus nachwachsenden Rohstoffen wichtige Plattformchemikalien erzeugt und für die weitere Aufreinigung zur Verfügung stellt. Die Plattformchemikalien wurden im Rahmen des „R2HPBio“-Projektes mit moderner elektrochemisch induzierter Trenntechnologie aufgereinigt, um diese mit robusten Metallkomplekxkatalysatoren zu linearen, biofunktionalen Polyestern umzusetzen. Im Anschluss wurden die Biokunststoffe durch Funktionalisierung für spezifische Anwendungen optimiert und auf ihre Abbaubarkeit hin untersucht.

58



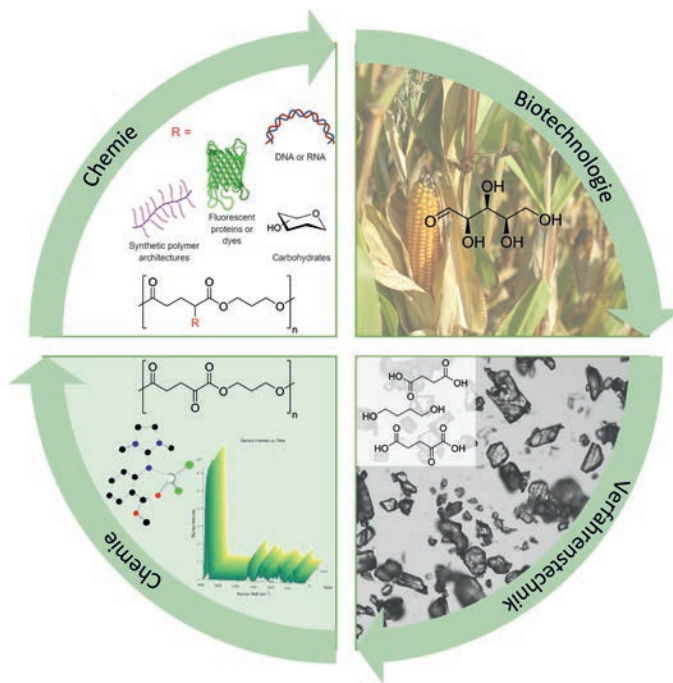
## Kosten reduzieren

Die im FocusLab „HylmPAct“ biotechnologisch hergestellten Plattform-Moleküle wie Bernsteinsäure, 1,4-Butandiol und Protocatechusäure sind vielversprechende Monomere für neuartige Biokunststoffe. Die Aufarbeitung dieser Moleküle aus wässrigen Fermentationsmedien ist jedoch aufwendig und kostenintensiv. Im Projekt „R2HPBio“ wurde ein neues Aufbereitungsverfahren etabliert, das darauf basiert, dass Carbonsäuren wie Bernsteinsäure und Protocatechusäure bei niedrigen pH-Werten eine niedrigere Löslichkeit aufweisen und sich extrahieren lassen. Elektrochemische Trenntechnologien stellen ein neuartiges Verfahren zur Abtrennung dieser Carbonsäuren dar, da sie den pH-Wert ohne zusätzliche Additive wie Salzsäure oder Natronlauge gezielt einstellen können.

Neutrale Verbindungen lassen sich nicht so leicht abtrennen wie Salze. Daher wird durch die pH-Absenkung mittels Wasserspaltung die Bildung von Carboxylaten herbeigeführt und die Entstehung von Neutralsalzen so vermieden. Für eine optimale Auslegung der Abtrennung ist die Vermessung des pH-abhängigen Gleichgewichtes zwischen gelöster und ausgefällter Substanz essenziell. Dafür wurde eine automatisierte Anlage entwickelt, die für unterschiedliche Temperaturen und pH-Werte die Löslichkeit von Carbonsäuren in wässrigen Medien vermessen kann. Mithilfe dieser Daten wurde die elektrochemisch induzierte Kristallisation für Bernsteinsäure und Protocatechusäure ausgelegt und durchgeführt.

## Kontrolliert wachsen

Für die Herstellung von Biokunststoffen werden die aufgereinigten Monomere im nächsten Schritt über eine Polykondensation zu den gewünschten Polyestern umgesetzt. Eine Polykondensation ist eine stufenweise Wachstumsreaktion von Molekülen. Hierbei reagieren bifunktionelle Monomere beziehungsweise bereits gebildete Oligomere, also mehrere Moleküle, die sich schon spontan aneinandergelagert haben, unter Abspaltung von niedermolekularen Verbindungen, wie beispielsweise Wasser, zu linearen Polymeren. In diesem Projekt wurden die Monomere Bernsteinsäure und 1,4-Butandiol zu dem bekannten Polyester Polybutylensuccinat umgesetzt.



**Das Projekt „R2HPBio“ basiert auf der interdisziplinären Zusammenarbeit** zwischen der Biotechnologie, der Verfahrenstechnik sowie der Anorganischen und Makromolekularen Chemie.

Als Katalysator wurde ein maßgeschneiderter, biokompatibler Zink-Katalysator eingesetzt. Das Besondere am Einsatz des speziellen Metallkomplexes ist nicht nur seine Biokompatibilität, sondern auch seine Robustheit gegenüber dem während der Polymerisation entstehenden Wasser. Dadurch ermöglicht der Komplex die Synthese langer Ketten. Das Ziel ist es, erst mittellange Polyesterketten herzustellen, die dann zu biologisch abbaubarem Polyurethan erweitert werden. Kaltschammatratzen, Wärmedämmplatten oder Spülschwämme bestehen beispielsweise aus Polyurethanen. Dieser Kunststoff ist in seiner bisherigen erdölbasierten Form äußerst schwierig zu recyceln.

## Umweltfreundlich produzieren

In der weiteren Zusammenarbeit wurde ein neuer, robuster Zink-Bisguanidin-Katalysator für die Polymerisation der nachwachsenden Monomere Lactid und  $\epsilon$ -Caprolacton entwickelt.



#### Aufbau der elektrochemisch induzierten Trenntechnologie:

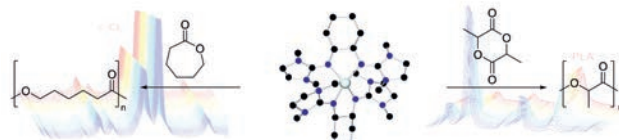
zwei Elektrodenkäfte mit jeweils Kathode (links) und Anode (rechts), Rührfischen und der dazwischenliegenden Membran

Die beiden zyklischen Monomere können über die katalytische Ringöffnungspolymerisation zu den bioabbaubaren Polyestern Polylactid und Polycaprolacton transformiert werden. Polylactid ist derzeit der mit am häufigsten produzierte Biokunststoff. Der in der Industrie am meisten verwendete Katalysator in der Polymerisation von Lactid ist ein Komplex, der das Metall Zinn beinhaltet und zellschädigend ist. Der Katalysator, der zwar die Reaktion lediglich steuert und nicht „verbraucht“ wird, kann nur schwer aus dem Polymer entfernt werden und verbleibt daher aus wirtschaftlichen Gründen im Kunststoff. Der Kunststoff, der sich innerhalb von 90 Tagen zu 90 Prozent unter industriellen Kompostierbedingungen zersetzen kann, hinterlässt das toxische Metall im Kompost und stellt somit eine Gefahr für die Umwelt dar.

Der in dieser Kooperation entwickelte Zink-Katalysator ist nicht nur aufgrund seiner nichttoxischen Eigenschaften eine gute Alternative. Zusätzlich übertrifft der Zink-Katalysator in seiner Polymerisationsgeschwindigkeit den industriell verwendeten Komplex um ein Vielfaches. Dies wurde mithilfe der Raman-Spektroskopie untersucht, einer Methode, die zeitaufgelöst die Reaktion zum Polymer verfolgt. Es entsteht dabei ein farbloses langkettiges Polymer mit hohen Molmassen. Darüber hinaus weisen die mit dem Zink-Katalysator hergestellten Polymere vor allem für medizinische Anwendungen vorteilhafte hohe Kristal-

linitäten auf, zum Beispiel für künstliche Schulterknochen und Knochenschrauben. Denn der höhere kristalline Gehalt bei Polylactid führt zu einer besseren Stabilität des Kunststoffes in wässriger Umgebung. Im medizinischen Bereich erfolgt die langsame Auflösung der Biokunststoffe zu Milchsäure je nach Materialeigenschaft in Monaten oder Jahren, was einen zweiten chirurgischen Eingriff überflüssig macht. Wenn Biokunststoffe im Verpackungsbereich eingesetzt werden, sollen sie jedoch schneller abgebaut oder recycelt werden. Hier zeigte sich, dass die Zink-Guanidin-Komplexe sowohl den einfachen Abbau zur Milchsäure als auch die Reaktion zu weiteren Plattformchemikalien, wie zum Beispiel Ethyllactat, als Recyclingschritt hervorragend katalysieren. So kann der nachwachsende Rohstoff im Sinne einer Kreislaufwirtschaft mehrfach eingesetzt werden und zusätzlicher Abfall wird vermieden.

Somit konnte im Projekt „R2HPBio“ durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit ein zentraler Schritt in Richtung der zirkulären Bioökonomie gemacht werden, was die nachhaltige Bioökonomie langfristig etablieren wird.



**Die Herstellung von biobasierten und bioabbaubaren Polylactid und Polycaprolacton** ausgehend von einem Zink-Katalysator wird mit *in-situ*-Raman-Spektroskopie verfolgt.

#### Ansprechpartnerin

Prof. Dr. Sonja Herres-Pawlis,  
Lehrstuhl für Bioanorganische Chemie, RWTH Aachen,  
sonja.herres-pawlis@ac.rwth-aachen.de

#### Beteiligte Core Groups

Prof. Dr. Sonja Herres-Pawlis, Alina Herrmann,  
Lehrstuhl für Bioanorganische Chemie, RWTH Aachen  
Prof. Dr. Andreas Jupke, Jonas Görtz,  
AVT – Fluidverfahrenstechnik, RWTH Aachen  
Prof. Dr. Laura Hartmann, Dr. Stephen Hill,  
Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie, HHU Düsseldorf

## Werkzeugkasten aus der Natur

**Bakterien, Pilze und Pflanzen produzieren einen bunten Strauß an Naturstoffen, die sie nicht unbedingt zum Überleben benötigen, welche aber oftmals bioaktiv sind. Diese sogenannten Sekundärmetabolit-Naturstoffe dienen den Organismen beispielsweise zur Schädlingsabwehr oder zur chemischen Kommunikation untereinander. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzen die Grundstrukturen dieser Stoffe, um neue Chemikalien zu entwickeln, die im Agrar- oder Pharmasektor zur Sicherung von Ernährung und Gesundheit dringend benötigt werden.**

Das Ziel des Projektes „CombiCom“ war es, Sekundärmetabolit-Stoffwechselwege in einer mikrobiellen Bioproduktion zu realisieren und so ausreichende Mengen der entsprechenden Naturstoffe zu erhalten. Diese wurden zudem auf ihr Wirkspektrum getestet. Aus ihrer Grundstruktur wurden neue Derivate entwickelt, die eine erweiterte oder sogar ganz neuartige Bioaktivität zeigen können. Diese Stoffe bergen ein großes Potenzial für neue Wirk- und Wertstoffe für den Pflanzenschutz, die Medizin oder die Futter- und Lebensmittelindustrie. Im Hinblick auf eine potenzielle Markteinführung wurde zudem die gesellschaftliche Akzeptanz von Produkten aus synthetisch-biologischen Verfahren evaluiert.



Die wissenschaftliche Basis hierzu entwickelten die beteiligten Gruppen maßgeblich in BioSC-Projekten der Phase 1 des Strategieprojekts, vor allem in den Projekten „BioSAF“, „VariSurf“, „AlgalFertilizer“, „MoRe-Plants“, „NovoSurf“ und „Econ-BioSC“. In Phase 2 haben die Forschenden im Rahmen von „CombiCom“ eine synthetisch-biologische Plattform mit den Bakterien *Rhodobacter capsulatus* und *Pseudomonas putida*, dem Pilz *Ustilago maydis* und Grünalgen der Familie *Chlorellaceae* aufgebaut, um spezifische Eigenschaften nichtphotosynthetischer und photosynthetischer Organismen zur Naturstoffgewinnung zu nutzen. Die Wirte wurden jeweils gezielt ausgewählt, um sie mit genetischen Modulen zur Produktion von verschiedenen Naturstoffen auszustatten, so zum Beispiel Terpene, Prodiginin Pyrrol-Alkaloide und Glykolipide sowie deren Derivate.



**CombiCom-Motivation: Mikrobielle Produktion neuer bioaktiver Naturstoffe** für eine biobasierte Ökonomie. Die nachhaltigen Ansätze zur Produktion, die Vielfalt der Produkte und entsprechenden Anwendungsmöglichkeiten sowie die öffentliche Akzeptanz sind entscheidend für den Erfolg.

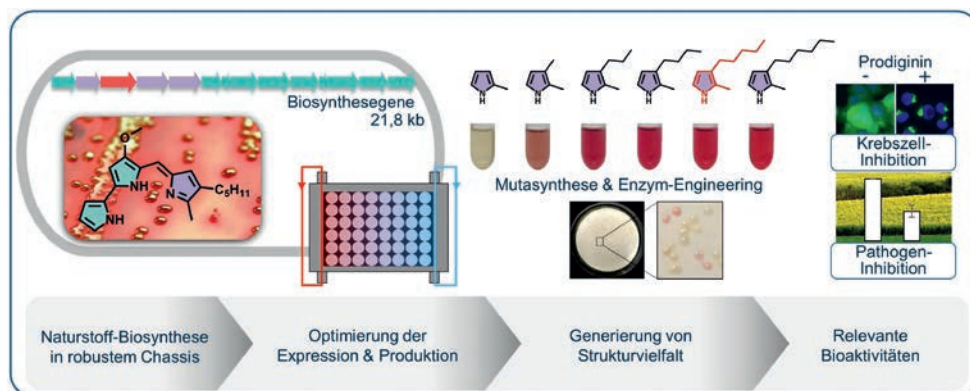
### Bioaktive Stoffe aus Bakterien

Bestimmte Bakterien produzieren sogenannte Prodiginine, die eine typische rote Farbe aufweisen und zu den Pyrrol-Alkaloiden gehören. Die natürlich vorkommenden Strukturunterschiede von Prodigininen stehen in Zusammenhang mit ihrem weit gefächerten biologischen Wirkspektrum, wie cytostatischer und antibiotischer Aktivität. Die Prodiginin-Familie stellte somit einen reizvollen Startpunkt zur Produktion und Untersuchung natürlicher und von der Natur inspirierter Verbindungen dar. Daher hat das Team die Prodiginin-Biosynthese in dem gut handhabbaren Labor-Bakterium *Pseudomonas putida* implementiert, das eine bemerkenswerte Toleranz gegenüber diesen für andere Spezies toxischen Verbindungen aufweist. Dazu wurden molekulargenetische Werkzeuge, die den Transfer biosynthetischer Gene ermöglichen, optimiert. Durch eine Integration der Erbinformation in den Wirtsorganismus an besonders geeigneter Stelle konnte eine Produktion von über 0,2 Gramm der begehrten Prodiginine pro Liter Nährlösung erreicht werden. Zudem konnte die Produktion durch neu entwickelte Online-Messmethoden verfolgt und beispielsweise hinsichtlich der Kultivierungstemperatur optimiert werden.

Auf dieser Basis hat das Forscherteam eine Vielzahl neuer Prodiginine produziert, wobei die Modularität des Prodiginin-Biosynthesewegs ausgenutzt wurde. Dies ermöglichte das Einbringen von Varianten der Vorstufen-Moleküle, die mittels chemischer Synthese gewonnen wurden. Diese können im Bakterium zu neuen Prodiginin-Verbindungen umgesetzt werden. Das entscheidende Enzym, das die fremden Bausteine annehmen muss, wurde dementsprechend angepasst. So konnten die Wissenschaftler schließlich über 40 unterschiedlich substituierte Prodiginine herstellen. Die Arbeiten zeigten, dass die Kombination der notwendigen synthetisch-biologischen Werkzeuge und der Synthesechemie hier den Schlüssel zur Produktvielfalt darstellte.

### Pilze und Pflanzen sind erfinderisch

Terpene sind mit über 80.000 Varianten eine der größten und diversesten Naturstoffklassen. Zu ihnen gehört zum Beispiel das Vitamin A. Terpene werden aus C5-Isopreneinheiten aufgebaut und durch spezialisierte Enzyme, die Terpensynthasen, zu einer Fülle an unterschiedlichen Strukturen umgewandelt. Ins-



### Produktion von bioaktiven Prodigininen und Naturstoffderivaten im Bakterium

*Pseudomonas putida*. Das robuste Bakterium erlaubt die Produktion von diversen Strukturvarianten, sodass die Untersuchung von relevanten Bioaktivitäten gegenüber Krebszellen oder Pflanzen-Pathogenen möglich wird.

besondere Pflanzen, aber auch Pilze scheinen im Verlauf der Evolution eine Vielzahl unterschiedlicher Terpen-Verbindungen mit spezifischen ökologischen Funktionen entwickelt zu haben. Aufgrund diverser Bioaktivitäten sind sie als naturinspirierte Wirkstoffe etwa im Pflanzenschutz anwendbar. Die Forschenden haben deshalb das Bakterium *Rhodobacter capsulatus* und den Pilz *Ustilago maydis* als mikrobielle Terpen-Produktionswirte entwickelt, um gut etablierte Plattformen wie *Saccharomyces cerevisiae* und *Escherichia coli* zu komplementieren.

Das Bakterium *Rhodobacter capsulatus* ist in der Lage, via Photosynthese Sonnenlicht als Energiequelle zu nutzen. Seine besondere innere Zellstruktur bietet eine geeignete Umgebung zur Produktion verschiedener Moleküle des Terpenoid-Biosynthesewegs. Mithilfe spezifischer Expressions-Werkzeuge hat das Team den Isopren-Stoffwechsel des Bakteriums gezielt für die Terpenbildung adaptiert. So gelang die Produktion von verschiedensten Terpenoiden wie (+)-Valencen, eine Aromakomponente von Zitrusfrüchten, und  $\beta$ -Caryophyllen, das entzündungshemmende Eigenschaften besitzt, mit Titern bis über 0,1 Gramm pro Liter. Somit unterstreichen diese Arbeiten, dass *Rhodobacter* Spezies als mikrobielle Zellfabriken für die Produktion von Terpenen dienen können. Der Pilz *Ustilago maydis* ist ein Verwandter der fruchtkörperbildenden Hutpilze, der aber im Labor hefeartig kultiviert und genetisch manipuliert werden kann. Die Forschung des Projektes zeigt, dass *Ustilago maydis* eine erhöhte Resistenz gegen antifungale Verbindungen aufwei-

sen kann und sich daher zu deren Produktion anbietet. Allerdings stehen bislang wenige Expressions-Werkzeuge der synthetischen Biologie für *Ustilago* zur Verfügung. Daher hat das Team eine molekulare „Werkzeugkiste“ synthetisch-biologischer Elemente für den Pilz etabliert. Weiterhin haben die Wissenschaftler *Ustilago maydis*-Stämme für die Produktion großer Mengen an Glykolipiden entwickelt, die zu dessen nativem Biosyntheserepertoire gehören und als bioaktive und tensidische Verbindungen relevant sind. Schließlich konnten die Forschenden erstmals die Terpene (+)-Valencen und  $\alpha$ -Cuprenen produzieren und stellten dabei eine besondere Eignung des Wirts zur Bildung der letzteren, aus einem Pilz stammenden Verbindung fest. Somit konnte erstmals demonstriert werden, dass *Ustilago maydis* als vielversprechender neuer Organismus für die Terpenoid-Produktion dienen kann.

