



**DECHEMA**

Biotechnologie

# Mikroalgen-Biotechnologie

Gegenwärtiger Stand,  
Herausforderungen, Ziele



## IMPRESSUM

### Autoren

Dr. Michael Bippes	Volkswagen AG, Wolfsburg
Thomas Brauer	HanseWerk AG, Quickborn
Prof. Dr. Thomas Brück	TU München, Garching
Prof. Dr. Rainer Buchholz	Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen
Dr. Fritz Cotta	GICON GmbH, Wolfen
Prof. Dr. Thomas Friedl	Universität Göttingen
Prof. Dr. Carola Griehl	Hochschule Anhalt, Köthen
Prof. Dr. Christoph Griesbeck	MCI Management Center Innsbruck
Ulrike Heckenberger	Airbus Defence and Space GmbH, München
Prof. Dr. Hans Kistenmacher	Linde AG, Pullach
Dr. Jochen Michels	DECHEMA e.V., Frankfurt
Dr.-Ing. Mathias Mostertz	Linde AG, Pullach
Prof. Dr.-Ing. Kai Muffler	Fachhochschule Bingen
Dr. Christoph Müller-Rees	Wacker Chemie AG, München
Prof. Dr.-Ing. Clemens Posten	Karlsruher Institut für Technologie
Dr. Peter Ripplinger	Subitec GmbH, Stuttgart
Dr. Karsten Schmidt	IGV – Institut für Getreideverarbeitung GmbH, Nuthetal
Prof. Dr. Stephanie Stute	Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Prof. Dr. Walter Trösch	Stuttgart
Dr. Stefan Verseck	BASF Personal Care and Nutrition GmbH, Düsseldorf

### Herausgeber

DECHEMA-Fachgruppe „Algenbiotechnologie“

### Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.  
Dr. Kathrin Rübberdt  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Februar 2016

ISBN: 978-3-89746-184-0

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Mikroalgen – Die solare Zellfabrik für biobasierte Rohstoffe</b>	<b>6</b>
2.1. Vielfalt der Mikroalgen – Das unerforschte Potenzial	6
2.2. Stammentwicklung – Biologische und technologische Optimierungen	7
2.3. Produkte – von Hochwertstoffen bis zu Grundchemikalien	8
<b>3. Photobioprosesse – Technologien entlang der Wertschöpfungskette</b>	<b>10</b>
3.1. Die Algenkultivierung – der technische Ankerpunkt der Wertschöpfungskette	10
3.2. Die Aufarbeitung – der herausfordernde Weg zum Endprodukt	13
3.3. Die Bioraffinerie – Wege zur ganzheitlichen stofflichen und energetischen Nutzung der Mikroalgenbiomasse	13
<b>4. Prozessintegration – Mikroalgenproduktion im ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Umfeld</b>	<b>16</b>
4.1. Standortfragen – wohin zwischen Licht und Schatten, Wüste und Meer	16
4.2. Internationale Zusammenarbeit – Ausbildung strategischer Allianzen	18
4.3. Der Mensch – Teil, Ziel und Sinn der Wertschöpfungskette	18
<b>5. Fazit</b>	<b>20</b>

## Vorwort

*„Eine der größten globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts besteht darin, in Zeiten des Klimawandels eine wachsende Weltbevölkerung nachhaltig mit Nahrungsmitteln, Rohstoffen und Energie zu versorgen.“<sup>2</sup>*

Darauf hat Deutschland mit der Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 und entsprechenden Länderinitiativen reagiert. Pflanzliche Biomasse spielt in dieser Strategie eine besondere Rolle, da Pflanzen mit Hilfe von Sonnenlicht und des Kohlendioxids aus der Atmosphäre ihre gesamte Biomasse nachhaltig und vor allem ohne direkten Verbrauch von fossilen Energieträgern erzeugen können. Diese auf der Photosynthese basierende Fähigkeit der Pflanzen ist somit Grundpfeiler des aktuellen Konzeptes der Bioökonomie, auf umweltfreundliche Weise endliche durch nachwachsende Rohstoffe zu ersetzen. Für Landpflanzen gibt es jedoch deutliche Grenzen der Anwendung, weil Ackerflächen nur limitiert zur Verfügung stehen.