### Vielfältige Algen

Phototrophe Mikroalgen erfreuen sich eines wachsenden Marktpotenzials sowie einer besonders hohen Konsumentenakzeptanz. Sie kommen etwa als Quelle für gesundheitsfördernde Nahrungsmittel, nachhaltig erzeugte Futtermittel und Plattformchemikalien zum Einsatz. Daher haben die Forschenden Techniken entwickelt, um die Zellwand durchlässiger zu machen, also eine sogenannte Permeabilisierung herbeigeführt, da Zellwände eine physikalische Barriere darstellen, welche die effektive Nutzung von Mikroalgen derzeit noch behindert. Dazu wurde ein Ansatz der milden enzymatischen Behandlung etabliert. Poten-

zielle Anwendungen sind etwa „Milking“, also die kontinuierliche nichtdestruktive Produkt-Extraktion aus Zellen, und das Einbringen von DNA zur molekulargenetischen Manipulation. Somit hat das Team einen neuen Ansatz zur Permeabilisierung von Mikroalgen aufgezeigt, der das Potenzial hat, als Schlüsseltechnologie den wissenschaftlichen Fortschritt zur nachhaltigen Algenbiotechnologie, etwa zur Terpengewinnung, zu beschleunigen. Die Arbeiten zeigten, dass die gemeinsame Entwicklung neuer Wirtsplattformen lohnenswert und entscheidend für die Erschließung und Gewinnung des natürlicherweise weiten chemischen Strukturraums der Terpene ist.

### Breite Anwendung möglich

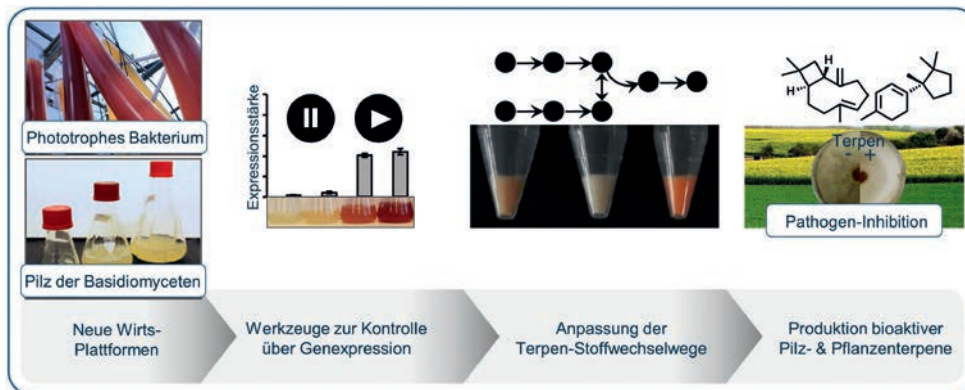
Insbesondere im Agrar- und im Medizinsektor werden neue, effektiv wirksame und dabei schonende bioaktive Stoffe benötigt. Die Analyse der Bioaktivität der in „CombiCom“ adressierten Verbindungen zeigte eine Reihe von vielversprechenden Effekten auf. Einige Prodiginine wiesen eine antibakterielle und kombinatorische Wirkung mit Biotensiden auf. Eines der Derivate zeigte antiproliferative Aktivität durch Autophagie-Modulation und Induktion von Apoptose in Brustkrebszellen. Darüber hinaus waren mehrere Prodiginine und Terpenoide aktiv gegen Pflanzen-Pathogene. Im Speziellen inhibierten sie die Pilze *Phoma lingam* und *Sclerotinia sclerotiorum*, die Wurzelhals- und Stängelfäule bei Kreuzblütlern, wie Raps oder Rüben-Nutzpflanzen, beziehungsweise Weißfäule bei verschiedenen Wirtspflan-

zen, wie Gemüsen, Raps und auch Zierpflanzen, verursachen. Eine Reihe an Prodigininen und ein Terpen reduzierten den Befall von Pflanzen mit *Heterodera schachtii*, einem parasitären Nematoden, der ernste Probleme etwa beim Anbau von Raps oder Zuckerrüben verursacht. Einige Prodiginine stimulierten sogar das Pflanzenwachstum. Diese interdisziplinären Studien demonstrieren hier speziell am Beispiel der Prodiginine, wie ausgehend von einer bioaktiven Leitverbindung durch Strukturmodifikationen gewünschte Eigenschaften evolviert werden können. Das Projekt hat somit zur Entdeckung sowie Bereitstellung bioaktiver Verbindungen beigetragen, die das Potenzial zur Entwicklung neuer Pflanzenschutzmittel haben.

### Gesellschaftliche Akzeptanz hinterfragen

Das Forschungsfeld, das unter dem Begriff „synthetische Biologie“ zusammengefasst wird, verspricht nachhaltige, mikroorganismenbasierte Lösungen einiger großer Umwelt- und Gesellschafts-assoziiierter Herausforderungen von heute. Dies war auch die Motivation des Projektes „CombiCom“. Allerdings sind beim Aufkommen solcher mikroorganismenbasierter Technologien, an denen synthetische Biologie involviert ist, nicht nur technische Fragestellungen relevant. Diese können auch gesellschaftlich sein, da sich beispielsweise Fragen zur öffentlichen Akzeptanz und mögliche Innovationsbarrieren ergeben. Die Wissenschaftler haben diese Aspekte daher genauer betrachtet.

64



### Etablierung der Produktion bioaktiver Terpene

im Bakterium *Rhodobacter capsulatus* und dem Pilz *Ustilago maydis*: Um sie zu nutzen, mussten zunächst Werkzeuge zur kontrollierten Genexpression entwickelt werden. Nach Anpassung der Stoffwechselwege konnten schließlich unterschiedliche Terpene gebildet werden, die Anwendung etwa als Inhibitor von Pflanzen-Pathogenen finden.





**In intensiven Diskussionen** wurde erarbeitet, welche Faktoren für die Etablierung und Akzeptanz einer neuen Technologie wie der synthetischen Biologie ausschlaggebend sind.

Generell trägt die „Angst vor der Angst der Öffentlichkeit“ zu zentralen Bedenken bei Forschern und Erfindern bei. Solche Befürchtungen können die Etablierung vielversprechender Forschungsansätze und Technologien verhindern oder verlangsamen. Ein zentraler Faktor, Akzeptanz für neue Technologien zu erreichen, ist Aufklärung und Wissensvermittlung. Im Fall der synthetischen Biologie ist die Akzeptanz recht gering. Weiterhin zeigten die Projektstudien auf, dass ein Einfluss auf die Akzeptanz hauptsächlich über den potenziellen Nutzen sowie Äußerungen von wichtigen Akteuren wie zum Beispiel Landwirten erfolgen kann. Schritte zur proaktiven positiven Darstellung des Potenzials neuer Technologien, auch für die gesamte Gesellschaft, zeichnen sich somit als entscheidend ab.

Darauf aufbauend haben die Forscher das Konzept eines „interdisziplinären Erfindungs-Ökosystems“ entwickelt, das im Zentrum der vielschichtigen Einflüsse unterschiedlicher Akteure und Stakeholder-Gruppen entsteht. Unter diesem Gesichtspunkt wurde die Situation durch Teams der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf bewertet. Entscheidende Einflussfaktoren für das Aufkommen der synthetischen Lebenswissenschaften konnten so ermittelt sowie Unterschiede in der Wahrnehmung und Gewichtung dieser bei den Vertretern aller Stakeholder-Gruppen, nämlich Forschenden, Studierenden, der Administration und auch Industrie-Partnern, aufgezeigt werden. Hierbei

wurde die Relevanz administrativer Akteure klar, da diese eine kohärente und gemeinsame Leitvision zwischen weniger kompatiblen Stakeholder-Gruppen herstellen können. Unter anderem wurde auch hier eine proaktive positive Kommunikation durch Experten als essenziell definiert. Auf Grundlage der Aspekte, die als wichtig und auch änderbar angesehen wurden, konnten die Wissenschaftler Vorschläge für Initiativen formulieren, die eine weitere Etablierung und Akzeptanz neuer Technologien unterstützen können. Die interdisziplinären Arbeiten im Projekt „CombiCom“ haben somit die vielversprechenden Anwendungsmöglichkeiten der synthetischen Biologie und dabei einerseits die technologischen Herausforderungen sowie andererseits die sozioökonomischen Implikationen adressiert. Diese Erkenntnisse können als Basis zur Entwicklung und Verbesserung dringend benötigter bioaktiver Produkte sowie zu deren zukünftiger Kommerzialisierung dienen.

#### **Ansprechpartnerin**

**Dr. Anita Loeschcke,**  
Institut für Molekulare Enzymtechnologie, HHU Düsseldorf,  
a.loeschcke@fz-juelich.de

#### **Beteiligte Core Groups**

**Prof. Dr. Karl-Erich Jaeger, Dr. Anita Loeschcke, Dr. Thomas Drepper, Robin Weihmann, Fabienne Hilgers,**

Institut für Molekulare Enzymtechnologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Michael Feldbrügge, Dr. Kerstin Schipper, Jungho Lee, Peter Stoffels,**

Institut für Mikrobiologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Matias Zurbriggen, Nicole Heucken, Lisa Hüsemann,**  
Institut für Synthetische Biologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Jörg Pietruszka, Dr. Thomas Classen, Jan Gebauer, Hannah Brass,**

Institut für Bioorganische Chemie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Ulrich Schwaneberg, Dr. Anna Joëlle Ruff,**

**Dr. Johannes Schiffels, Stefanie Brands,**  
ABBt – Biotechnologie, RWTH Aachen

**Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs, Dr. Nina Ihling, Carl Brehl,**  
AVT – Bioverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Florian Grundler, Dr. Sylvia Schleker, Dr. Samer Habash,**  
INRES – Molekulare Phytomedizin, Universität Bonn

**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Holger Klose, Dr. Diana Reinecke-Levi,**  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Dr. Chad M. Baum,**

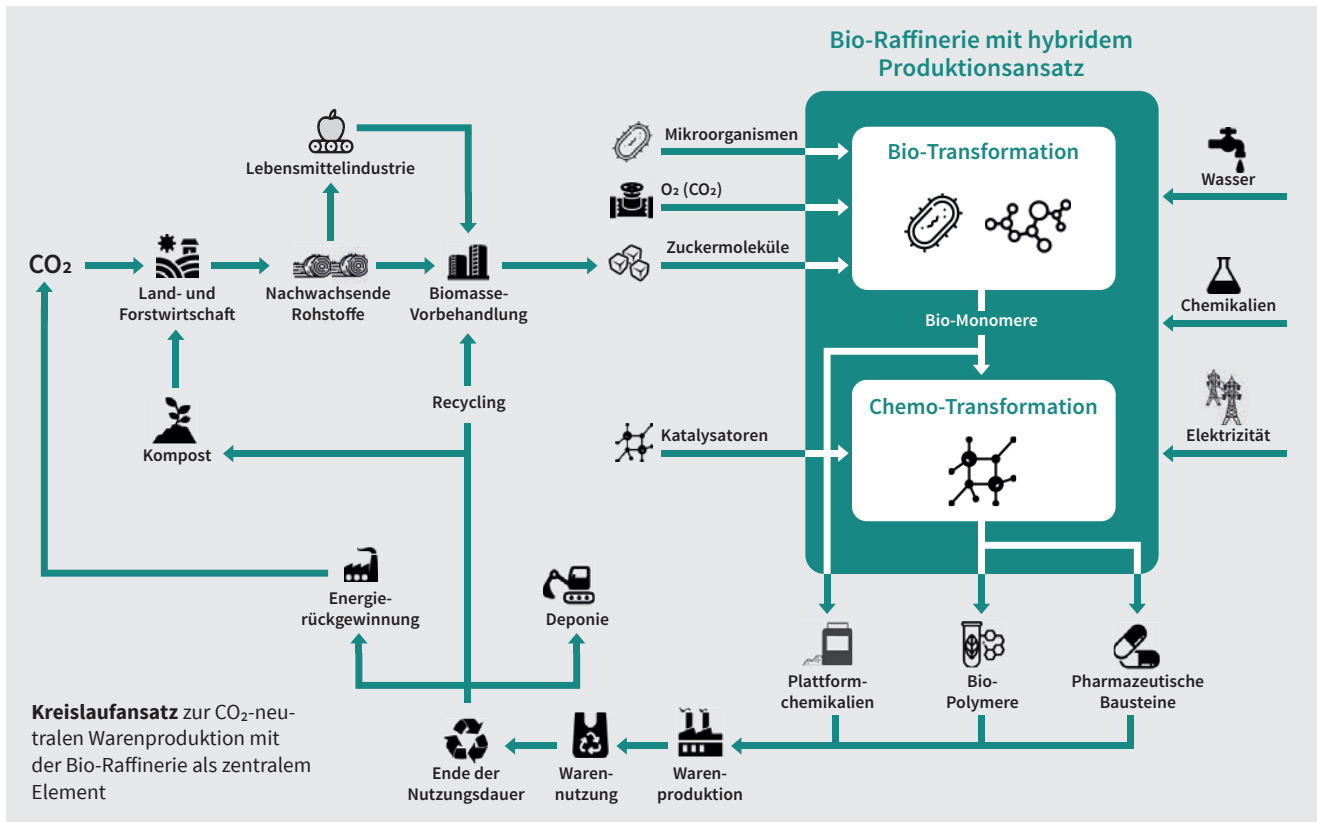
ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship,  
Universität Bonn

## Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wertstoffproduktion

**Für den Aufbau wirtschaftlich tragfähiger Bioraffineriekonzepte ist die Entwicklung von eng miteinander vernetzten Bio- und Chemo-Transformationsansätzen sowie maßgeschneiderten Produkt-Abtrennungsverfahren notwendig. Auf Grundlage dieser „hybriden“ Produktionsprozesse können eindimensionale Wertschöpfungsketten überwunden und Bioraffinerien zu ökologisch und ökonomisch operierenden „Multi-Substrat - Multi-Produkt“-Fabriken ausgebaut werden. Im BioSC-Projekt „HyImPAct“ wurde hierzu ein erster hybrider Demonstratorprozess zur Herstellung von Plattformchemikalien und pharmazeutischen Bausteinen entwickelt.**

Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion erfordert den Aufbau einer industriellen Bioökonomie auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen, insbesondere pflanzlicher Biomasse. Hierbei nehmen Bio-Raffinerien eine zentrale Stellung ein, um Kreislaufansätze mit geringem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck realisieren zu können. Ausgehend von Biomasse – idealerweise regionale Reststoffströme, also Abfälle aus der Land- und Forstwirtschaft sowie der lebensmittelverarbeitenden Industrie – können in Bio-Raffinerien mittels bio- und chemokatalytischer Stofftransformationen sowohl chemische Vorstufen, Bio-Polymere als auch pharmazeutische Bausteine erzeugt werden.





Eine solch breite Produktpalette ist allerdings nur dann zugänglich, wenn eine konsequente Weiterentwicklung existierender Bio-Raffineriekonzepte hin zu „Multi-Substrat – Multi-Produkt“-Fabriken erfolgt. Dieser nachfolgend als „hybrider Produktionsprozess“ bezeichnete Ansatz ist nicht grundsätzlich neu, sondern wird seit geraumer Zeit in vielen unterschiedlichen Bereichen der industriellen Produktion verfolgt.

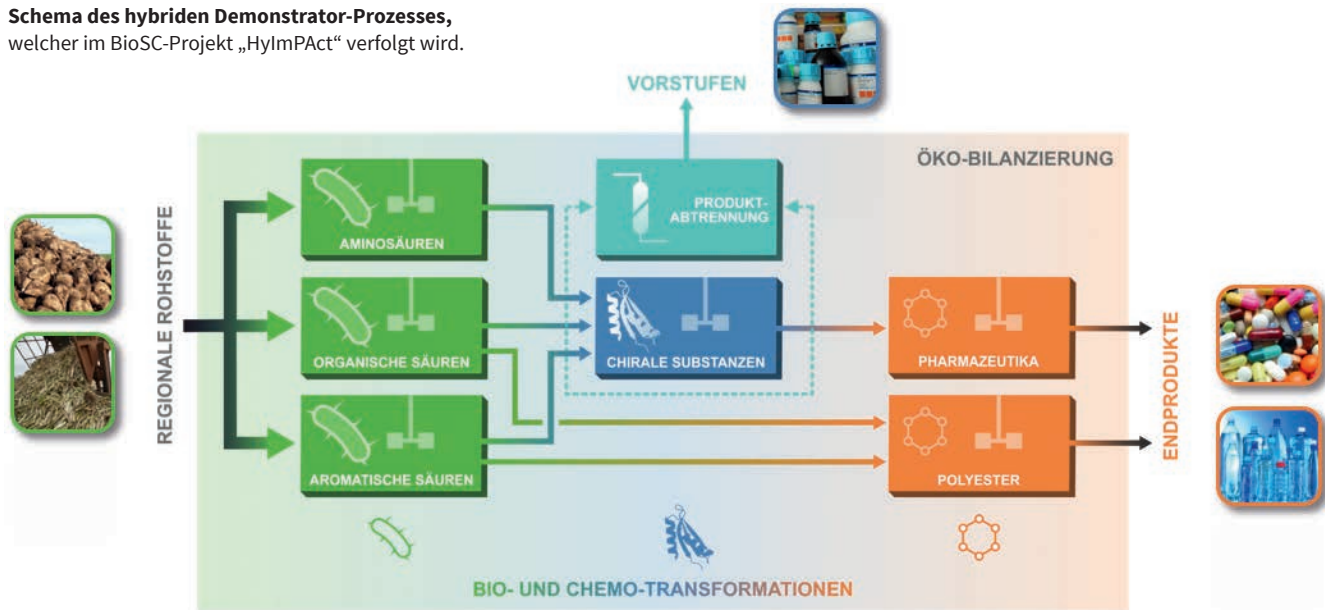
**Synthese von Vorstufen und Endprodukten kombinieren**

Im Rahmen des vom BioSC geförderten FocusLab-Projektes „HylmPact“ werden hybride Produktionsverfahren auf der Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt. Im Fokus stehen hierbei biologische und technische Lösungsansätze, die auf einer engen Integration von Bio- und Chemo-Transformationen sowie Pro-

dukt-Abtrennungsverfahren basieren. Die Arbeiten werden durch techno-ökonomische Analysen unterstützt, wobei insbesondere die bereits etablierten Produktionsverfahren mit den in „HylmPact“ entwickelten alternativen Verfahren verglichen werden. Gleichzeitig werden neue Modelle und Werkzeuge für die Planung, Auswertung und Optimierung hybrider Prozesse entwickelt. Hierbei kann auf die Erfahrungen und Ansätze im Bereich digitaler Bio-Raffinerie-Modellierung zurückgegriffen werden, welche im Rahmen des vorangegangenen BioSC-Projektes „BeProMod“ gesammelt und bereits etabliert wurden.