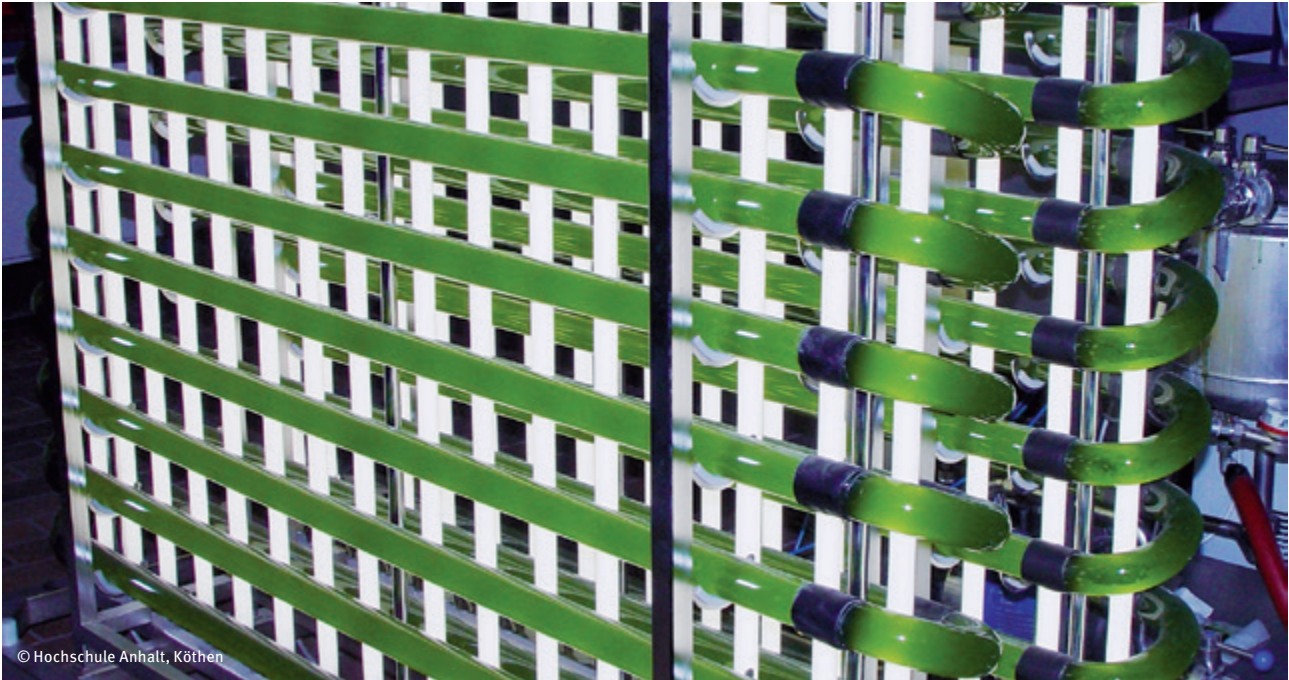
Eine bisher weitgehend vernachlässigte Option zur Produktion von Biomasse als nachwachsendem Rohstoff ist die photoautotrophe (mit Hilfe von Sonnenlicht) Kultivierung von Mikroalgen, die ohne Konkurrenz zu landwirtschaftlichen Flächen in Gewässern oder Reaktoren erfolgen kann. Mikroalgen ermöglichen Produkte mit einzigartigen Eigenschaften, die in Form von Hochwertprodukten zur Lebens- und Futtermittel-Ergänzung oder für die Kosmetik seit Längerem am Markt eingeführt sind, die aber auch für Pharmazie und Landwirtschaft hochinteressant sind. Die bekanntesten etablierten Beispiele sind die Farbstoffe Astaxanthin und  $\beta$ -Carotin sowie die mehrfach-ungesättigten Fettsäuren (PUFA) für eine gesunde menschliche Ernährung. Trotz dieser offensichtlichen Attraktivität beträgt die weltweit produzierte Algenbiomasse heute jedoch nur einige tausend Tonnen Trockensubstanz pro Jahr. Ein Grund dafür ist, dass es noch keine großvolumigen Produktionsanlagen für die wirtschaftliche Darstellung von Nahrungsergänzungsmitteln für die menschliche Ernährung, Futtermitteln, Bulk-Chemikalien oder chemischen Energieträgern aus Mikroalgen gibt.