Nachfolgend soll auf den aktuellen Entwicklungsstand des hybriden Demonstrator-Prozesses eingegangen werden, welcher in „HylmPact“ entwickelt wurde. Hierbei werden zwei unter-

**Schema des hybriden Demonstrator-Prozesses,**  
welcher im BioSC-Projekt „HyImPact“ verfolgt wird.



68

schiedliche Produkte aus dem Bereich von Plattformchemikalien und pharmazeutischen Bausteinen betrachtet.

### CO<sub>2</sub>-Fußabdruck mit Biotechnologie senken

Bernsteinsäure ist zum Beispiel eine bedeutsame Plattformchemikalie der chemischen Industrie. Sie ist deshalb so interessant, weil sie sich aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften in weitere Vorstufen für wichtige Substanzen, wie zum Beispiel in 1,4-Butandiol, umwandeln lässt. Sie bildet damit eine Grundlage für vielfältigste industrielle Anwendungen. Darüber hinaus ist sie ein zentraler Grundbaustein für verschiedene Polyester, inklusive des bioabbaubaren Polybutylen-Succinats. Nach Schätzungen des nova-Instituts wird der industrielle Bedarf an Bernsteinsäure in den nächsten fünf Jahren auf 94.000 Tonnen pro Jahr ansteigen. Bei ausschließlicher Produktion auf fossiler Rohstoffbasis würde somit die entsprechend vierfache Stoffmenge an Kohlenstoff der Erde entzogen und am Ende in den CO<sub>2</sub>-Kreislauf eingeschleust. Im Rahmen von „HyImPact“ wurden drei alternative Bio-Transformationsansätze zur Bereitstellung von Bernsteinsäure untersucht. Dabei wurde der am For-

schungszentrum Jülich bestens erforschte industrielle Plattform-Organismus *Corynebacterium glutamicum* für eine Nutzung Lignocellulose-haltiger Biomasse zur Wertstoffproduktion weiterentwickelt. Lignocellulosen stabilisieren die Zellwände holziger Pflanzen und stehen somit in Form von Pflanzen- und Holzabfällen in großer Menge zur Verfügung. Im Labormaßstab gelingt es bereits, mithilfe der entwickelten Produzentenstäme, die in der Lignocellulose enthaltenen Zucker Glucose und Xylose kohlenstoffeffizient in Bernsteinsäure umzuwandeln. Gleichzeitig können weitere Vorstufen, wie die organische Säure Pyruvat oder die Aminosäure Alanin, bereitgestellt werden, welche im hybriden Prozessansatz zur Herstellung von Pharmazeutika von Bedeutung sind.

Ein vermeintlicher Nachteil des gewählten Bio-Transformationsansatzes unter Nutzung von *Corynebacterium glutamicum* besteht darin, dass die Bernsteinsäureproduktion organismenbedingt zwingend unter neutralen pH-Wert-Bedingungen erfolgen muss. Die nachgeschaltete Produktaufarbeitung erfordert traditionell mehrere pH-Wert-Einstellungen durch zusätzliche Säure-

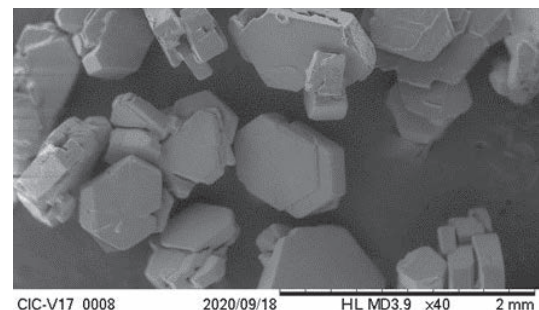
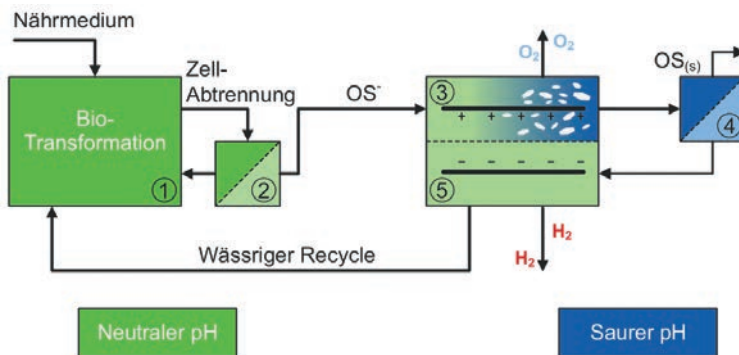
ren und Basen, wodurch eine hohe Nebenproduktion an neutralen Salzen mit negativen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen resultiert. Diese Salzbelastung kann aber gänzlich vermieden werden, indem der pH-Wert elektrochemisch durch Wasserspaltung reguliert wird. Das zugrunde liegende elektrochemische „Power-to-Purity“-Prozesskonzept wurde an der RWTH Aachen entwickelt und innerhalb von „HylmPact“ für die Produktabtrennung verschiedener organischer Säuren angepasst und optimiert. Auf Grundlage der experimentellen Daten von zwei realisierten Laborprozessen für Bernsteinsäure sowie des im BeProMod-Projekt simulierten optimalen Produktionsprozesses wurde anschließend eine Öko-Bilanzierung mit Bewertung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes durchgeführt. Für ein ökonomisch relevantes Szenario wurden Maisstroh als potenzieller regionaler Reststoffstrom sowie jeweils drei etablierte Prozesse zur Vorbehandlung dieser Biomasse vergleichend untersucht.

Im Gegensatz zur breiten Anwendung von Plattformchemikalien in der chemischen Industrie, verbunden mit einer großskaligen Produktion, werden höherwertige Produkte wie Pharmazeutika in deutlich geringeren Mengen benötigt. Demzufolge ist hier der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck kein entscheidendes Kriterium für eine Ökobilanzierung.

### Biobasierte Pharmazeutika umweltfreundlich produzieren

Bei pharmazeutischen Wirkstoffen handelt es sich vielfach um chirale Substanzen, bei denen verschiedene räumliche Anordnungen der Atome möglich sind. Substanzen mit gleicher Summenformel, aber verschiedener räumlicher Struktur, werden als Enantiomere bezeichnet. Chiralität ist von enormer Bedeutung für die korrekte Wirksamkeit eines Pharmazeutikums, da diese meist auf einem bestimmten Enantiomer beruht.

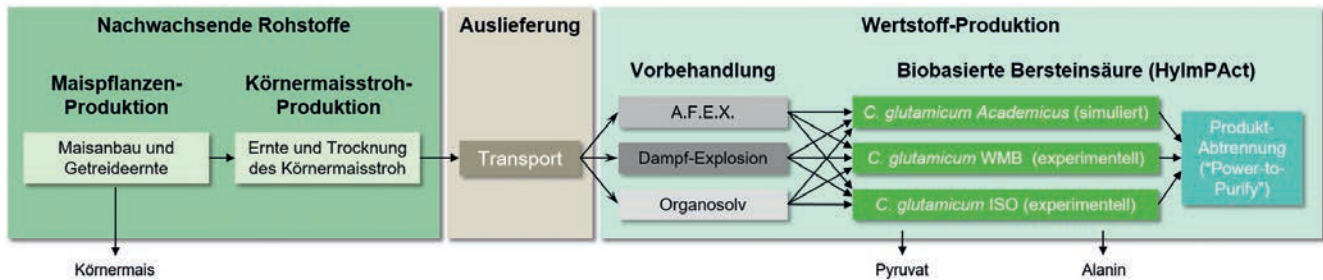
Um gezielt einzelne Enantiomere herzustellen, ist traditionell eine mehrstufige Synthese unter Verwendung von Schutzgruppenchemie und toxischen Hilfsstoffen erforderlich. Dieses Verfahren trägt damit zur Entstehung erheblicher Abfallströme bei. Hier stellen Bio-Transformationen auf der Basis enzymatischer Kaskaden eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative dar. Mithilfe der biologisch abbaubaren und dabei hoch selektiven Bio-Katalysatoren können wertvolle Moleküle aus biobasierten Materialien unter milden Reaktionsbedingungen hergestellt werden. Genau hier setzt der im HylmPact-Projekt verfolgte hybride Demonstrationsprozess mit dem konkreten Produkt Metaraminol sowie der Produktklasse der Tetrahydroisoquinoline (THIQs) an. Metaraminol ist ein pharmazeutischer Wirkstoff, der zur Behandlung von zu niedrigem Blutdruck ein-



### Elektrochemisches Power-to-Purity-Prozesskonzept

für die Abtrennung biotechnologisch hergestellter organischer Säuren. Links Prozessschema: 1) pH-neutrale Fermentation, 2) Zellen-Entfernung, 3) Kristallisation bei niedrigem pH-Wert, 4) Produkt-Abtrennung

und 5) elektrochemisches pH-Management für die Bio-Transformation (hoher pH-Wert). Rechts: Biobasierte Bernsteinsäure-Kristalle nach Aufarbeitung



**Ökobilanz für biobasierte Bernsteinsäure aus Mais-Abfällen** im Vergleich zur fossilen Gewinnung. Für die Biomasse-Vorbehandlung

wurden drei etablierte Verfahren auf Basis von Ammoniak-Faserexplosion (A.F.E.X.), Dampfexplosion und Organosolv verglichen.

gesetzt wird und dient gleichzeitig als chirale Vorstufe von komplexeren bioaktiven Verbindungen wie den THIQs. Zunächst werden mithilfe einer dreistufigen enzymatischen Kaskade die verschiedenen biobasierten Vorstufen 3-Hydroxybenzoat, Pyruvat und Alanin in Metaraminol umgewandelt. Für alle Kaskadenschritte konnten geeignete Bio-Katalysatoren mit hoher Aktivität gewonnen werden, insbesondere auch für die Umsetzung von realen Substraten aus zellfreien Überständen der vorge-schalteten mikrobiellen Bio-Transformation.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass hybride Produktionsprozesse eine nachhaltige Produktion von Plattformchemikalien und pharmazeutischen Bausteinen auf der Grundlage nachwachsender Rohstoffe ermöglichen. Für die Erreichung bereits beschlossener Klimaziele hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Neutralität sowie konsequente Umsetzung vorhandener Umweltstandards in der Wertstoffproduktion sind hybride Prozessansätze essenziell und werden damit zwangsläufig auch an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnen.

Eine größere Herausforderung ergibt sich allerdings für den dritten Kaskadenschritt, bei dem Alanin als biobasiertes Co-Substrat dient. Die resultierende Reaktion arbeitet in diesem Fall sehr nah am thermodynamischen Gleichgewicht, was ohne technische Hilfsmaßnahmen zu niedrigen Umsätzen an Metaraminol führt. Zur Steigerung des Reaktionsumsatzes wurde deshalb ein *In-situ*-Produkt-Abtrennungsverfahren entwickelt. Das Konzept ermöglicht eine erhöhte Metaraminol-Ausbeute und minimiert Abfallströme, da die Produktion und ein erster Aufarbeitungsschritt von Metaraminol in einem gemeinsamen Prozess realisiert werden konnten.

In einem finalen Schritt kann Metaraminol in eine breite Produktpalette von THIQs umgewandelt werden. Hierfür wurden chemische Synthesansätze auf Basis der Pictet-Spengler-Reaktion entwickelt und für die Anwendung von biobasiertem Metaraminol als Substrat optimiert.

#### Ansprechpartner

**Dr.-Ing. Stephan Noack,**  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich,  
s.noack@fz-juelich.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wiechert, Dr.-Ing. Stephan Noack, Prof. Dr. Dörte Rother, Prof. Dr. Jan Marienhagen, Mohamed Labib, Christian Brüsseler, Laura Grabowski, Kevin Mack, Douglas Weber, Jochem Gätgens,**

IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Jörg Pietruszka, Andreas Sebastian Klein, Anna Christina Albrecht,**

Institut für Bioorganische Chemie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke, Moritz Doeker, Christian Kocks, Thomas Fuchs,**

AVT – Fluidverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Grit Walther, Dr. Angel Merchán, Michael Wolff,**  
Lehrstuhl für Operations Management, RWTH Aachen

## Enzyme – die „Arbeitspferde“ der industriellen Biotechnologie

**Die Technologieplattform BIOExpresSPro stellt Werkzeuge für die Identifizierung und Produktion industrierelevanter Enzyme bereit, die beispielsweise Pflanzenbiomasse effektiv abbauen können. Mithilfe innovativer Biosensoren auf Basis von Fluoreszenzproteinen können im Projekt nun Sekretionsprozesse direkt verfolgt werden. Ein automatisiertes Mini-Pilotanlagen-Mikrobioreaktorsystem mit höherem Kultivierungsdurchsatz wurde zudem validiert und steht nun für das Stammscreening bereit.**

Ein wichtiger Teil der Bioökonomie ist die Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, um daraus nachhaltige, bio-basierte Produkte herzustellen. Pflanzen nehmen hier eine Schlüsselstellung ein, da sie aus Wasser, Kohlenstoffdioxid und Sonnenlicht Biomasse erzeugen. Sie stellen daher einen nahezu unerschöpflichen Rohstoffvorrat für die bioökonomische Verwertung und industrielle Wertschöpfung dar. Um diese pflanzlichen Rohstoffe jedoch nachhaltig nutzen zu können, müssen sie zunächst zugänglich gemacht werden. Eine Strategie, diesen Zugang unter umweltfreundlichen Bedingungen zu erhalten, ist der Einsatz von Enzymen.



## Hidden champions

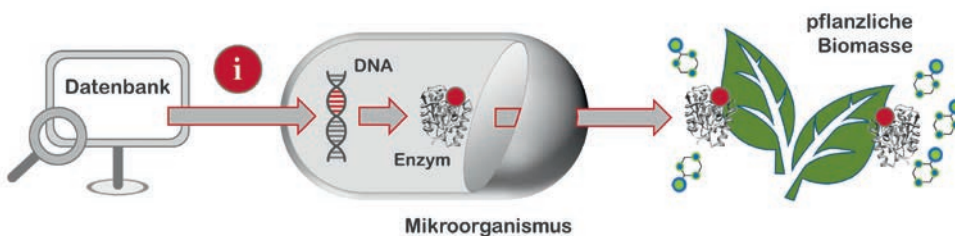
Enzyme sind Biokatalysatoren, die biochemische Reaktionen beschleunigen. Dabei arbeiten Enzyme sehr effizient. Ein Enzym katalysiert eine chemische oder biochemische Reaktion, indem es ein bestimmtes Ausgangsmolekül, das Substrat, in ein Produkt umwandelt und dabei selbst unverändert aus der Reaktion wieder hervorgeht. Enzyme sind also die „hidden champions“, die „Arbeitspferde“ der industriellen Biotechnologie. Sie werden unter anderem als Helfer in der Nahrungsmittel- und Futtermittelindustrie eingesetzt, aber auch in der Kosmetik-, Textil-, Papier- und Zellstoffindustrie, der chemischen Industrie, bei der Gewinnung von Kraftstoffen, in der Agrarindustrie sowie in der medizinischen und pharmazeutischen Industrie.

Ziel des hier vorgestellten BioSC Boost-Fund-Projektes „BIOExpresSPro“ war es, in einem ersten Schritt natürlich vorkommende Enzyme zu identifizieren, die pflanzliche Biomasse abbauen können. Solche Enzyme kommen beispielsweise in Pilzen und Bakterien vor, die in der Natur für das Verrotten von Laub bis hin zu ganzen Baumstämmen sorgen. Oftmals sind diese in der Natur beheimateten Mikroorganismen aber nicht für den Einsatz im Labor geeignet. Ihre Ansprüche an die Umgebung, wie Nährstoffangebot oder Temperatur, sind meist zu komplex. Daher war es das zweite Ziel, die Gene, mit denen diese spezialisierten Enzyme hergestellt werden können, in gut handhabbare Labor-Mikroorganismen zu übertragen, die dann die gewünschten Enzyme produzieren und ausscheiden. In einem weiteren Schritt sollten die gewünschten Enzyme optimiert werden. Um diese Ziele zu erreichen, war die breite Expertise aus Biologie, Biochemie, Biotechnologie, Bioproszesstechnik, Bioanalytik sowie Bio-

informatik gefragt. Darüber hinaus wurde „BIOExpresSPro“ während der gesamten Projektlaufzeit von zwei assoziierten Industriepartnern beraten. Bei diesen Partnern handelte es sich um das Unternehmen AB Enzymes GmbH und die evocatal GmbH, die inzwischen als evoxx technologies GmbH von Advanced Enzyme Technologies Ltd. übernommen wurde.

## Fachwissen bündeln

„BIOExpresSPro“ bündelt als Technologieplattform dieses weit verzweigte Fach- und Industrierwissen in sogenannten Pipelines. So wurde zunächst eine Vorhersage-Pipeline zur Identifizierung neuer biomasseabbauender Enzyme etabliert. Hier wurden mithilfe ausgeklügelter Algorithmen öffentlich zugängliche Datenbanken wie BRENDA und UniProt bioinformatisch durchsucht. Dadurch konnten bisher unbekannte Enzyme gefunden werden, deren Eigenschaften auch bei den Industriepartnern sehr begehrt sind. Derartige Enzyme wurden so zum Beispiel in den Bakteriengattungen *Arthrobacter* und *Pseudomonas* entdeckt. Um solche Enzyme in bioökonomischen Prozessen einsetzen zu können, müssen sie in ausreichenden Mengen produziert werden. Dazu wurden die Gene der bioinformatisch identifizierten projektrelevanten Enzyme in einer weiteren Pipeline mithilfe modernster Klonierungs-Methoden in gut handhabbare mikrobielle Wirte eingeschleust, welche die gesuchten Enzyme dann in großen Mengen synthetisierten. Durch die gezielte Evolution der Wirtszellen sorgten die Wissenschaftler zudem dafür, dass die gewünschten Enzyme in größeren Mengen aus den Wirtszellen heraus geschleust werden und nicht etwa im Zellinneren verbleiben. Diese sogenannte Sekretion erleichtert die spätere Ernte der Enzyme ungemein.



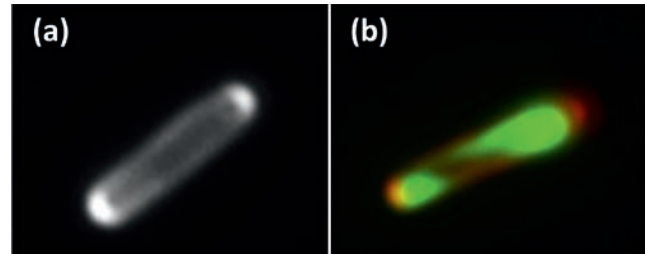
**Die Technologieplattform BIOExpresS-Pro** hat zum Ziel, Enzyme bereitzustellen, die zum Abbau pflanzlicher Biomasse genutzt werden können. Dazu wurden im Rahmen eines BioSC Boost-Fund-Projektes neue Enzyme mit bioinformatischen Methoden identifiziert, ihre Gene kloniert, in Bakterien exprimiert und so Enzyme produziert, die pflanzliche Biomasse abbauen können.



Um die Machbarkeit des Verfahrens zu belegen, wurde zunächst eine umfangreiche genetische Bibliothek des Enzyms Cutinase aus dem Pilz *Fusarium solani pisi* generiert und in Wirtsorganismen zum Einsatz gebracht. Cutinasen sind in der Lage, den wächsernen Schutzpanzer von Pflanzen zu knacken. Sie öffnen somit die Pforten in das Innere der Pflanzen und machen sie für weitere Abbauprozesse zugänglich. Für die industrielle Verwertung von Pflanzenbiomasse spielen diese Enzyme daher eine entscheidende Rolle. In einem nächsten Schritt gelang es, die Cutinase-Produktion in den in der Biotechnologie weit verbreiteten Bakterien *Escherichia coli* und *Corynebacterium glutamicum* zu optimieren.

### Erfolgreich Enzyme produzieren

Darüber hinaus wurden für die Technologieplattform BIOExpresSPro auch neuartige Biosensoren entwickelt, mit denen die Sekretion des synthetisierten Wunschenzyms aus den Zellen konzentrations- und ortsabhängig direkt beobachtet werden kann. Das Verfahren beruht auf einem Fluoreszenzprotein, das Zellen, die besonders stark sekretieren, aufleuchten lässt. Mithilfe dieser Technik gelang es, eine neue Hypersekretionsmutante von *C. glutamicum* zu isolieren, die im Vergleich zum Wildtyp-Stamm signifikant höhere Mengen des gewünschten Enzyms ins Medium ausscheidet. Parallel dazu wurde ein weiterer neuartiger Fluoreszenz-Biosensor etabliert, der zur Analyse von Sekretion und Proteinlokalisierung in *E. coli* dient. Dieser Biosensor ist in der Lage, das ausgewählte Zielprotein, also zum Beispiel das gewünschte Enzym, aufgrund der Fluoreszenz in der Zelle zu lokalisieren. Da dieser Biosensor innerhalb der Zellen eine andere Fluoreszenzfarbe hat als außerhalb, kann mit seiner Hilfe die Sekretionsrate des gewünschten Enzyms über die innere Zellmembran bestimmt werden. Auf der Ebene der Prozessentwicklung wurde zudem ein automatisiertes Mini-Pilotanlagen-Mikrobioreaktorsystem entwickelt und validiert. Dieses Bioreaktorsystem hilft dabei, in kurzer Zeit Bakterienstämme mit den gewünschten Eigenschaften zu finden, zu isolieren und zu vermehren. Die erzielten Ergebnisse und die im Rahmen von „BIO-ExpresSPro“ neu entwickelten Technologien waren nach Abschluss der Projektförderung so erfolgversprechend, dass sie in weiterführende Projekte eingeflossen sind, die sowohl vom Bund als auch vom Land NRW und der EU finanziert wurden und werden.



**Neuartige Biosensoren** können anzeigen, wo sich in einer Bakterienzelle Proteine befinden. (a) Monochrome fluoreszenzmikroskopische Aufnahme einer *E. coli*-Zelle mit einem Biosensor im Periplasma, das ist der Bereich zwischen den beiden die Zelle umgebenden Membranen. Das gesamte Periplasma der Zelle fluoresziert, eine intensive Fluoreszenz ist an den Zellpolen erkennbar. (b) Zweifarbig Darstellung einer *E. coli*-Zelle mit einem Biosensor im Zytoplasma (grün fluoreszierend) und im Periplasma (rot fluoreszierend). Im Zytoplasma ist hier wenig Biosensor vorhanden, sodass auch die schwache Fluoreszenz aus dem Periplasma deutlich zu erkennen ist.

73

#### Ansprechpartner

**Dr. Achim Heck,**  
Institut für Molekulare Enzymtechnologie, HHU Düsseldorf,  
a.heck@fz-juelich.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Karl-Erich Jaeger, Dr. Achim Heck, Dr. Thomas Drepper, Dr. Katrin Troost, Andreas Woop,**

Institut für Molekulare Enzymtechnologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Michael Bott, Prof. Dr. Roland Freudl, Sarah-Kristin Jurischka,**  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Wolfgang Wiechert, Prof. Dr. Marco Oldiges,**  
**Dr. Jannick Kappelman, Dr. Johannes Hemmerich,**  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Björn Usadel, Dr. Alexander Vogel,**  
IBG-4 Bioinformatik, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Ulrich Schwaneberg, Dr. Anna Joëlle Ruff, Dr. Wei Long,**  
ABBt – Biotechnologie, RWTH Aachen

#### Industriepartner (assoziierte Partner)

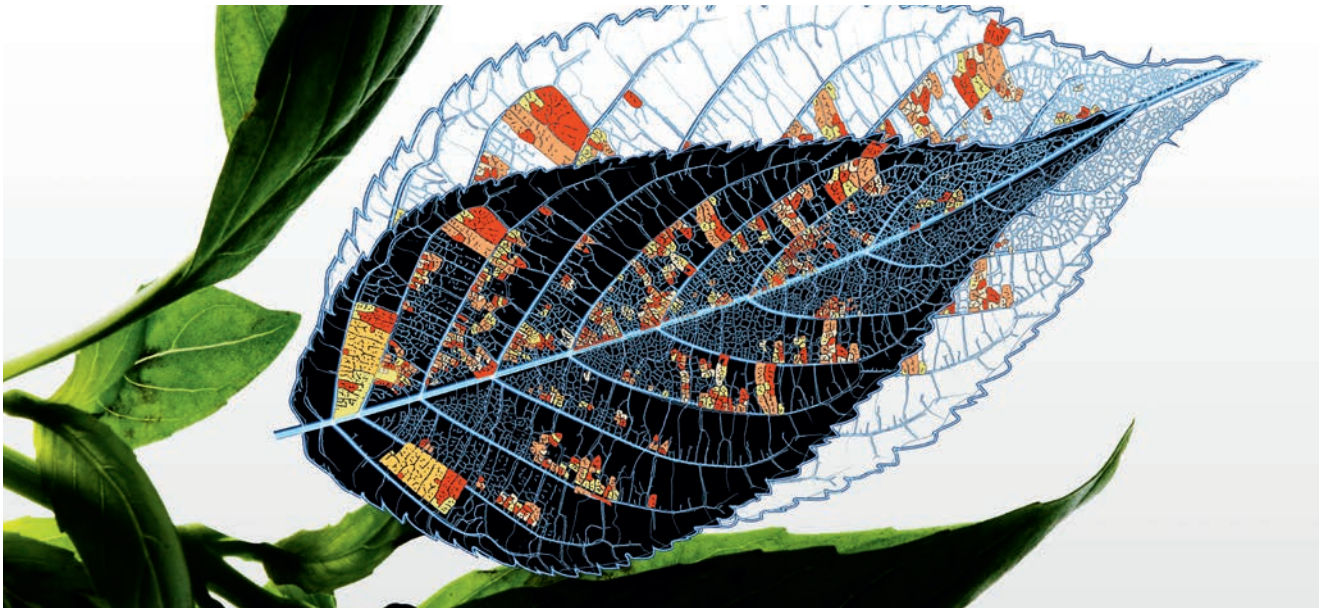
**Dr. Christian Degering, Dr. Michael Puls, Dr. Christian Leggewie,**  
evocatal GmbH, Düsseldorf (aktuell: evoxx technologies)

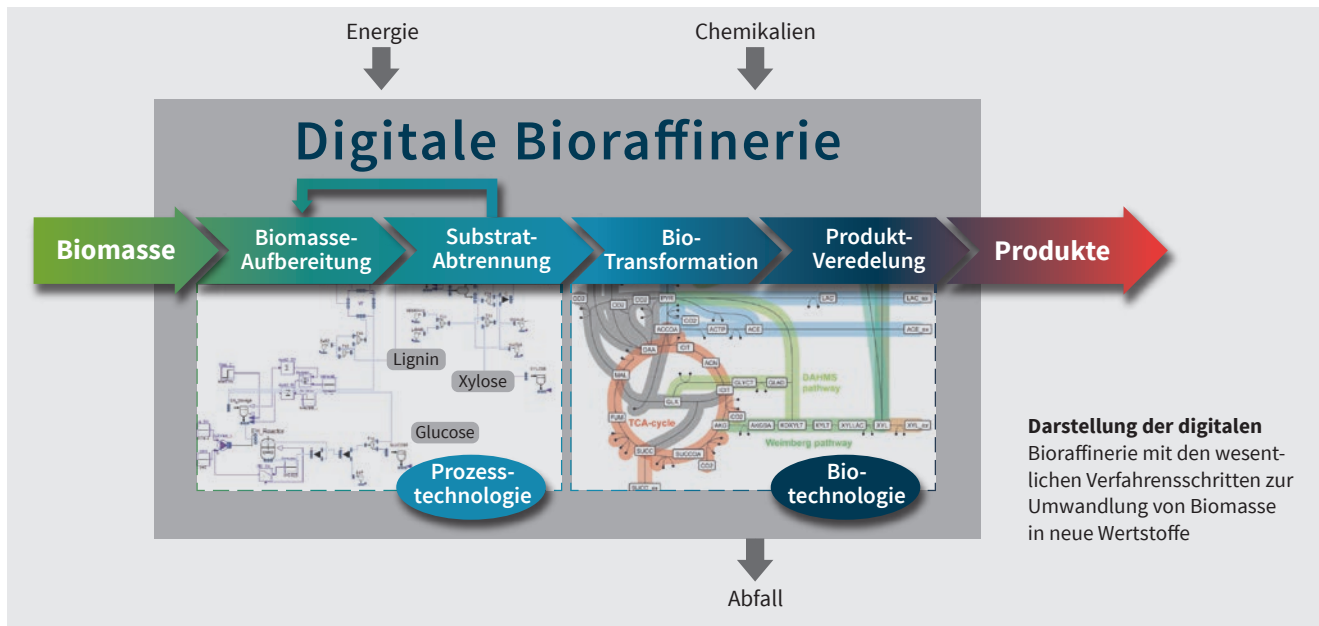
**Dr. Jari Vehmaanperä, Prof. Dr. Karl-Heinz Maurer,**  
AB Enzymes GmbH, Darmstadt

## Die digitale Bioraffinerie – Nachwachsende Rohstoffe optimal umwandeln

**Computermodelle spielen eine immer größere Rolle, um die Wettbewerbsfähigkeit von biobasierten Verfahren zu steigern. Mit ihrer Hilfe gelingt es, komplexe biologische und technische Prozesse präzise vorherzusagen und damit zu optimieren. Dies gilt insbesondere für den Betrieb von Bioraffinerien. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich vom Nutzungsgrad der hier verarbeiteten nachwachsenden Rohstoffe sowie deren effektiver Umwandlung in neue Wertstoffe ab. Im Rahmen des Boost-Fund-Projektes „BeProMod“ entstand eine digitale Bioraffinerie, welche optimale Betriebsstrategien in Anlagen mit hoher Modularität und wechselndem Eingangsmaterial abbilden kann.**

Nachwachsende Rohstoffe wie pflanzliche oder tierische Biomasse sind reich an Kohlenhydraten, Fetten, Ölen und Proteinen. Sie sind damit für die Herstellung von Chemikalien eine Alternative zum Erdöl. Die Umwandlung von Biomasse in neue Wertstoffe geschieht in Bioraffinerien und umfasst eine Vielzahl von Verfahrensschritten. Um gegenüber erdölbasierten Verfahren konkurrenzfähig zu sein, müssen sowohl einzelne Schritte der biologischen und technischen Prozesse als auch das Gesamtverfahren optimiert werden. Genau wie im Fall erdölbasierter Raffinerien ist ein Betrieb von Bioraffinerien nur dann wirtschaftlich, wenn alle chemischen Bausteine der eingehenden Rohstoffe maximal und mit höchster Effizienz genutzt werden.





Je nach Zusammensetzung der Biomasse und Art der gewünschten Zwischen- und Endprodukte gibt es sehr unterschiedliche Bioraffineriekonzepte. Forscherteams entwerfen einerseits Bioraffinerien, die mit wechselndem Eingangsmaterial, von Stroh und Schilf bis hin zu Holzabfällen, zurechtkommen. Andererseits erarbeiten sie optimale Betriebsstrategien für Anlagen, die modular aufgebaut und damit flexibel einsetzbar sind. Die damit verbundenen hochkomplexen Fragen sind rein empirisch, also durch ein mehr oder weniger gezieltes Ausprobieren nicht mehr zu lösen. Zielführender ist es, per Computermodell eine Bioraffinerie mit all ihren Facetten und Möglichkeiten digital abzubilden, bevor man sie tatsächlich baut. Die Entwicklung einer solchen digitalen Bioraffinerie war die Kernaufgabe des BioSC Boost-Fund-Projektes „BeProMod“. Dieses Projekt konzentrierte sich auf die stoffliche Nutzung Lignocellulose-haltiger Biomasse. Lignocellulosen sorgen in den Zellwänden holziger Pflanzen für Stabilität und wehren mit ihrer dichten Struktur sogar Pilze und Bakterien ab. Sie machen in Landpflanzen bis zu 95 Prozent der Trockenbiomasse aus – sind also in großen Mengen verfügbar, aber aufgrund ihrer Robustheit schwierig zu verwerten.

### Zerlegung der widerspenstigen Lignocellulose

Im Zentrum einer Lignocellulose-Bioraffinerie steht ein biochemischer Umwandlungsprozess mit Mikroorganismen als Hauptakteuren. Diese können mit den langkettigen, hochverzweigten Molekülen der Lignocellulose zunächst jedoch nichts anfangen und benötigen technische Starthilfe. Durch mechanische und enzymatische Verfahren wird die Biomasse daher vorbehandelt. Ein solches Verfahren stellt beispielsweise das an der RWTH Aachen und am Forschungszentrum Jülich entwickelte OrganoCat-Verfahren dar. Dieses wurde auf der Grundlage von Abfällen aus der Holzverarbeitenden Industrie etabliert und anschließend im FocusLab „AP<sup>3</sup>“ zur Vorbehandlung verschiedenster Lignocellulose-haltiger Reststoffströme weiterentwickelt (siehe Artikel zu AP<sup>3</sup>). Das durch die Vorbehandlung gewonnene Stoffgemisch wird anschließend weiter aufgetrennt: So entsteht eine feststoffhaltige Cellulose-Fraktion und eine wässrige Phase mit bereits gelösten Zuckern sowie Lignin als weiterem Komplexbestandteil. Während die darauffolgende enzymatische Aufspaltung der Cellulose in verwertbare Glucose-Einheiten technisch gelöst ist, stellt die Zerlegung von Lignin immer noch eine

große Herausforderung dar und ist Gegenstand aktueller Forschungen im BioSC. Gegenwärtig kann die Lignocellulose also noch nicht vollständig verwertet werden. Es resultieren aber dennoch zwei Stoffströme, die jeweils ergebige Ausbeuten an Zuckern mit sechs Kohlenstoffatomen (Glucose) beziehungsweise fünf Kohlenstoffatomen (Xylose) liefern. Dieser kleine, aber feine Unterschied ist von großer Bedeutung für die weitere mikrobielle Stoffumwandlung.

Die aus der Lignocellulose freigesetzten Zucker können nun durch geeignete Mikroorganismen und deren natürliche Enzymausstattung in gewünschte Zwischen- oder Endprodukte umgewandelt werden. Hierbei gibt es allerdings zwei grundlegende biologische Sachverhalte zu berücksichtigen: Erstens gibt es nicht DEN industriell einsetzbaren Mikroorganismus, der natürlicherweise alle verschiedenen Zucker aus der Vorbehandlungsstufe verwerten kann. Zweitens existieren auf der Basis verschiedener Zelltypen und Stoffwechselwege immer mehrere Pfade, welche die Verwertung eines bestimmten Zuckers ermöglichen. Die Aufgabe der Forschung ist es, hier das optimale Vorgehen zu finden. Jedoch kann es je nach festgelegtem Ausgangssubstrat (zum Beispiel C5- oder C6-Zucker), dessen gewähltem Umsetzungspfad, sowie dem gewünschten Zielprodukt zu einer mehr oder weniger starken Nebenproduktbildung von CO<sub>2</sub> kommen. Dadurch wird die Effizienz der Kohlenstoffnutzung im Gesamtprozess der Bioraffinerie und damit auch deren Wirtschaftlichkeit sowie ihr ökologischer Fußabdruck positiv oder negativ beeinflusst. Hier kommt nun das Digitale ins Spiel.

### **Viele kleine Modelle ergeben ein großes Ganzes**

Computergestützte Prozessmodellierung und -optimierung steigern zunehmend die Wettbewerbsfähigkeit von biobasierten Verfahren im Vergleich zu bestehenden konventionellen Methoden. Aufgrund der skizzierten Komplexität einer Bioraffinerie erfordert die Erstellung eines digitalen Computermodells die Expertise von Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen – allen voran der Bio- und Systemverfahrenstechnik. Im Rahmen des BioSC-Projektes „BeProMod“ haben Wissenschaftler der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich nun ein erstes Demonstrationsmodell einer digitalen Bioraffinerie erstellt.

Die Detailtiefe dieses Modells reicht von der biologischen Beschreibung einzelner enzymkinetischer Reaktionen über komplexe mikrobielle Stoffwechselnetzwerke bis hin zur technischen Umsetzung in verschiedene Grundoperationen, zu Reaktortypen und vollständigen Prozessketten einer Bioraffinerie. Der Modellansatz wurde dabei so gewählt, dass die zukünftige Weiterentwicklung auf Grundlage neuer experimenteller Daten sowie vertieften Wissens einfach möglich ist. Besonderer Wert wurde auch auf die Benutzerfreundlichkeit und Wiederverwendbarkeit einzelner Modellbausteine gelegt, um die Modellierung dynamischer Prozesse aus anderen Anwendungsbereichen zu gestatten. In einer ersten konkreten Fallstudie wurde ein Produktionsprozess berechnet, in welchem Mikroorganismen die organische Säure Succinat als wichtige Vorstufe der industriellen Kunststoffherstellung bereitstellen. Hauptakteur in diesem Verfahren war der für diese Aufgabe optimierte Modellorganismus *Corynebacterium glutamicum*.

Mithilfe des Computermodells konnten ideale Stamm- und Prozessvarianten für eine skalierbare Produktion von Succinat auf Basis von OrganoCat-Substraten identifiziert werden. Der Sprung aus der digitalen Welt in eine real existierende Bioraffinerie wird unter anderem im BioSC FocusLab „HyImPACT“ vorbereitet. Hier werden die experimentelle Umsetzung sowie weiterführende techno-ökonomische Fragen zum bestmöglichen Produktionsprozess bewertet.