Dem Beirat der DECHEMA-Fachgruppe **Algenbiotechnologie** gehören Experten aus Industrie und Forschung an, die gemeinsam die Wertschöpfungsketten von der Biotechnologie/Molekularbiologie der Algen über die spezielle Bioprozesstechnik bis hin zur Produktaufreinigung vollständig analysieren, sowohl für die (nähr-)stoffliche als auch für die energetische Algenutzung. Der Beirat organisiert und plant seit 2011 den jährlich stattfindenden Bundesalgenstammtisch, der Politik, Industrie und Wissenschaft gleichermaßen anspricht. Ein erstes Positionspapier „Algenbiotechnologie – Bestandsaufnahme, Vision und strategische Weiterentwicklung“ wurde bereits 2009 veröffentlicht. War damals noch die reine energetische Nutzung das zentrale Anliegen, ist inzwischen ein Bewusstsein gewachsen, dass die bereitgestellte chemisch-funktionelle Wertigkeit von Biomasse durch ausschließliche Konversion zu Energie nicht angemessen eingesetzt wird. Inzwischen wird die Bereitstellung von (Hoch-)Wertprodukten als – mit Blick auf Zeit und Wirtschaftlichkeit – schneller erreichbares Ziel weitgehend anerkannt.

Das vorliegende Papier will deshalb nicht nur den gegenwärtigen Stand der Mikroalgen-Biotechnologie und seine Entwicklungsfelder skizzieren, sondern auch die existierenden Hürden identifizieren und den Forschungsbedarf spezifizieren, um eine technisch realisierbare und wirtschaftlich sinnvolle Bioökonomie durch die Nutzung von Mikroalgen zu erreichen.

<sup>2</sup> Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030

## Zusammenfassung



Das aktuell vorliegende Positionspapier zeigt die besonderen Chancen, die in der industriellen Nutzung von Mikroalgen für die Bioökonomie liegen und setzt sich gleichzeitig ausdrücklich für eine Intensivierung der grundlegenden und angewandten Forschung ein, um so das Potential von algenbasierten Bioraffinerie-Konzepten besser auszuschöpfen. Es ist wichtig, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass eine vernetzte, optimierte und vollständige Nutzung der (Algen-)Biomasse erforderlich ist, um ökonomisch, ökologisch und sozial verträglich nachhaltig produzieren zu können. Das vorliegende Papier soll möglichst viele Entscheidungsträger in Forschung, Industrie, Politik und Gesellschaft informieren und in die Diskussion einbinden, um breiten Konsens von Anfang an zu fördern und so eine effektive Entwicklung der Algenbiotechnologie zu unterstützen.

Als dringliche Aktionsfelder sowohl für die Grundlagenforschung als auch für die anwendungsbezogene Forschung im Bereich Mikroalgen sehen wir:

» Zur besseren **Erschließung des Potentials der Vielfalt von Mikroalgen** ist eine Charakterisierung möglichst vieler verschiedener Algenspezies wichtig. Eine pro-

zess- und anwendungsorientierte Stammentwicklung ist in Einzelfällen für die biotechnologische Produktion erforderlich. Diese erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen der Grundlagenforschung und den Ingenieurwissenschaften unter Berücksichtigung der Anforderungen des Marktes. Dieser Weg muss deutschland- und europaweit finanziell ermöglicht und koordiniert werden, um schnell und effektiv den Erfolg der Bioökonomie zu sichern.

» Um die **Kosten für geschlossene Photobioreaktor-Systeme zu senken**, müssen transparente Materialien optimiert und die Produktionsverfahren für deren Serienproduktion weiterentwickelt werden. Hierbei sind – neben geringen Materialkosten – besonders der UV-Beständigkeit, der Verarbeitbarkeit durch Thermoformen sowie der Verringerung der Biofilmbildung besonderes Augenmerk zu schenken. Zudem sollten die Praxistests verschiedener geschlossener Systeme im Rahmen von größeren Verbundprojekten vorangetrieben werden, um auch die verfahrenstechnischen Fragestellungen wie z.B. Reinigungsprozesse im Pilotmaßstab untersuchen zu können.