#### **Ansprechpartner**

**Dr.-Ing. Stephan Noack**,  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich,  
s.noack@fz-juelich.de

#### **Beteiligte Core Groups**

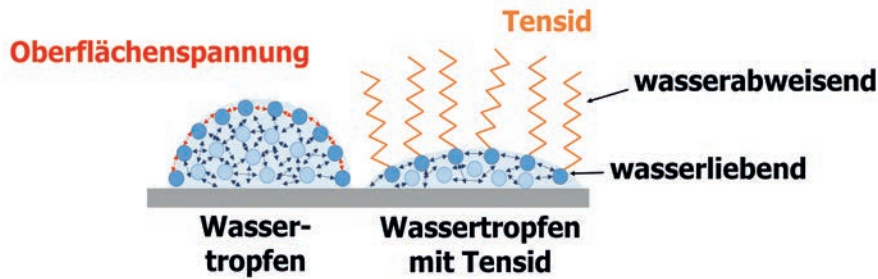
**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wiechert, Dr.-Ing. Stephan Noack,  
Dr.-Ing. Eric von Lieres, Dr.-Ing. Xiao Zhao**,  
IBG-1 Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich  
**Prof. Dr.-Ing. Alexander Mitsos, Dr. Ralf Hannemann-Tamás,  
Tobias Ploch**,  
AVT – Systemverfahrenstechnik, RWTH Aachen  
**Prof. Dr. Uwe Naumann, Jonathan Hüser**,  
Software und Tools für Computational Engineering, RWTH Aachen

## Biotenside werden wettbewerbsfähig

**Das FocusLab „Bio<sup>2</sup>“ zielte auf die Entwicklung eines wettbewerbsfähigen Bioraffinerieprozesses für biobasierte Tenside ab. Als Beispielprozesse wurden die Produktionswege von zwei Biotensiden mithilfe von Bakterien und Pilzen ausgewählt. Biotenside lassen sich im Gegensatz zu konventionell aus Rohöl hergestellten Tensiden unter anderem aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen. Die wettbewerbsfähige Produktion wird jedoch durch verschiedene Herausforderungen erschwert, die in diesem Projekt zeitgleich entlang der gesamten Prozesskette adressiert wurden.**

Tenside reduzieren die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten und die Grenzflächenspannung in Stoffgemischen. Dadurch werden vielfältige Anwendungsfelder eröffnet. So werden Tenside in Reinigern, als Schäumungsmittel bei der Brandbekämpfung, aber auch als Emulgatoren in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Vollständig biobasierte Tenside, Biotenside genannt, stellen eine nachhaltige Alternative zu den aus Rohöl hergestellten Tensiden dar. Unter den Biotensiden befinden sich auch durch Bakterien und Pilze produzierte Naturstoffe.

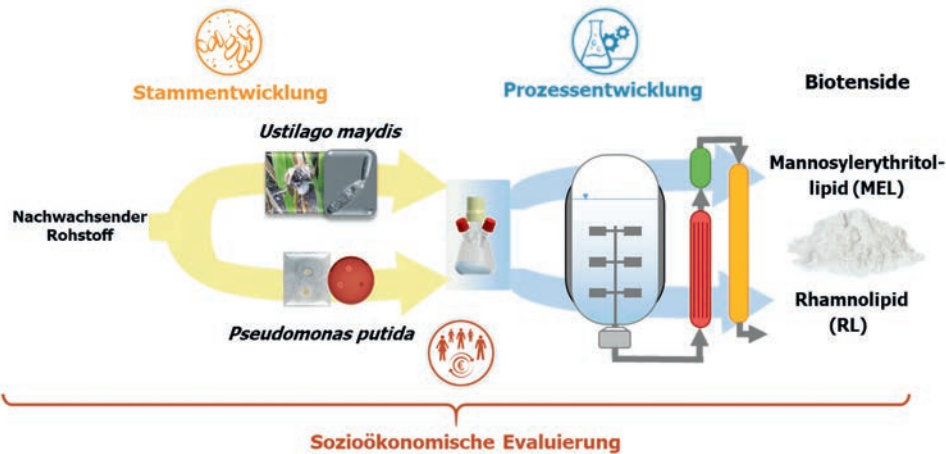




(A)

**(A) Wirkprinzip von Tensiden:**  
Sie bestehen aus einem wasserabweisenden und einem wasserliebenden Element. Deshalb sind sie in der Lage, die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten zu reduzieren oder Emulsionen aus Öl und Wasser zu moderieren.

(B)



**(B) Prozesskette** zur Herstellung von Biotensiden aus nachwachsenden Rohstoffen im Projekt „Bio<sup>2</sup>“.

78

### Ganzheitlicher Ansatz

Mikrobielle Biotenside stehen vor mehreren Herausforderungen: Dazu zählen einerseits hohe Produktionskosten, die sich bisher aus der Verwendung von teuren Ausgangsstoffen, zum Beispiel aus aufgereinigten Zuckern oder pflanzlichen Ölen, ergeben. Somit ist es zielführender, Ausgangsstoffe zu verwenden, die günstiger sind und gleichzeitig nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Andererseits sind die Ausbeuten bei der Herstellung mithilfe von Bakterien bisher eher gering. Biotenside werden dabei oft von Bakterien erzeugt, die für den Menschen pathogen sind und sich somit nicht zur Prozessentwicklung eignen. Eine Prozessführung zur Produktion von Biotensiden in klassischen Rührkesselbioreaktoren wird außerdem durch massive Schaumbildung erschwert. Diese kann zwar durch Zusatz von Antischaummitteln verringert werden, das resultiert jedoch in einer komplizierten Aufreinigung.

Im Rahmen von „Bio<sup>2</sup>“ wurden alle genannten Herausforderungen in einem ganzheitlichen Ansatz entlang der gesamten Prozesskette bearbeitet. Dazu wurden sowohl Stamm- als auch Prozessentwicklung zeitgleich betrachtet. Eine kontinuierliche sozioökonomische Prozessanalyse bewertete den Prozess anhand ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte und zeigte Verbesserungsmöglichkeiten auf. Dieser ganzheitliche Ansatz war nur in einem interdisziplinären Team umsetzbar.

### Biotenside aus natürlichen Quellen

Das Bakterium *Pseudomonas putida* ist als nichtpathogener Vertreter der vielseitigen Bakterienfamilie der Pseudomonaden bekannt und eignet sich besonders gut für die Konstruktion von gentechnisch modifizierten Produktionsstämmen für Biotenside aus der Klasse der Rhamnolipide. Da *Pseudomonas putida* in der Natur keine derartigen Biotenside produziert, müssen die

entsprechenden Gene aus dem nah verwandten, aber humanpathogenen Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* übertragen werden.

In mehreren Teilprojekten wurde der Stoffwechsel von *Pseudomonas putida* optimiert sowie zahlreiche Systeme für die Expression der Rhamnolipid-Biosynthesegene entwickelt. So gelang es den Forschenden, durch die Kombination beider Systeme einen potenten Rhamnolipid-Produktionsstamm zu erzeugen.

### **Pflanzenreste und alternative Zucker nutzen**

Um nachwachsende Rohstoffe als Nahrung für die Mikroorganismen nutzen zu können, wurde der Bakterienstamm im Labor an die Nutzung von Xylose und Ethanol als Kohlenstoffquellen angepasst. Der Zucker Xylose ist ein wichtiger Bestandteil von kostengünstig bereit stellbarem Pflanzenmaterial, dessen Verwendung als Energiequelle für die Bakterien dienen könnte und somit die Wertschöpfung des Prozesses erhöhen kann. Drei verschiedene Wege zur Verwertung von Xylose wurden in *Pseudomonas putida* per Gentechnik eingebracht und ermöglichen nun das Wachstum auf diesem Einfachzucker. Mithilfe der sogenannten adaptiven Laborevolution konnte die Produktivität im Anschluss noch weiter verbessert werden. Ethanol ist ein weiteres interessantes Substrat, das kostengünstig aus Biomasse hergestellt werden kann. Dieser Alkohol ist für die Produktion von Rhamnolipiden mit *Pseudomonas putida* besonders effizient nutzbar, da die Bakterien eine natürliche Fähigkeit haben, Ethanol zu verstoffwechseln. Auch dieser Prozess konnte durch die adaptive Laborevolution nochmals deutlich verbessert werden. Für die neuen Stämme konnte gezeigt werden, dass die Produktion von Rhamnolipiden auf Basis der alternativen Substrate vergleichbar oder sogar besser ist als bei Verwendung von Glukose. Zeitgleich wurde der Stoffwechsel durch das Entfernen energieintensiver Prozesse weiter optimiert und Synthesewege, die mit der Rhamnolipid-Biosynthese in der Zelle konkurrieren, wurden abgeschaltet.

Zur Expression der Biosynthesegene wurde ein neues Werkzeug entwickelt, welches die Konstruktion genetisch stabiler Produktionsstämme erlaubt. Steuerbare Expressionssysteme, hier erstmalig zur Rhamnolipid-Herstellung angewendet, zeigten eine

effiziente und regulierbare Produktion, verbunden mit einer herausragenden Stabilität der Produktionsstämme. Abschließend konnte die breitere Anwendbarkeit der neuen Stämme durch gezielte Gewinnung von unterschiedlichen Rhamnolipid-Varianten gezeigt werden.

### **Pilze produzieren Biotenside**

Der Pilz *Ustilago maydis* ist ein natürlicher Produzent von Biotensiden. In der Natur erzeugt dieser Stamm ein Gemisch von Glykolipiden. Das Ziel der Arbeiten war es, nur eines dieser Glykolipide, nämlich Mannosylerythritollipid-D, in reiner Form zu erhalten. Mannosylerythritollipide werden in der Natur nur unter Stickstoffmangelbedingungen hergestellt. Bei Verwendung nachwachsender Rohstoffe lässt sich der Stickstoffgehalt jedoch nicht beliebig kontrollieren. Um die Produktion von Mannosylerythritollipid-D auf nachwachsenden Rohstoffen zu erreichen, wurde eine Strategie zur künstlichen Regulation der Biosyntheseschritte etabliert. Außerdem wurden verschiedene Enzyme des entsprechenden Biosynthesewegs innerhalb der Zelle relokalisiert, um Biotensid-Varianten mit neuen Eigenschaften zu generieren.

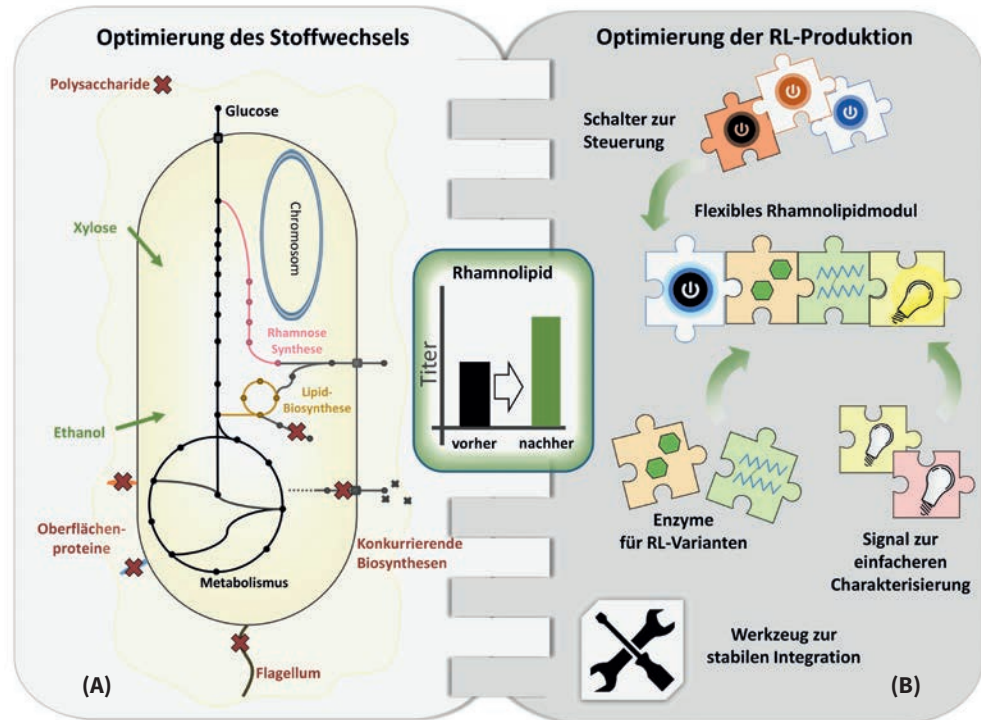
Auch für diesen Mikroorganismus wurde das Substratspektrum erweitert, um nachwachsende Rohstoffe effizienter nutzen zu können; in diesem Fall die Polygalakturonsäure. Diese organische Säure ist ein Hauptbestandteil von Pektin, welches sich zum Beispiel in Zuckerrübenschnitzeln befindet. Rübenschnitzel sind Nebenprodukte aus der Zuckerrübenverarbeitung. Hier wurden Arbeiten aus dem Seed Fund „UstiLyse“ und dem Boost Fund „PectiLyse“ fortgesetzt. Das schon umfangreiche Enzymrepertoire des Pilzes zur Biomasseverwertung wurde durch bakterielle Enzyme erweitert, welche Pektin abbauen können.

### **Weitreichende Analysen**

Eine Voraussetzung für die parallele Bewertung der Leistung vieler unterschiedlicher Bakterien- und Pilzstämme sind einfache Methoden, die eine schnelle und zuverlässige Detektion und Quantifizierung der Biotenside zulassen. Im Rahmen des Projektes wurde der sogenannte Victoria Pure Blue BO Test zur schnellen Quantifizierung unterschiedlichster Biotenside aus Fermentationsbrühen neu entwickelt. Während diese und ähn-

**(A) Optimierung des Stoffwechsels** von *Pseudomonas putida* (rote X markieren ausgeschaltete Prozesse)

**(B) Optimierung der Rhamnolipid-Produktion** durch einen flexiblen Toolbox-Ansatz. (Mitte) Qualitative Änderung der Rhamnolipid-Titer vor und nach Optimierung



liche Methoden genutzt werden können, um einen ersten Eindruck über die erzielten Titer zu bekommen, gab die innerhalb des Projektes installierte Analytikplattform Aufschluss über die genaue Menge und chemische Zusammensetzung der Biotenside.

Die Herstellung mikrobieller Biotenside ist verknüpft mit der Idee einer fortschrittlichen und nachhaltigen Prozessgestaltung. Dementsprechend wurde unter anderem ein integrierter Prozessansatz verfolgt, um die Fermentation der optimierten Mikroorganismen direkt mit der Produktaufarbeitung zu verknüpfen. Gleichzeitig wurden, basierend auf Studien im Labor- und Technikumsmaßstab, eine Ökobilanz, eine Lebenszykluskostenanalyse und eine soziale Lebenszyklusanalyse der Prozesse durchgeführt. Damit können Ansatzpunkte für Optimierungen möglichst frühzeitig erkannt werden. Ferner wurde untersucht, inwieweit die am Prozessende verbleibende Biomasse in nach-

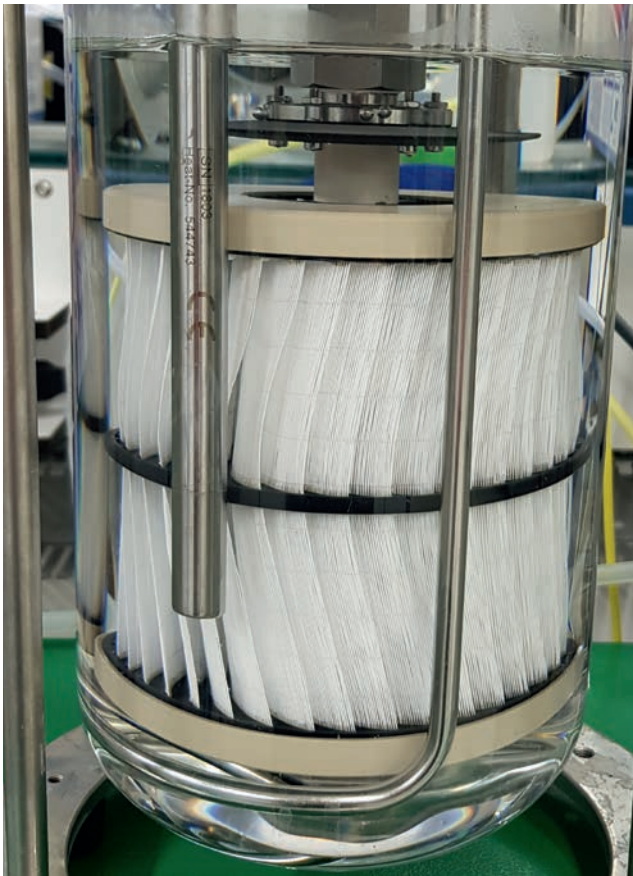
geschalteten Fermentationen genutzt werden kann, um anfallende Abfallströme im Sinne einer nachhaltigen Prozessgestaltung weitergehend zu verwerten.

Ein neues Konzept zur Kultivierung der Mikroorganismen – die Membranbegasung – konnte im Rahmen des Projektes entwickelt und zum Patent angemeldet werden. Dieses Modul kombiniert Vorteile einer blasenfreien Sauerstoffzufuhr mit einzigartigen Kontrollfunktionen im Rahmen der Fermentation und macht so Methoden zur mechanischen und chemischen Schaumzerstörung überflüssig. Die Möglichkeit zur Integration der entsprechenden Module in bestehende Bioreaktoren erlaubt dabei eine einfache Anwendung. Die Verschaltung des Membranmoduls mit einer Filtrationsmembran zum Zellrückhalt stellt außerdem die Grundlage für eine in den Fermentationsprozess integrierte Produktabtrennung dar.



## Wettbewerbsfähigkeit verbessert

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Strategien zur Aufreinigung der Biotenside aus der Fermentationsbrühe entwickelt und evaluiert. Mögliche Trennoperationen wurden zunächst experimentell und modellbasiert im Labormaßstab geprüft, um eine Vielzahl von Prozessparametern möglichst ressourcenschonend zu untersuchen. Anschließend wurde die Verschaltung der Trennoperationen zu Aufarbeitungsprozessen mit dem Ziel minimaler Verluste und maximaler Reinheit der Biotenside vorgenommen.



**Modul zur blasenfreien Membranbegasung** in einem Bioreaktor integriert

Die aus der interdisziplinären Zusammenarbeit aller Gruppen resultierenden Prozessketten wurden aus sozioökonomischer Sicht bewertet, wobei die Prozesse von der Biomassebereitstellung bis zum finalen Biotensid beurteilt wurden. Hinsichtlich der ökonomischen Bewertung konnte durch Analyse von Marktdaten, ökonomischen Kennzahlen und spezifischen Produktpreisen eine Einordnung im Vergleich zum aktuellen Marktgeschehen vorgenommen werden. Durch Erschließung neuer Rohstoffquellen, Erhöhung der Ausbeuten, Entwicklung neuer Kultivierungskonzepte und Etablierung neuer analytischer Methoden trug das Projekt dazu bei, die Chancen von Biotensiden auf dem Markt zu verbessern.

### Ansprechpartnerin

**Dr. Nina Ihling,**  
AVT – Bioverfahrenstechnik, RWTH Aachen,  
Nina.Ihling@avt.rwth-aachen.de

### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs, Dr. Nina Ihling, Maximilian Schelden, Katharina Miebach,**  
AVT – Bioverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Michael Feldbrügge, Dr. Kerstin Schipper, Dr. Silke Jankowski, Dr. Marius Terfrüchte, Magnus Philipp,**  
Institut für Mikrobiologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr. Lars Blank, Dr. Till Tiso, Dr. Isabel Bator,**  
ABBT – Angewandte Mikrobiologie, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Karl-Erich Jaeger, Dr. Stephan Thies, Dr. Sonja Kubicki,**  
Institut für Molekulare Enzymtechnologie, HHU Düsseldorf

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke, Andreas Biselli,**  
AVT – Fluidverfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Matthias Wessling, Robert Keller, Patrick Bongartz,**  
AVT – Chemische Verfahrenstechnik, RWTH Aachen

**Prof. Dr. Jürgen-Friedrich Hake, Dr. Wilhelm Kuckshinrichs, Dr. Petra Zapp, Dr. Andrea Schreiber, Andreas Schonhoff,**  
IEK–STE Systemforschung und Technologische Entwicklung, Forschungszentrum Jülich

## Bioökonomien weltweit stärken

**Bioökonomien sind durch den Handel mit Biomasse zunehmend global vernetzt. Der internationale Wissenstransfer fördert zudem technologische Innovationen und verstärkt diesen Trend. Der Schlüssel zur Messung der Nachhaltigkeitswirkung des bioökonomischen Wandels sind quantitative Ansätze der Modell- und Szenarienbildung. Sie erlauben zudem die vorrausschauende Analyse möglicher Innovationspfade, einschließlich der Konvergenz bisher separater Technologiebereiche. Das Projekt „Econ-BioSC“ ermöglichte die Entwicklung eines innovativen Modellsystems sowie eines Roadmapping-Ansatzes für angewandte nachhaltige Forschung und Politikempfehlungen.**

Technologische Innovation ist in biobasierten Wertschöpfungsketten zur Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung mit Nahrungs- und Futtermitteln sowie mit Bioenergie und Biomaterialien essenziell. So ermöglichen zum Beispiel verbesserte landwirtschaftliche Technologien die Produktion von Nahrungsmitteln bei geringerem Einsatz von Ressourcen wie Land und Wasser. Entsprechend kann eine effizientere Umwandlung von Biomasse in der verarbeitenden Industrie und die Rückgewinnung wertvoller Bestandteile aus Abfallströmen die Wertschöpfung in biobasierten Lieferketten erhöhen. Solche Vorteile entstehen jedoch nicht automatisch immer dann, wenn neue Technologien sich in komplexen globalen Wertschöpfungsketten durchsetzen.



Stattdessen erfordert Nachhaltigkeit oft entsprechende sozio-ökonomische und politische Rahmenbedingungen, die sich auf globaler Ebene in Biomasse exportierenden und importierenden Ländern erheblich unterscheiden können.

### Europa hinterlässt enormen Fußabdruck

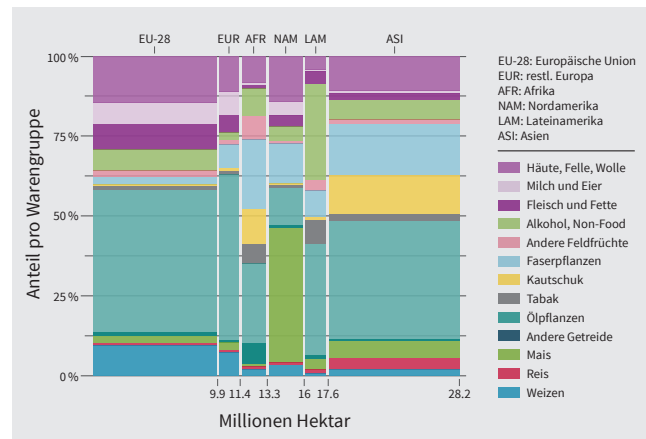
Im Rahmen des Projektes „Econ-BioSC“ wurde das „Food and Agriculture Biomass Input-Output Model“ entwickelt. Dieses quantifiziert den Flächenfußabdruck des globalen Handels mit biobasierten Produkten über die Zeit. Hierbei untersuchten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Dynamik der Zusammensetzung des Flächenfußabdrucks der Europäischen Union für den Konsum von Biomasse, die nicht als Nahrungsmittel genutzt wird. Der Flächenfußabdruck ist in diesem Fall die Landmenge, die benötigt wird, um die entsprechende Biomasse für einen Durchschnittsbürger der EU in einem Jahr zu produzieren. Die Forschenden stellten fest, dass sich der Gesamt-EU-Flächenfußabdruck für diese Biomasse zwischen 1995 und 2010 von 477 auf 562 Quadratmeter erhöht hat. Dabei fallen für das Jahr 2010 zwei Drittel dieses Fußabdrucks im Ausland, wie zum Beispiel in Asien oder Lateinamerika, an. Ölpalmen und Soja machen dabei den Löwenanteil der EU-Importe für diese Biomasse aus und werden oft als Tierfutter verwendet.

Um die Nachhaltigkeitseffekte der entsprechenden Biomasseimporte besser zu verstehen, quantifizierte das Team die Kohlenstoffemissionen ausgewählter Biomasseströme, wie zum Beispiel Soja, das hauptsächlich von Brasilien in die Europäische Union importiert wird. Der Kohlenstoff-Fußabdruck des EU-Sojaimports aus Brasilien gehört im weltweiten Vergleich zu den höchsten, unter anderem weil die EU-Importe aus Regionen in Brasilien mit vergleichsweise hoher sowohl legaler als auch illegaler Entwaldung stammen. Die Untersuchungen legen nahe, dass die unerwünschte Umweltbelastung durch EU-Sojaimporte hauptsächlich durch illegale Entwaldung verursacht wird. Der Tropenwaldverlust wird dabei auch teilweise durch technologische Innovation in der Landwirtschaft befördert, welche die Produktion in zuvor für den Sojaanbau ungeeigneten fragilen Ökosystemen ermöglicht. Gute Nachrichten kommen aus weiterführenden Studien, die zeigen, wie gut konzipierte Umweltpolitik in Brasilien vorübergehend bei der Reduzierung illegaler

Entwaldung mit gleichzeitiger Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität erfolgreich war. Technologische Innovation benötigt daher oft regulierendes politisches Handeln, um ihr Potenzial für eine nachhaltige Transformation zu entfalten.

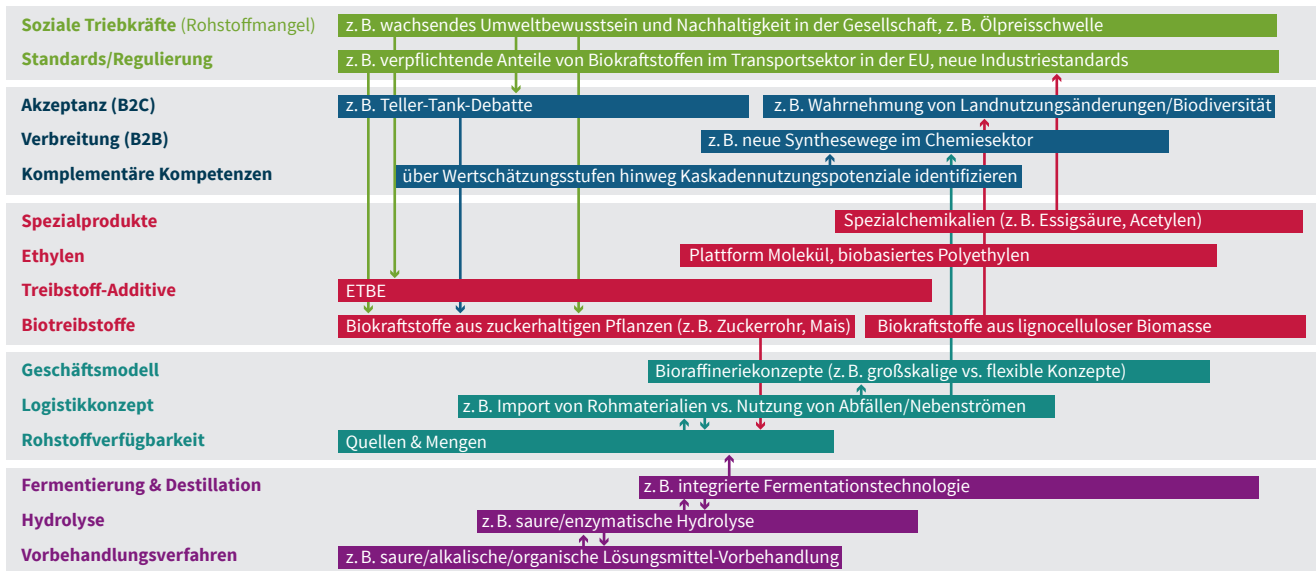
### Industriezweige klug vernetzen

Mit der Bioökonomie wächst die Verbindung zwischen Agrar- und Energiesektor weiter und könnte zu einer sogenannten Industriekonvergenz führen. Diese ist bedingt durch multiple sektorübergreifende Interaktionen, da sich beide Sektoren dieselbe Rohmaterialbasis teilen. Zudem teilen sie sich die Technologien zur Verarbeitung von Biomasse und biobasierten Materialien aus Seitenströmen, die als erneuerbare Energie eingestuft werden. Da technologische Schnittstellen zwischen den Sektoren als Quellen radikaler Innovation beschrieben wurden, hat die bereichsübergreifende Anwendung der wichtigsten Basistechnologien das Potenzial, neue bioökonomische Wertschöpfungsketten zu schaffen. Um den Status quo und die mit der Entwicklung der Bioökonomie einhergehende Dynamik zu verdeutlichen, führten die Wissenschaftler eine Patentanalyse durch, um das Technologieinnovationssystem rund um die Bioethanolproduktion der zweiten Generation abzubilden. Dabei stellte sich heraus, dass die technologische Entwicklung bei Bioethanol aus Lignocellulose vielfältig ist. Lignocellulosen machen rund 95



**Globaler Ackerflächen-Fußabdruck des EU-Verbrauchs an Non-Food-Produkten im Jahr 2010 nach produzierender Region und Rohstoff**

Zeit (z. B. 2015 – 2020) →



Prozent der Trockenbiomasse von Landpflanzen aus. Sie sind somit in großer Menge verfügbar und erschließen damit zahlreiche Anwendungsfelder, einschließlich Kraftstoffe und stoffliche Verwendung. Trotzdem ist die Ethanolproduktion aus Lignocellulose noch nicht vollständig kommerzialisiert. Eine anschließende Analyse von Wirtschaftsnachrichten unterstrich, dass Pilotproduktionsanlagen oft in enger Zusammenarbeit von Forschungsinstituten mit Industriepartnern installiert werden unter Betonung der Notwendigkeit, neue Wissens-Ökosysteme zu bilden, die Partner aus unterschiedlichen Sektoren einbeziehen.

### Blick in die Zukunft

Nachhaltige bioökonomische Transformation erfordert eine Unterstützung von Konsum-, Politik- und Managemententscheidungen durch wissenschaftsbasierte Folgenabschätzung. Das Projekt „Econ-BioSC“ ermöglichte die Entwicklung und Anwendung innovativer Bewertungs- und Planungsinstrumente, die sowohl vergangene als auch zukünftige Nachhaltigkeitseffekte biobasierten Konsums abzuschätzen und die Dynamik der zugrunde liegenden Innovationssysteme zu verstehen helfen. Der Transparenz in Wertschöpfungsketten und der Verlässlichkeit von Szenario-Annahmen sind Grenzen gesetzt. Trotzdem ist zu

**Roadmapping** zur Entstehung der sekundären Biomasse und der zugehörigen Wertschöpfungsketten (aufgeschlüsselt nach den Bereichen **Gesellschaft**, **Markt**, **Produkt**, **Wertschöpfungskette**, **Technologie**)

erwarten, dass Synergien zwischen Digitalisierung und der Verfügbarkeit neuer Daten sowie das zunehmende Umweltbewusstsein dabei helfen, die bioökonomische Transformation nachhaltiger zu gestalten.

#### Ansprechpartner

**Prof. Dr. Jan Börner**,  
ILR – Ökonomik nachhaltiger Landnutzung und Bioökonomie,  
Universität Bonn,  
jborner@uni-bonn.de

#### Beteiligte Core Groups

**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Dr. Nina Preschitschek**,  
ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship,  
Universität Bonn  
**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Martin Bruckner**,  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich  
**Prof. Dr. Jan Börner**,  
ILR – Ökonomik nachhaltiger Landnutzung und Bioökonomie,  
Universität Bonn

## Strukturwandel als Chance für Mensch und Natur

**Die Bioökonomie trägt nicht nur unmittelbar zum Umwelt- und Klimaschutz bei, sondern kann darüber hinaus auch helfen, die Ziele nachhaltiger Entwicklung zu erreichen, die im Englischen als SDGs – Sustainable Development Goals – bezeichnet werden. Der damit einhergehende Wandel bringt gleichzeitig weitreichende ökonomische und gesellschaftliche Veränderungen mit sich. Die Gestaltungsmöglichkeiten sind hier vielfältig. Regionale Transformationspfade und deren Umsetzung sind daher nicht universell. Sie hängen ganz maßgeblich von regionalen Gegebenheiten ab.**

Um systematisch zu verstehen, wie eine regionale Transformation hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie gelingen kann, begleiten und analysieren Wissenschaftler die Entwicklungen im *Living Lab* Rheinisches Revier und erstellen Vergleichsstudien mit anderen Regionen im (Struktur-)Wandel. Die treibenden Kräfte des Strukturwandels im Rheinischen Revier sind insbesondere die Veränderungen des Klimas sowie der beschlossene Braunkohleausstieg. Die Region wird sich in den nächsten Jahren neu aufstellen und soll zu einer Modellregion für eine nachhaltige Bioökonomie werden. Diese gesamtgesellschaftliche Aufgabe ermöglicht seltene Einblicke in die Art und Weise, wie derartige Transformationsprozesse funktionieren.



# Transform



**Wordcloud basierend auf dem Wirtschafts- und Strukturprogramm** für das Rheinische Zukunftsrevier 1.0 (Quelle: Zukunftsagentur Rheinisches Revier/Sandra Venghaus und Florian Siekmann)

Im FocusLab „Transform2Bio“ interessiert es die Forscherinnen und Forscher daher, wie so ein gesellschaftlicher Transformationsprozess abläuft – und was daraus gelernt werden kann. Denn auch wenn das Rheinische Revier als Modellregion in einen besonders spannenden und dynamischen Kontext eingebettet ist, sind einige Rahmenbedingungen und Prozesse keineswegs nur auf die Region selbst beschränkt und können damit wertvolle Erkenntnisse weit über das Rheinische Revier hinaus ermöglichen.

Richtung und Ziel der regionalen Transformationspfade hängen stark von der gegebenen Ausgangslage ab. Diese ist im Rheinischen Revier besonders günstig. Die Region ist schon jetzt geprägt von einer produktiven Landwirtschaft und umgeben von Märkten, die nachhaltige Rohstoffe benötigen – die traditionell starke Lebensmittelwirtschaft, Chemie- und Pharmaindustrie sowie Papier- und Textilindustrie. Somit verfügt das Rheinische Revier über ideale Voraussetzungen, um zur Modellregion für eine nachhaltige Bioökonomie zu werden.

## **Das Rheinische Revier als Living Lab**

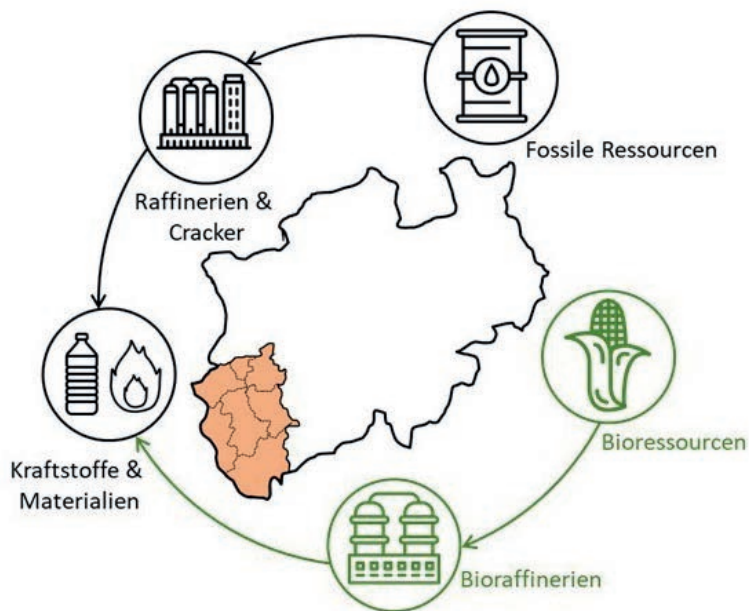
Dabei funktioniert das Rheinische Revier als sogenanntes *Living Lab*, indem neue bioökonomische Ansätze erprobt und die Dynamiken der Transformation zugleich analysiert werden. Das Rheinische Revier in Nordrhein-Westfalen ist das größte Revier

in Deutschland und das größte zusammenhängende Braunkohleabbaugebiet Europas. Es umfasst aktuell drei Tagebaue: Garzweiler, Hambach und Inden. Damit ist es in besonderem Maße vom bis 2038 geplanten Braunkohleausstieg betroffen und bietet gleichzeitig die Chance, große strukturelle Änderungen zu gestalten und zu erforschen. Dazu gehört, dass für circa 9.000 direkt und rund 93.000 indirekt betroffene Arbeitsplätze neue Beschäftigungsmöglichkeiten zum Ausgleich geschaffen werden müssen. Zugleich wird eine gemeinsame Vision für ein zukünftiges regionales Wirtschaftsmodell entwickelt, das auf biologischen Ressourcen und Wissen aufbaut. Ein regionaler Wandel dieser Größenordnung ist damit nicht nur eine technologische und ökonomische Herausforderung, sondern auch eine soziale.

Das Konzept der Bioökonomie erfordert unter anderem die Zusammenarbeit von Akteuren aus der Biomasseproduktion, der Entwicklung von (Bio-)Technologien und biobasierten Produkten und, nicht zuletzt, der Konsumenten. Das Rheinische Revier zeichnet sich durch exzellente Ausgangsbedingungen für eine Bioökonomie aus: Bedingt durch das günstige Klima und fruchtbare Böden, spielt die landwirtschaftliche Produktion in weiten Teilen des Reviers eine große Rolle, nicht zuletzt als Lieferant



**Blick auf den Blausteinsee in Eschweiler-Dürwiß**



### Der Wandel von fossil- zu biobasierten Wertschöpfungsketten

der regionalen Lebensmittelindustrie. Zusätzlich ist die Region geprägt vom jahrhundertelangen Abbau von Braunkohle. Durch die unmittelbare Nähe zu den großen Ballungsräumen am Rhein und die bisherige günstige Bereitstellung von Energie haben sich viele Industriebetriebe angesiedelt. Insbesondere die chemische Industrie hat eine große Bedeutung – 30 Prozent der Kapazitäten Deutschlands für Cracken und Veredelung befinden sich in Nordrhein-Westfalen. Im Rheinischen Revier selbst gibt es zudem eine Vielzahl innovativer kleiner und mittelständischer Unternehmen. Hervorzuheben ist außerdem die starke Forschungslandschaft in der Region. Neben zahlreichen Universitäten und Fachhochschulen gibt es auch mehrere außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sowie den Forschungsverbund Bioeconomy Science Center.