- » **Prozesse der Biomasse-Aufarbeitung müssen entwickelt werden**, die eine Mikroalgenbiotechnologie auch im Industriemaßstab rentabel machen können. Dies gilt in besonderem Maße für Prozesse für niederpreisige Produkte. Methoden müssen entwickelt werden, die eine Qualitätskonstanz der Produkte gewährleisten bzw. die Prozesse so flexibel gestalten, dass die nicht vermeidbaren Qualitätsschwankungen nachwachsender Rohstoffe toleriert werden können.
- » Es ist dringend erforderlich, **Demonstrationsanlagen zur Algenproduktion und -verarbeitung** im Tonnenmaßstab zu errichten und zu betreiben, um belastbare Erkenntnisse über die Nachhaltigkeit solcher industrieller Produktionsanlagen zu gewinnen. Dabei ist die Evaluierung der möglichen geographischen Einsatzgebiete von Bedeutung.
- » Politik, Finanzwirtschaft und Wissenschaft sind aufgerufen, **kleine und mittelständische Unternehmen und Start-Ups zu unterstützen** in ihrem Bemühen, an geeigneten Standorten Produktionsanlagen zu errichten. Ein Förderschwerpunkt sollte die Vernetzung von kompatiblen Technologien und vorhandener Infrastruktur mit der Mikroalgentechnologie sein. Deutsche Industrieunternehmen sollten sich aktiv in die Entwicklung einbringen, um sich auch an außereuropäischen Großprojekten als Technologieträger beteiligen zu können.
- » Aus Forschung, Industrie, Handel, Endverbraucher, Geldgeber und der Politik müssen sich die **Stakeholder kontinuierlich über aktuelle Entwicklungen auf ihren jeweiligen Interessengebieten abstimmen**, um gemeinsam möglichst schnell tragfähige Lösungen an den Start zu bringen und mikroalgenbasierte Produkte in den Markt einzuführen. Vorteile in Bezug auf Umweltschutz, Ressourcen-Nachhaltigkeit, Energieschonung und innovative Produkte müssen engagiert und breitentauglich kommuniziert werden.
- » **Die Politik muss das Thema Mikroalgen auf breiter Ebene etablieren und kommunizieren**, um die Rahmenbedingungen für Forschung, Wirtschaft, Gesellschaft und den Ausbau internationaler Beziehungen für dieses Thema zu öffnen.

Für den **Dialog mit der Politik** steht der Beirat der Fachgruppe Algenbiotechnologie der DECHEMA als ein kompetenter Partner zur Verfügung. Dieser kann auf nationaler Ebene die Möglichkeiten zur Integration mikroalgenbasierte Produkte in bestehende Produktionskaskaden anregen und evaluieren. Dadurch können belastbare, praxisbezogene Daten erhoben werden.

# 1. Einleitung

Die gesellschaftlich weitgehend akzeptierten Bestrebungen, den anthropogenen Klimawandel durch Minderung der Klimagasemissionen zu begrenzen und gleichzeitig die Energie- und Rohstoffversorgung umweltfreundlich, nachhaltig und vor allem versorgungssicher auszubauen, stellen große Herausforderungen an Politik, Industrie, Gesellschaft und Forschung.

Die chemische Industrie, deren Prozesse und Produkte derzeit primär auf fossilen Rohstoffen basieren, sieht sich in ihrer künftigen Entwicklung mit besonderen Herausforderungen konfrontiert. Eine Substitution klassischer chemisch-physikalischer (Teil-)Prozesse durch biotechnologische Verfahren und die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen ist nur möglich, wenn es gelingt, neue Methoden und Materialien ökonomisch und ökologisch sinnvoll in bestehende Prozessketten zu integrieren.

Die erste relevante Teilaufgabe ist die Nutzung nachhaltig erzeugter nachwachsender Rohstoffe, die möglichst ohne Konkurrenz zur Landwirtschaft in Bezug auf Flächen-, Nährstoff- und Wasserressourcen in möglichst gleich bleibender Qualität gewonnen werden können. Eine erfolgversprechende Einführung bioökonomischer Szenarien muss die begrenzten Anbauflächen primär für die Lebens- und Futtermittelproduktion reservieren und die Produktion von Biomasse für den stofflichen und energetischen industriellen Einsatz so weit wie möglich auf die Flächen beschränken, die für diese Anwendung ungeeignet sind.

Insbesondere die Kultivierung von Mikroalgen ist in diesem Zusammenhang hochinteressant. Mikroalgenkulturen in geschlossenen oder offenen Anlagen ermöglichen nicht nur hohe Erträge ohne Konkurrenz zu landwirtschaftlich nutzbaren Flächen; die Anlagen erlauben gleichzeitig die gezielte Erzeugung definierter Kulturen und ihrer Inhaltsstoffe für eine gleichbleibende Produktqualität, wie sie mit Pflanzen nur schwerlich zu realisieren ist. Der überwiegende Teil der Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf dem Gebiet der Mikroalgenbiotechnologie erfolgt derzeit noch im Labormaßstab und konzentriert sich auf Teilgebiete. Die effektive Ausnutzung des stofflichen und energetischen Potentials von Algen im Sinne der Bioökonomie erfordert allerdings, dass alle prozesstechnischen und biotechnologischen Entwicklungen von Algenkultivierung und Aufarbeitung verstärkt gesamtsystemisch ver-

standen und unter diesem Aspekt in Forschungsprojekten bearbeitet werden.

Obwohl die Bedeutung von Algen für die Ökosphäre im Vergleich zu der der höheren Pflanzen auf den ersten Blick eher unwesentlich erscheinen könnte, ist ihre Relevanz für den Kreislauf der Stoffe kaum zu überschätzen. In ihrer Funktion als Primärproduzenten bilden Algen rund 30 % der neugebildeten Biomasse der Weltmeere und stehen stets an erster Stelle der marinen Nahrungskette. Die Synthese dieser Biomasse erfolgt in gleicher Weise wie bei den höheren Landpflanzen: Algen nutzen Sonnenlicht als Energiequelle, um CO<sub>2</sub> zu fixieren, wobei Sauerstoff freigesetzt wird. Die Menge an CO<sub>2</sub>, die der Atmosphäre bei diesem Vorgang entzogen wird, ist in etwa so groß wie die Menge, die von Landpflanzen gebunden wird. Gleiches gilt umgekehrt für den atmosphärischen Sauerstoff, der zu 50 % von maritimen Algen gebildet wird.

Auch wenn das erhebliche Potential phototropher Mikroalgen als Rohstoffproduzenten offensichtlich ist, besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, dieses Potential in relevanten Anwendungen dezidiert ausloten zu können. Primär ist zu klären, wie ausreichende Biomasse-mengen im Industriemaßstab verlässlich und rentabel zu produzieren sind. Durch frühzeitige Beteiligung industrieller Partner sind von Anfang an die speziellen Anforderungen industrieller Produktion zu berücksichtigen.

## 2. Mikroalgen – Die solare Zellfabrik für biobasierte Rohstoffe

Mikroalgen sind mikroskopisch kleine pflanzliche Lebewesen (Bild 1), die oft an aquatische Lebensräume und Gewässern – Seen, Flüsse oder Meere – gebunden sind, aber auch in terrestrischen Lebensräumen, etwa im Boden oder auf Gesteinsoberflächen, vorkommen. Schon seit fast 120 Jahren werden Mikroalgen auch vom Menschen aus den natürlichen Lebensräumen isoliert und im Labor kultiviert. Für die Kultur der Mikroalgen in größeren, technisch verwertbaren Mengen kommen sowohl offene Becken als auch geschlossene Reaktoren zum Einsatz. Mikroalgen wachsen in einem wässrigen Medium, das mineralische Nährstoffe enthält. Mikroalgen stellen somit eine neuartige Möglichkeit der Produktion pflanzlicher Biomasse dar, die für die Bioökonomie zwei entscheidende Vorteile hat:

- » Mikroalgen können pro Fläche bis zu fünfmal mehr Biomasse als klassische Energiepflanzen bilden. Als realistisch werden Werte von 100 t Biotrockenmasse pro Hektar und Jahr angesehen.
- » Für die Kultivierung ist keine wertvolle Ackerfläche notwendig, sondern es können praktisch alle Gegenden genutzt werden, für die es sonst keine Ansprüche gibt. Dazu gehören Trockengebiete, Industriebrachen, Brackwasserzonen oder auch offene Meeresflächen.