Durch die Großdemonstrationen zum Braunkohleausstieg, vor allem rund um den Hambacher Forst am Tagebau Hambach, hat die Region große überregionale Aufmerksamkeit erhalten. Auch

nach dem Beschluss der Bundesregierung zum Braunkohleausstieg gibt es ein dynamisches Engagement einer Vielzahl gesellschaftlicher Akteure und Interessengruppen, die zur zukünftigen Gestaltung des Rheinischen Reviers aktiv beitragen möchten. Das Rheinische Revier ist daher wie kaum eine andere Region dafür geeignet, den regionalen Transformationsprozess hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie erfolgreich zu gestalten und die gesellschaftlichen Dynamiken zu beobachten und zu analysieren.

### Transformationspfade identifizieren und modellieren

Die verwendete Methodik kombiniert Szenarientwicklung und den Einsatz von ökonomischen Modellen, die zentrale Beziehungen zwischen Produktion, Nachfrage und Handel in der Bioökonomie erfassen. „Transform2Bio“ bedient sich dafür zwei detaillierter Simulationsmodelle. Das (bio-)ökonomische Betriebsmodell „FarmDyn“ wird für Analysen auf der Ebene des einzelnen landwirtschaftlichen Betriebes verwendet. Es erfasst mit einem hohen Detailgrad das Betriebsmanagement sowie naturwissenschaftliche Zusammenhänge. Das allgemeine ökonomische Gleichgewichtsmodell „CGEBox“ bildet hingegen die Verbindungen zwischen allen Wirtschaftssektoren ab, um den Einfluss von politischen Vorgaben und verfügbaren Technologien über alle relevanten Sektoren zu analysieren. Es ist global ausgerichtet und ermöglicht somit, neben dem Rheinischen Revier auch andere Regionen zu berücksichtigen, national und international.



**Nur im Dialog kann die Transformation einer ganzen Region gelingen.**

Die Szenarienentwicklung stützt sich auf die vielfältigen Stakeholdervisionen in der Region. Tiefgreifende Veränderungen im Umgang mit natürlichen Ressourcen betreffen unterschiedlichste Wirtschaftssektoren und Bereiche des Alltagslebens. Daher vertreten betroffene Akteure, die sogenannten Stakeholder, verschiedene Interessen und Einstellungen gegenüber der Entwicklungsrichtung und Umsetzung einer Bioökonomie. Diese Positionen zusammenzubringen, ist eine zentrale Herausforderung für den Erfolg der Transformation. Zu unseren Forschungsfragen gehört daher auch, wie es gelingen kann, divergierende Interessen verschiedener gesellschaftlicher Gruppen zusammenzubringen. Denn Perspektiven, beispielsweise von Unternehmen, Landwirten und Bürgerverbänden, können sich fundamental unterscheiden. Um jedoch Transformationsprozesse erfolgreich zu gestalten, ist ein gesamtgesellschaftlicher Konsens erforderlich.



**Das Rheinische Revier beherbergt zahlreiche mittlere und große Industriebetriebe.**

### **Fragen, analysieren, einbinden, mitgestalten**

An die Untersuchung von Stakeholdervisionen schließen sich auch direkt Fragen nach der Einbindung der verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen an. Denn die bloße Kenntnis verschiedener Perspektiven führt noch nicht zu einer ausgewogenen Berücksichtigung. Aus Erfahrungen, unter anderem mit der Energiewende in Deutschland, ist bekannt, dass einige Formen

der Teilhabe an Entscheidungsprozessen vielversprechend sind – andere jedoch nicht. Im ungünstigsten Fall kann eine fehlgeleitete oder ausbleibende Einbindung der beteiligten Akteure dazu führen, dass sich gesellschaftliche Gruppen von der Umgestaltung ihrer Region abwenden oder diese sogar blockieren. Daher suchen die Wissenschaftler im Projekt nach Möglichkeiten und Wegen, wie die Implementierung einer nachhaltigen Bioökonomie gemeinsam gelingen kann. Einen Einblick in gesamtgesellschaftliche Vorstellungen liefert die Berichterstattung über die Bioökonomie in den nationalen Medien in Deutschland. Sie ist vor allem gekennzeichnet durch einen Fokus auf die Entwicklung neuer Technologien und die Ziele Wettbewerbsfähigkeit und Wachstum. Das spiegelt den forschungsorientierten Ansatz der Bundesregierung und der Europäischen Union wider. Überlegungen zu Biomasseproduktion und ländlicher Entwicklung sind seltener und unterstützen das vorherrschende technologiebasierte Bild der Bioökonomie. Kritische Stimmen äußern sich in Bezug auf die soziale und ökologische Nachhaltigkeit einer solchen Transformation, stellen allerdings nur einen marginalen Aspekt der öffentlichen Debatte dar.

Ein spannendes Beispiel für die Perspektive einer spezifischen Stakeholdergruppe findet sich in der Landwirtschaft, die mit den Landwirten als Rohstofflieferanten in der Region einen zentralen Akteur für das Gelingen einer nachhaltigen Bioökonomie darstellt. Landwirte stehen regelmäßig vor komplexen Entscheidungen und müssen oft lange Zeit im Voraus planen, denn der Anbau bestimmter Pflanzen kann die Böden für Jahre prägen. Hinzu kommen veränderte Anforderungen an Mensch und Natur durch die Auswirkungen des Klimawandels – aber auch spannende Chancen durch neue Technologien oder übergreifende Trends wie die Digitalisierung. Außerdem spielen gesellschaftliche Anforderungen an eine nachhaltige Anbauform und resiliente Lieferketten eine zunehmend wichtigere Rolle, die Ausdruck in Reformen des komplexen politischen Rahmenwerks finden. Daher ist es notwendig zu verstehen, welche Faktoren für Landwirte im Mittelpunkt stehen und aufgrund welcher Überlegungen sie Entscheidungen treffen. Ebenso wichtig ist, wie die produzierte Biomasse anschließend verwendet wird. Der einzelne Landwirt wünscht eine gewisse Planungssicherheit. Dies bedeutet unter anderem, dass diese von Konsumenten und Industrie



auch entsprechend nachgefragt wird. Aber zugleich muss auch die Industrie die entsprechenden Voraussetzungen vorfinden, innovative und gleichzeitig nachhaltige Produkte zu produzieren.

Um Entscheidungen im Sinne der Allgemeinheit nachvollziehbar und transparent treffen zu können, muss eine Vielzahl von Interessen und wechselseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Die Forschenden bündeln das gemeinschaftliche Wissen der Stakeholder und nutzen eine multikriterielle Analyse als methodischen Ansatz, um Entscheidungsträger bei derart komplexen Beschlüssen zu unterstützen. Dadurch können die Wissenschaftler erkennen und berücksichtigen, welche Entscheidungskriterien für unterschiedliche Akteure von besonders großer Bedeutung sind und wie diese Präferenzen die Findung gemeinsamer Kompromisse beeinflussen.

Das daraus gewonnene Wissen ist zentral, damit die Gesellschaft als Ganzes auch in der Zukunft gemeinsame Ziele erreicht. Die Experten sind sich sicher, dass die Ergebnisse von „Transform-2Bio“ auch bei zukünftigen Transformationsprozessen in anderen Regionen zum Erfolg beitragen können.



**Wordcloud**  
basierend auf den Ergebnissen einer Analyse deutscher Medienartikel 2010–2019



**Blick in den Tagebau**

### **Ansprechpartnerin**

**Prof. Dr. Sandra Venghaus**,  
IEK-STE Systemforschung und Technologische Entwicklung,  
Forschungszentrum Jülich,  
s.venghaus@fz-juelich.de

### **Beteiligte Core Groups**

**Dr. Wilhelm Kuckshinrichs, Prof. Dr. Sandra Venghaus, Mirko Dallendörfer, Sophia Dieken, Florian Siekmann**,  
IEK-STE Systemforschung und Technologische Entwicklung,  
Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Jan Börner, Dr. Sascha Stark**,  
ILR – Ökonomik nachhaltiger Landnutzung und Bioökonomie,  
Universität Bonn

**Prof. Dr. Joachim von Braun**,  
ZEF – Ökonomischer und technologischer Wandel, Universität Bonn

**PD Dr. Wolfgang Britz, Dr. Till Kuhn**,  
ILR – Ökonomische Modellierung von Agrarsystemen, Universität Bonn

**Prof. Dr. Stefanie Bröring, Simon Ohlert, Anna Waßenhoven**,  
ILR – Technologie-, Innovationsmanagement und Entrepreneurship,  
Universität Bonn

**Prof. Dr. Monika Hartmann, Janine Macht, Jeanette Klink-Lehmann**,  
ILR – Marktforschung der Agrar- und Ernährungswirtschaft,  
Universität Bonn

**Prof. Dr. Thomas Heckeley, Dr. Yaghoob Jafari**,  
ILR – Wirtschafts- und Agrarpolitik, Universität Bonn

**Prof. Dr. Silke Hüttel, Dr. Stefan Seifert**,  
ILR – Produktionsökonomik, Universität Bonn

**Prof. Dr. Ulrich Schurr, Dr. Leonie Göbel**,  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich

**Prof. Dr. Grit Walther, Ali Abdelshafy**,  
Lehrstuhl für Operations Management, RWTH Aachen

# Kann man Forschen für die Bioökonomie lernen?

Ausbildung und Kommunikation waren von Beginn an Eckpfeiler des BioSC. Warum? Die Bioökonomie kann nur dann funktionieren, wenn im Sinne einer nachhaltigen Wertschöpfungskette die unterschiedlichsten Disziplinen und alle Stufen der hierfür nötigen Prozesse beteiligt sind. Dies reicht von der Biomasseverfügbarkeit und -herstellung über ihren Transport, ihre Verarbeitung, Umsetzung und Nutzung bis hin zum Verkauf und der gesellschaftlichen Akzeptanz. Um dies zu erreichen, muss bei allen Beteiligten ein Bewusstsein für die Möglichkeiten und ein Verständnis für die Konzepte und Inhalte der angrenzenden Disziplinen erzeugt werden. Dazu gehört auch die Befähigung, die eigene disziplinäre Exzellenz gemeinsam mit anderen Experten zusammenzuführen, um Ideen auszutauschen und gemeinsam Lösungen für komplexe Fragen zu erarbeiten. Diese interdisziplinäre Lösungskompetenz steht im Zentrum des Ausbildungskonzepts des BioSC.

In den vergangenen zehn Jahren wurden im BioSC eine Vielzahl von Konzepten erprobt und evaluiert sowie die unterschiedlichsten Zielgruppen adressiert. Sehr früh in den Fokus wurde die Ausbildung und Vernetzung von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gestellt. Eine wichtige Zielgruppe war und ist die Gruppe der Doktorandinnen und Doktoranden sowie der jungen Postdocs, da diese die Inhalte und Konzepte der Bioökonomiestrategie langfristig in Wissenschaft und Gesellschaft vermitteln. Neben ihren fachlichen Kompetenzen sind die bereits genannten Fähigkeiten zur interdisziplinären Arbeit und somit die überfachliche Zusammenarbeit von zentraler Bedeutung. In internationalen Season Schools, welche durch Wissenschaftler des BioSC getragen werden und jeweils aktuelle Themen der Bioökonomie adressieren, können sich junge Wissenschaftler und Doktoranden inhaltsbezogen fachliche und überfachliche Kompetenzen aneignen. Vom BioSC wurden zum Beispiel in Summer

Schools Themen wie „From plant to product. Value chains in a sustainable bioeconomy using the example of Costa Rica and Germany“ oder „From plants to pilot plants. Holistic process development in a sustainable bioeconomy“ erarbeitet und vermittelt.

Junge Wissenschaftler und Doktoranden, welche direkt in Projekten des BioSC arbeiten, müssen sich von Beginn an in interdisziplinäre Forschungsgruppen einfügen und stehen somit vor besonderen Herausforderungen. Ihre disziplinspezifische fachliche Ausbildung wird Ihnen in einer der Core Groups vermittelt. Das BioSC fordert aber auch speziell von den Doktoranden, sich intensiv mit anderen Doktoranden und Wissenschaftlern – auch und insbesondere aus anderen Disziplinen – zu vernetzen. Sie treffen sich auf gemeinsamen Retreats, um sich auszutauschen und ihre Arbeit zu diskutieren. Sie erhalten die Möglichkeit, kleine gemeinsame interdisziplinäre Projekte zu entwickeln und dafür auch eigene Mittel zu beantragen. Sie können Kontakte zur Industrie über Exkursionen knüpfen, welche – wann immer möglich – auch mit Workshops und dem inhaltlichen Austausch mit den dort tätigen Mitarbeitenden verbunden werden. Ein Beispiel ist ein kürzlich durchgeführter Besuch bei der BRAIN AG in Zwingenberg. Der Workshop war so erfolgreich, dass auch vonseiten des Unternehmens der Wunsch entstanden ist, solche Workshops regelmäßig zu wiederholen. Und selbstverständlich leisten die Doktoranden auf wissenschaftlicher Ebene wesentliche Beiträge zu den jährlichen internationalen BioSC Symposia sowie zu unterschiedlichsten Fachkonferenzen.

Auch über die Gruppe der direkten BioSC-Doktoranden und -Doktorandinnen hinaus wird, durch den jährlichen NRW-Doktorandentag „Future Bioeconomy“ die Möglichkeit zur Vernetzung mit anderen Doktoranden aus ganz Nordrhein-Westfalen geschaffen. Bei diesen Doktorandentagen lädt das BioSC gemeinsam mit sei-



nem Netzwerk aus Graduiertenschulen und Verbänden, die sich in der Bioökonomie-relevanten Ausbildung engagieren, Persönlichkeiten aus der Industrie, aus Start-ups oder aus interdisziplinären Forschungsverbänden sowie Verbänden ein. Ziel dieser Veranstaltungen ist es, den Doktoranden niederschwellig die Möglichkeit zu bieten, in Kleingruppen mit den eingeladenen Sprechern – nach deren Impulsvorträgen – sowohl über die Umsetzung und Relevanz der Bioökonomie als auch über die persönlichen Werdegänge der Sprecher sowie die Perspektiven für junge Wissenschaftler in der Bioökonomie zu diskutieren.

Die Förderung des bioökonomischen Denkens der Doktoranden setzt jedoch voraus, dass auch auf der Seite der ausbildenden Wissenschaftler und der direkten Betreuer der Wille und das entsprechende Bewusstsein vorhanden sind. Genau hier setzt der jährliche vergebene BioSC Supervision Award an: Eine mit 25.000 Euro Forschungsgeld dotierte Auszeichnung für herausragende Leistungen in der Doktorandenförderung in Richtung Vernetzung, wissenschaftliche Selbstständigkeit und Exzellenz, interdisziplinäres Denken und Förderung des „Blicks über den Tellerrand“. Das Besondere an dieser Auszeichnung ist die – in

aller Regel gemeinsame – Nominierung durch einen Core Group-Leiter oder eine Leiterin und die betreuten Doktoranden. Die Nominierung belegt die wissenschaftliche Exzellenz und die herausragende Betreuungsarbeit der Nominierten. Die Tatsache, dass bereits zwei BioSC FocusLab-Leiter diesen Preis erhalten haben und somit eine junge Wissenschaftlerin und ein junger Wissenschaftler, welche schon früh in ihrer Karriere mit der Koordination eines großen interdisziplinären Bioökonomie-Projektes betraut wurden, zeigt, dass das Konzept der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im BioSC auf diversen Ebenen erfolgreich ist. Das wird nicht zuletzt auch dadurch belegt, dass das BioSC bereits zweimal als federführendes Mitglied der Koordinatorengruppe für den Education Workshop des Global Bioeconomy Summits (2018 und 2020) ausgewählt wurde. Insgesamt hat sich hierdurch eine Vernetzung mit anderen europäischen Gruppen entwickelt, welche das Thema Bioökonomie-Ausbildung adressieren, darunter die Community of Practice for Bioeconomy Education (CoP BioEdu) sowie die Association of European Life Science Universities (ICA), mit dem gemeinsamen Ziel, international die Entwicklung von Ausbildungskonzepten für die Bioökonomie mitzugestalten.

## BioökonomieREVIER Rheinland – Modellregion für nachhaltiges Wirtschaften

Ein Schwerpunktthema des Strukturwandels im Rheinischen Revier ist die Entwicklung einer Modellregion für nachhaltiges Wirtschaften. Die Bioökonomie ist dabei ein Schlüsselthema. Auf Basis biobasierter Innovationen sollen neue, regionale Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle etabliert werden. Das Rheinische Revier bietet dafür herausragende wissenschaftliche, wirtschaftliche und gesellschaftliche Voraussetzungen. Mit Bioökonomie kann der Wandel von einer Kohleregion zu einer Modellregion für Nachhaltigkeit und Klimaschutz gelingen.

Im Jahr 2019 ist die Strukturwandelinitiative BioökonomieREVIER vom Institut für Pflanzenwissenschaften am Forschungszentrum Jülich initiiert worden. 15 Innovationslabore und die Koordinierungsstelle entwickelten gemeinsam mit Akteuren aus Wirtschaft, Kommunen, Landwirtschaft, Wissenschaft, Bildung und Politik sowie Öffentlichkeit in der Region Ansätze, wie eine Transformation erfolgreich ablaufen kann. Vielversprechende biobasierte Wertschöpfungskonzepte werden direkt in praktische und regionale Lösungen für Unternehmen, Landwirte, Kommunen und Gesellschaft übersetzt.

Für die Entwicklung von BioökonomieREVIER war das Bioeconomy Science Center ein entscheidender Wegbereiter. Besondere Bedeutung hatten dabei die Bündelung der regionalen Bioökonomie-Forschung, die Herausbildung thematischer Forschungsschwerpunkte und die Entwicklung einer „Bioeconomy Community“ im Rheinland, die für den Strukturwandel schnell aktiviert werden konnte. Im Rahmen des NRW-Strategieprojektes BioSC entstand so ein regionales Forschungsnetzwerk auf dem Gebiet der systemischen Bioökonomie-Forschung. Die inter- und transdisziplinär angelegten BioSC-Forschungsprojekte liefern seit Jahren lösungsorientierte und wirtschaftlich anschlussfähige Innovationskonzepte für die Region.