### 2.1. Vielfalt der Mikroalgen – Das unerforschte Potenzial

Die Mikroalgen stellen keine einheitliche biologische Gruppe dar, sondern teilen sich in mehrere teilweise extrem verschiedene Gruppen auf. Unter dem Begriff Mikroalgen wird also mehr ein Formenkreis von mikroskopisch kleinen photosynthetisch aktiven Organismen verstanden, die überwiegend in aquatischen Lebensräumen zu Hause sind. Von den geschätzt mehr als hunderttausend Algenarten sind weniger als zehntausend klassifiziert. Nur ein Bruchteil davon, etwa 20 Mikroalgen-Arten, wird bislang wirtschaftlich genutzt.

Schon seit Jahrtausenden züchten die Menschen höhere Pflanzen mit dem Ziel der Nahrungsmittel-, Baustoff- oder Textilproduktion. In den letzten Dekaden wurde die Züchtung durch bessere Einsicht in die Lebensvorgänge effizienter. Einerseits konvergierte die anfängliche Diversität in Richtung auf eine überschaubare Anzahl von Nutzpflanzen mit hohen Erträgen wie Mais oder Baumwolle, andererseits entwickelte sich eine große Vielfalt an Sorten, die für regionale Klimabedingungen oder für spezielle Anwendungsfälle optimiert wurden.

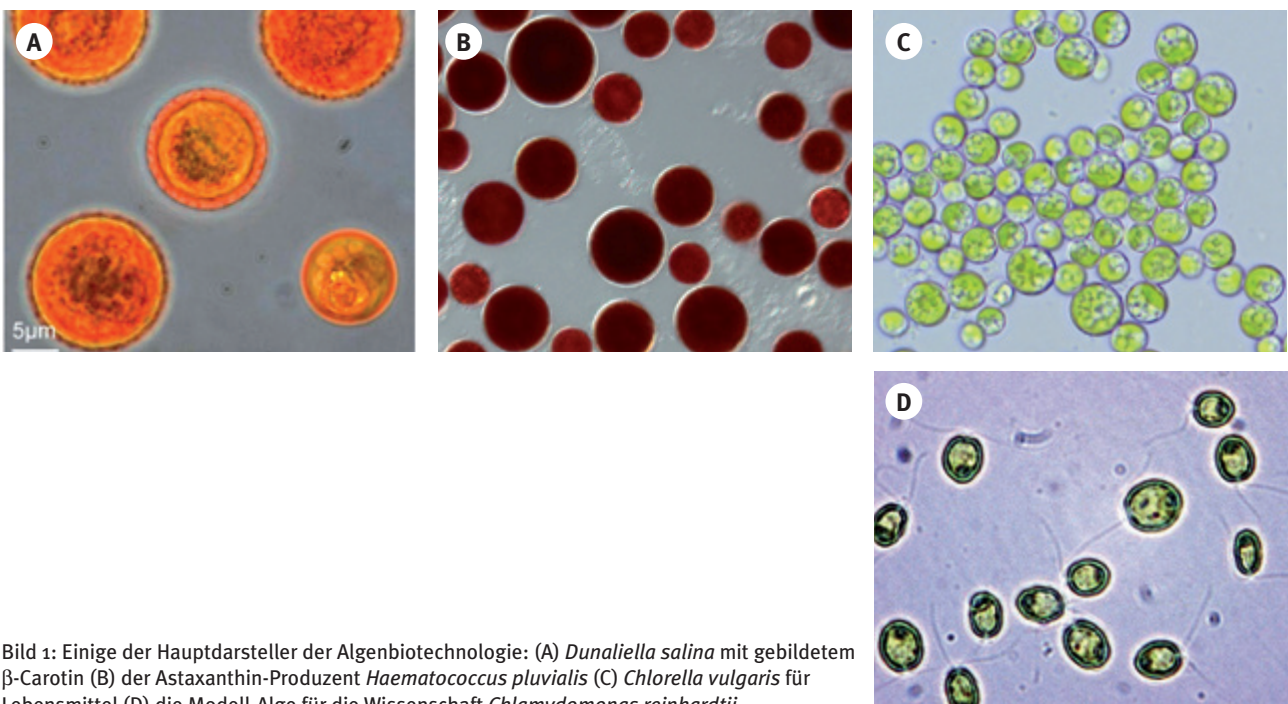


Bild 1: Einige der Hauptdarsteller der Algenbiotechnologie: (A) *Dunaliella salina* mit gebildetem  $\beta$ -Carotin (B) der Astaxanthin-Produzent *Haematococcus pluvialis* (C) *Chlorella vulgaris* für Lebensmittel (D) die Modell-Alge für die Wissenschaft *Chlamydomonas reinhardtii*



**Herausforderung:** Gerade dieser als Züchtung oder Domestikation bezeichnete Schritt steht für die Mikroalgen noch aus. Zwar liefern umfangreiche Screening-Projekte neue Stämme, die interessante Produkte in hoher Konzentration liefern, jedoch sind diese eher ihrer natürlichen Umgebung und nicht unbedingt den intensiven Bedingungen in einem Bioreaktor angepasst. Wenn man die Urformen landwirtschaftlich genutzter Pflanzen mit den aktuell eingesetzten Sorten vergleicht, wird offensichtlich, welches Entwicklungspotenzial hier noch zu mobilisieren ist.

**Handlungsbedarf:** Hier muss es zu einer prozess- und anwendungsorientierten Stammentwicklung kommen, die eine Domestikation, vergleichbar der der höheren Pflanzen, gezielt in kurzer Zeit nachholt. Dabei sollte auch über Lösungen der klassischen Biotechnik hinaus gedacht werden.

### 2.2. Stammentwicklung – Biologische und technologische Optimierungen

Molekularbiologische Methoden für Mikroalgen sind im Vergleich zu denen für Bakterien und Hefen noch nicht so weit entwickelt. In der jüngsten Zeit hat die Bedeutung der Molekularbiologie für die Mikroalgenforschung jedoch stark zugenommen. So wird intensiv an der Produktion rekombinanter Proteine gearbeitet, einer Technologie, die

bei der Produktion mit Mikroalgen entscheidende biologische und prozesstechnische Vorteile erwarten lässt. Auch die Stammoptimierung erfährt durch molekulare Methoden Unterstützung. Obwohl sich die Photosynthese als solche nicht entscheidend verbessern lässt, gelingt es inzwischen, die teilweise niedrigen Konzentrationen an Hochwertstoffen zu erhöhen oder beispielsweise die Fettsäureprofile der gebildeten Öle an den Bedarf als Lebensmittel, Schmiermittel oder Biotreibstoffe anzupassen.

Auch prozessorientierte Eigenschaften werden gezielt untersucht und angepasst: Zur Erleichterung der Ernte sollten Algenzellen erst „auf Kommando“ flocken und nicht bereits in der Wachstumsphase auf Oberflächen wachsen und so ein Biofouling auslösen. Ein weiterer vielversprechender Ansatz zur Steigerung der Raum-Zeit-Ausbeute besteht darin, Algen mit reduzierten Pigmentgehalten zu erzeugen, die das Licht in der Kultivierung effektiv ausnutzen.