Dieses herausragende Potenzial war eine wichtige Voraussetzung für die Aufnahme der Bioökonomie als wichtiges Zukunftsfeld in der regionalen Wirtschafts- und Strukturentwicklung. Die Zusammenarbeit mit den Revierknoten und zahlreichen Partnern aus der Praxis eröffnet zusätzlich Chancen für notwendige wirtschaftsstrukturelle Veränderungen. Die Entwicklung biobasierter Wertschöpfungskonzepte schafft die Möglichkeit, die Nutzung und den Schutz der natürlichen Ressourcen in Einklang zu bringen. Biobasierte Geschäftsmodelle bieten die Grundlage für Wirksamkeitseffekte in allen Dimensionen (Einkommen, Arbeitsplätze, Nachhaltigkeit) des Strukturwandels und die gesellschaftlichen Perspektiven auf nachhaltiges Leben und Arbeiten bekommen innovative Impulse. Im Rheinischen Revier entsteht dadurch ein einzigartiges Reallabor für biobasierte Technologie- und Dienstleistungskonzepte.

Entlang der drei Themencluster Innovative Landwirtschaft, Integrierte Bioraffinerien und Biotechnologie & Kunststofftechnik entwickeln die Partnereinrichtungen von BioökonomieREVIER in Innovationslaboren Forschungskonzepte und Technologien mit hohem Anwendungspotenzial. Dabei wird es nicht bleiben. Die Region soll ein Leuchtturm für den Transfer von Bioinnovationen in die realwirtschaftliche Praxis regional und international werden. Ein Schlüssel dafür ist die Vernetzung wissenschaftlicher Kompetenzträger mit Akteuren, die zur Bewältigung betrieblicher und gesellschaftlicher Herausforderungen auf Innovationen setzen. In Innovationspartnerschaften werden Geschäftsmodelle im Sinne der Nachhaltigkeit (Green Deal) erneuert und auch neue Unternehmen gegründet. Für die Gründungsförderung wurde in BioökonomieREVIER ein speziell auf die Bioökonomie ausgerichtetes Accelerator-Programm „BIOBooster“ etabliert. Gründerteams werden bei der Unternehmensentwicklung und Skalierung unterstützt, ein direkter Transfer auch aus



den BioSC-Projekten in die kommerzielle Anwendung erleichtert. Einen besonderen Anreiz zur Umsetzung nachhaltiger bioökonomischer Lösungen entwickeln Bioökonomie-Profilorte im Rheinischen Revier. Profilotorte haben einen thematischen Fokus und verfügen über eine spezifische Infrastrukturausstattung (zum Beispiel Hightech-Feldtechnikum) und Nähe zu exzellenten Partnern aus Forschung, Wirtschaft und Landwirtschaft.

Das Rheinische Revier ist aber auch ein Raum, über den geforscht wird: die BioSC-Kompetenzplattform Transform2Bio nutzt die Zugänge, um Erkenntnisse der Transformationsforschung und damit wichtige Beiträge für die Gestaltung des Wandels im Rheinland und in anderen Regionen zu erarbeiten. Transform2Bio erforscht den Transformationsprozess systemisch und zeigt mögliche Transformationspfade auf. Gerade hier wird deutlich, wie BioökonomieREVIER und BioSC durch eine enge Verzahnung ihrer Aktivitäten eine erfolgreiche Regional- und Strukturentwicklung fördern können.

Die Arbeiten von BioökonomieREVIER münden in regionale Empfehlungen für das Rheinische Revier, die im Herbst 2021 vorgelegt

werden. Parallel werden bereits praktische Umsetzungswege besprochen. Wirtschaftliche Innovationen werden hierbei genauso adressiert wie soziale und gesellschaftliche Themen. Wichtige Meilensteine auf dem Weg dahin sind unter anderem die Vernetzung von regionalen Akteuren, die Erfassung und Auswertung von Stoffströmen aus der lokalen Land- und Ernährungswirtschaft, der Aufbau regionaler Innovationspartnerschaften von Unternehmen, Landwirtschaft und Wissenschaft, die Erstellung kommunaler Bioökonomie-Profile und die Analyse von Bildungs- und Ausbildungsmöglichkeiten. Für die interessierte Öffentlichkeit gibt es interaktive Ausstellungsformate. Der Prozess wird begleitet durch eine Bürgerbeteiligung.

#### **Ansprechpartner**

**Dr. Christian Klar**  
Koordinierungsstelle BioökonomieREVIER,  
IBG-2 Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich  
c.klar@fz-juelich.de, www.biooekonomierevier.de

# Zusammenarbeit für die Entwicklung der Bioökonomie

Die Transformation von einer auf fossilen Rohstoffen zu einer nachhaltigen, auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Wirtschaft ist eine Herausforderung, die zielgerichtete und langfristige Kooperationen auf regionaler, nationaler, europäischer sowie globaler Ebene erfordert. Dabei sind alle Akteure gleichermaßen gefordert: Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft. Wichtige Grundlagen für eine Kooperation in Europa für eine wissenschaftsbasierte, zirkuläre Bioökonomie hat die Europäische Kommission bereits vor mehr als 15 Jahren mit der Veröffentlichung der Knowledge-Based-Bio-Economy (KBBE) als übergreifendes Konzept und Leitmotiv zur Lösung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen geschaffen. Dem Konzept folgten in den Jahren darauf Politikstrategien, Roadmaps und Aktionspläne. Diese wurden unter anderem durch das europäische Forschungsrahmenprogramm Horizont 2020, durch Beratungsgremien wie dem europäischen Bioökonomierat und rechtliche Direktiven unter anderem zu erneuerbaren Energien umgesetzt, um die Entwicklung einer klima- und ressourcenschonenden, wettbewerbsfähigen Wirtschaftsweise in Europa voranzutreiben. Der im Dezember 2019 veröffentlichte Europäische Grüne Deal zur Umgestaltung der EU-Wirtschaft für eine nachhaltige Zukunft hat zahlreiche Leitlinien der Bioökonomie zum Ziel.

Ebenso hat die Entwicklung einer Bioökonomie auf globaler Ebene in den letzten Jahren an Bedeutung genommen. Ausdruck hierfür ist zum Beispiel die Ausrichtung eines globalen Bioökonomie-Gipfels (Global Bioeconomy Summit, GBS), der erstmals 2015 in Berlin stattgefunden und im November 2020 zum dritten Mal rund 3.000 Bioökonomie-Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft aus mehr als 50 Ländern zusammengebracht hat. Damit ist der GBS und sein internationaler Beirat die zentrale weltweite Kooperationsplattform, um die aktuellsten Entwicklungen und Herausforderungen

der globalen Bioökonomie zu diskutieren und Handlungsempfehlungen für den Fortschritt der Transformation zu erarbeiten. Wissenschaftler des BioSC haben auch beim dritten, digitalen GBS entscheidend zur Gestaltung und Durchführung des Weltgipfeltreffens beigetragen. Sie haben vier von insgesamt zwölf interaktiven Workshops mitgestaltet und -geleitet, die Themen wie Bioraffinerien, Regionalisierung der Bioökonomie, Bioökonomie-Ausbildung und Transformationskonzepte umspannten.

Auf europäischer wie internationaler Ebene bestehen zahlreiche Partnerschaften und Forschungskooperationen. Da sind zum einen beispielhaft die strategischen Projektverbünde und Netzwerke zu modernen Forschungsinfrastrukturen in Europa zu nennen, wie die Europäische Infrastruktur zur mehrskaligen Pflanzenphänotypisierung und Simulation für Ernährungssicherheit und Klimawandel (EMPHASIS), das Europäische Pflanzen Phänotypisierungs Netzwerk (EPPN) oder das Europäische Infrastrukturprojekt IBISBA – Accelerator für Innovationen in der industriellen Biotechnologie und synthetischen Biologie. Zum anderen bestehen langjährige Forschungskooperationen und strategische Partnerschaften in unterschiedlichen fachlichen Bereichen im asiatischen Raum mit unter anderem der Nationalen Wissenschafts- und Technologieentwicklungsagentur Thailand (NSTDA), der Chinesischen Akademie der Wissenschaften (CAS), mit Forschungseinrichtungen in Indien und Malaysia sowie der Russischen Föderation. In Lateinamerika sind Länder wie Brasilien, Argentinien oder Uruguay als Beispiele zu nennen. Ebenso bestehen Kooperationsprojekte mit den USA, Australien und Afrika.

Das BioSC ist über seine Partnerinstitutionen und die beteiligten Wissenschaftler eng mit drei wissenschaftlichen Exzellenzclustern in der Region verknüpft: CEPLAS – das Exzellenzcluster für



**In dem thailändisch-deutschen BMBF-Forschungsprojekt „CassavaStore“** geht es um den verbesserten und ressourcenschonenden Anbau von Cassava, eine der wichtigsten Nahrungs- und Rohstoffpflanzen in Asien und Afrika.

Pflanzenwissenschaften, PhenoRob – Robotik und Phänotypisierung für Nachhaltige Nutzpflanzenproduktion sowie das Fuel Science Center (FSC) für maßgeschneiderte Biokraftstoffe. Dabei sind die Exzellenzcluster durch die mehrfache Mitwirkung von Wissenschaftlern personell und inhaltlich miteinander vernetzt. Eine solche Ballung von wissenschaftlicher Exzellenz in Bioökonomie-relevanten Themenbereichen in einer Region ist einzigartig in Deutschland, aber auch international und ist ein Beispiel für die Kompetenz des BioSC, als Basis zur Vernetzung der wissenschaftlichen Akteure jenseits seiner selbst zu dienen. Neben starken wissenschaftlichen Kooperationen bestehen Zusammenarbeiten zu anwendungsnahen Verbänden wie zum Cluster Industrielle Biotechnologie (CLIB), BIO.NRW, dem Netzwerk zur Biotechnologie in NRW, oder dem Geoverbund ABC/J für Geowissenschaften.

In nationalen Raum gehen die Kooperationen weit über die Grenzen Nordrhein-Westfalens hinaus. Seit der Gründung des

BioSC sind zahlreiche weitere Clusterinitiativen zur Bioökonomie in Deutschland gefolgt, zu denen partnerschaftliche Kontakte und einander ergänzende Kooperationen bestehen. Beispielhaft zu erwähnen sind der WissenschaftsCampus Halle für pflanzenbasierte Bioökonomie, das BioEconomy Cluster in Mitteldeutschland, das BioPro-Cluster in Baden-Württemberg, der Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit der Technischen Universität München oder das Deutsche Biomasseforschungszentrum in Leipzig.

Für die Realisierung biobasierter Prozesse und biobasierter gesellschaftlicher Transformationskonzepte ist neben einer disziplinübergreifenden Vernetzung zwischen Wissenschaftlern eine enge Zusammenarbeit auf Augenhöhe zwischen Wissenschaft und Wirtschaft eine essenzielle Voraussetzung. Diese muss alle Bioökonomie-relevanten wirtschaftlichen Bereiche umfassen und auch hier eine bislang zum Teil wenig ausgeprägte Vernetzung zwischen unterschiedlichen Industriebereichen entwickeln. So



**Der Workshop zu Lehre und Ausbildung beim Global Bioeconomy Summit 2018 wurde vom BioSC mitgestaltet.**

96

können zum Beispiel Reststoffe aus der Lebensmittelproduktion als Grundstoffe für die Herstellung von Biokunststoffen eingesetzt werden. Durch solche neuartigen Kooperationen entstehen zusätzliche Innovations- und Wertschöpfungsnetze, die zur Wettbewerbsfähigkeit biobasierter Prozesse und Produkte beitragen und neue Märkte und Arbeitsplätze schaffen können. Die Rolle des BioSC ist dabei, wissenschaftliche Fragestellungen bezüglich der technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Machbarkeit solcher neuen Prozesse und Produkte zu erforschen. In Kooperation mit kleinen und mittleren Unternehmen, Industrieunternehmen oder durch Ausgründungen werden entwickelte Prozesse, Technologien oder Transformationskonzepte dann in Richtung Anwendung gebracht. Bei der Überführung von Entwicklungen aus dem Labor in die Anwendung in der Region eröffnet das Strukturwandelprojekt BioökonomieREVIER hervorragenden Zugang zu regionalen Kooperationspartnern. Mit seinem Unternehmens- und Akteursnetzwerk und Innovationsmaßnahmen (zum Beispiel InnoLabs) ist eine zielgerichtete, für die Möglichkeiten und Voraussetzungen der Region passgenaue Weiterentwicklung und Überführung von Forschungsergebnissen in die Anwendung möglich.

Eine enge Zusammenarbeit mit regionalen bis internationalen Partner aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik wird auch in den kommenden Jahren eine wichtige Säule und Aktivität des BioSC sein.



**In einer brasilianisch-deutschen Forschungsk Kooperation, dem BMBF-Projekt „PuresBioAshes“, wurde die Verwertung von landwirtschaftlichen Restströmen untersucht.**



Für eine nachhaltige Bioökonomie



## 10 Jahre Bioeconomy Science Center

### Herausgeber

BioSC Geschäftsstelle  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
IBG-2: Pflanzenwissenschaften  
52425 Jülich  
biosc@fz-juelich.de  
www.biosc.de

### Stand

April 2021

### Redaktion

Dr. Heike Baron (Gesamtkoordination), Brigitte Stahl-Busse,  
Dr. Heike Slusarczyk, Prof. Dr. Ingar Janzik, Prof. Dr. Ulrich Schurr

Autoren der Artikel zu den Forschungsprojekten und zum Projekt BioökonomieREVIER sind die unter den Artikeln genannten Ansprechpartner, sofern nicht anders vermerkt.

### Grafik und Layout

Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

**Druck:** Schloemer + Partner GmbH

**Auflage:** 300

### Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten.

In dieser Publikation wurde zur besseren Lesbarkeit weitgehend auf die Differenzierung der Geschlechter bei Personenbezeichnung verzichtet. Im Sinne einer Gleichbehandlung umfassen die entsprechenden Bezeichnungen stets alle Geschlechter.

Diese Publikation ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des NRW-Strategieprojektes BioSC, gefördert vom Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

### Bildnachweis

#### istock.com:

halbergman, Kuzmalo, fotografixx: Titel; wundervisuals: S. 23; Maksud\_kr: S. 27; BONDART: S. 30; wirOman: S. 36; Tomas Miskinis: S. 39; Andreas Vitting, Sinhyu: S. 40; JudiParkinson: S. 42; Andrea Sommer: S. 45; Kuzmalo: S. 47; rob\_lan, fireworks\_pixels: S. 54; Stas\_V: S. 58; Arkadij Schell: S. 61; greenleaf123: S. 66; Yuuji: S. 74; Patrick Daxenbichler: S. 77; richcarey: S. 82; fotografixx: S. 87; davelogan: S. 88

#### Forschungszentrum Jülich: S. 65, S. 91

Ralf-Uwe Limbach: S. 3, S. 16, S. 37

Sascha Kreklau: S. 26, S. 85, S. 86 rechts, S. 89, S. 93

IBG-1: S. 20, S. 52, S. 53, S. 54, S. 67 – 70, S. 75

IBG-2: S. 11, S. 13, S. 43, S. 46, S. 95, S. 96 oben,  
S. 96 unten (Dr. Nicolai Jablonowski)

#### HHU Düsseldorf:

Institut für Pharmazeutische und Medizinische Chemie:  
S. 28, S. 48 (Jonas Dittrich)

Institut für Bioorganische Chemie: S. 32

Institut für Biochemische Pflanzenphysiologie: S. 29

Institut für Mikrobiologie: S. 55 (Kira Müntjes), S. 56

Institut für Molekulare Enzymtechnologie: S. 62, S. 63 (unter Verwendung einer Abbildung aus Brands et al., Chemical Communications 56, 8631-8634 (2020)), S. 64, S. 72 (Dr. Achim Heck), S. 73 (Andreas Woop in Zusammenarbeit mit Dr. Thomas Gensch (IBI-1), Forschungszentrum Jülich)

#### RWTH Aachen: S. 44

AVT – Bioverfahrenstechnik: S. 12, S. 31, S. 78

AVT – Fluidverfahrenstechnik: S. 35 (Manuel Lück), S. 60 links

AVT – Chemische Verfahrenstechnik: S. 81 (Patrick Bongartz)

ABBT – Pflanzenphysiologie: S. 32, S. 50 (A) (Patrick Schwinges)

ABBT – Angewandte Mikrobiologie: S. 40, S. 80

ABBT – Biotechnologie: S. 49 (Liudmyla Goncharenko)

Lehrstuhl für Bioorganische Chemie: S. 59, S. 60 rechts

Lehrstuhl für Operations Management:

S. 87 links (eigene Darstellung/Ali Abdelschafy)

## Universität Bonn:

INRES – Gartenbauwissenschaft: S. 34 (Dr. Simone Röhlen-Schmittgen),  
S. 50 (B) (Dr. Shyam Pariyar)

INRES – Molekularbiologie der Rhizosphäre: S. 51 (Janina Zierul)

S. 4: Prof. Dr. Thomas Müller-Kirschbaum

S. 5: Prof. Dr. Peter Westhoff

S. 6: Prof. Dr. Sandra Venghaus

S. 10: Vereinte Nationen

S. 33: [stock.adobe.com/photlook](https://stock.adobe.com/photlook)

S. 38a – c: [doi.org/10.1007/s10811-018-1390-9](https://doi.org/10.1007/s10811-018-1390-9)  
(Schreiber et al. 2018)

S. 38d: Poster zur Biogeomon 2017, Hofmann et al., <sup>33</sup>P Labeling  
of *C. vulgaris* algae for rhizotrone imaging studies

S. 41: Carraresi, L., Berg, S., & Bröring, S. (2018),  
*Journal of Cleaner Production*, 183, 87-101

S. 57: modifiziert nach Müller et al., *J Biol Eng* 12, 34 (2018)

S. 71: *Image of cutinase 1CUS (C. Martinez, P. De Geus, M. Lauwereys, G. Matthysens, C. Cambillau (1992) Fusarium solani cutinase is a lipolytic enzyme with a catalytic serine accessible to solvent Nature 356: 615-618) created with UCSF Chimera (E.F. Pettersen, T.D. Goddard, C.C. Huang, G.S. Couch, D.M. Greenblatt, E.C. Meng, T.E. Ferrin (2004) UCSF Chimera - a visualization system for exploratory research and analysis J Comput Chem 25: 1605-1612).*

*Image of alcohol dehydrogenase 4W6Z (S.B. Raj, S. Ramaswamy, B.V. Plapp (2014) Yeast alcohol dehydrogenase structure and catalysis Biochemistry 53: 5791-5803) created with UCSF Chimera (E.F. Pettersen, T.D. Goddard, C.C. Huang, G.S. Couch, D.M. Greenblatt, E.C. Meng, T.E. Ferrin (2004) UCSF Chimera - a visualization system for exploratory research and Analysis J Comput Chem 25: 1605-1612).*

S. 83: modifiziert nach Bruckner et al.,  
*Environ. Res. Lett.*, 14, 045011 (2019)

S. 84: basierend auf Bröring (2016) Roadmapping the circular economy  
to align technological development with social needs. Working Paper,  
Universität Bonn

S. 86 links: Zukunftagentur Rheinisches Revier/Sandra Venghaus und  
Florian Siekmann

S. 89 links: Sophia Dieken und Sandra Venghaus:  
*Sustainability* 2020 (12), 7987



[www.blauer-engel.de/uz195](http://www.blauer-engel.de/uz195)

- ressourcenschonend und umweltfreundlich hergestellt
- emissionsarm gedruckt
- überwiegend aus Altpapier

CS4

Dieses Druckerzeugnis ist mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.