Durch die Verwendung geschlossener und sterilisierbarer Reaktoren (Bild 2) kann die Anzucht nach GMP (Good Manufacturing Practice) generell sichergestellt werden. Forschungsarbeiten mit genetisch modifizierten Stämmen führen nicht notwendigerweise zu deren Einsatz in der Praxis. Sie sind zunächst als Modell gedacht, um die molekulare Wirkung und den praktischen Nutzen der eingebrachten Veränderungen zu charakterisieren. Angesichts der hohen Diversität von Algen stehen die Chancen gut, die molekular erzielten Veränderungen später durch

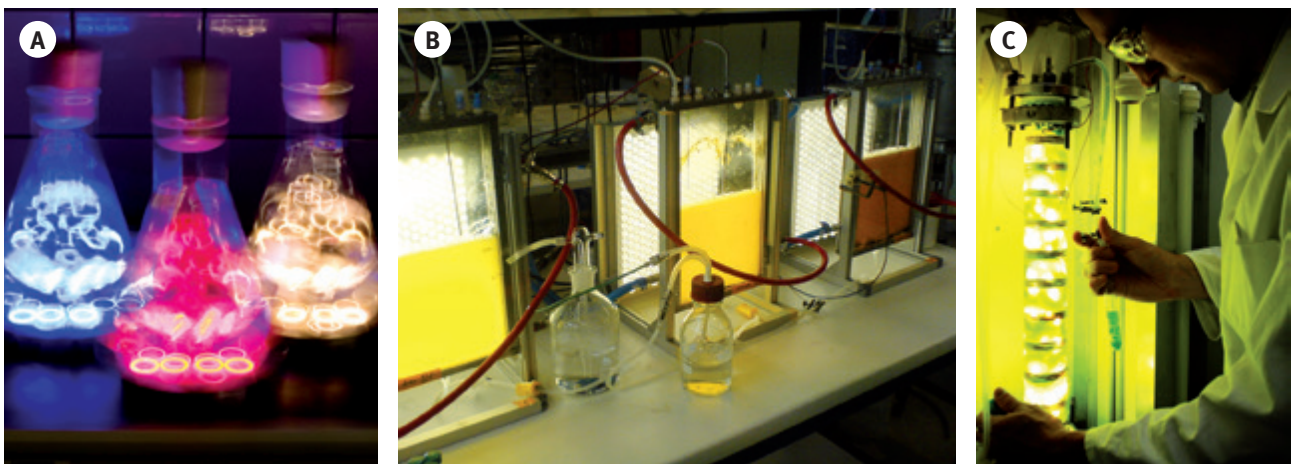


Bild 2: Künstlich beleuchtete Reaktoren für die Forschung zur Untersuchung von Wachstum und Produktbildung der Algenstämme unter verschiedenen Bedingungen. (A) Test mit verschiedenen Lichtfarben im Schüttelkolben-Maßstab, LED-Beleuchtung von unten (KIT-Abteilung Bioverfahrenstechnik) (B) Mikroalgen mit steigendem Ölgehalt in von unten beleuchteten Mini-Forschungsreaktoren (KIT-Abteilung Bioverfahrenstechnik) (C) Mit Wireless Light Emitters (WLE) intern beleuchteter Photobioreaktor (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik)

Screenings in natürlichen Stämmen zu identifizieren. Etliche Universitäten und Forschungsinstitute in Deutschland sind international führend bei der Erschließung der Algen-diversität.

**Herausforderung:** Für die Einsatzmöglichkeiten und Kapazitäten von Mikroalgen sind bisher keine Grenzen abzuschätzen. Jedoch drängt die Zeit, um den zu erwartenden Bedarf an mikroalgenbasierten Produkten vor dem Hintergrund der schnell wachsenden Weltbevölkerung und den knapper werdenden Ressourcen rechtzeitig sicherzustellen.

**Handlungsbedarf:** Die weitere Erschließung der genetischen Vielfalt von Mikroalgen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen der Grundlagenforschung in der Biologie, den Produktionsmöglichkeiten in den Ingenieurwissenschaften und den Anforderungen des Marktes. Dieser Weg muss deutschland- und europaweit finanziell ermöglicht und koordiniert werden, um schnell und effektiv den Erfolg der Bioökonomie zu sichern.

### 2.3. Produkte – von Hochwertstoffen bis zu Grundchemikalien

Mikroalgen werden schon seit Langem wegen ihrer wertvollen Inhaltsstoffe als Nahrungsergänzungsmittel genutzt. Im Mittelpunkt stehen Proteine mit hoher bio-

logischer Wertigkeit, Vitamine, mehrfach ungesättigte Fettsäuren, antioxidativ wirkende Pigmente wie Carotinoide, Mineralstoffe und andere Wirkstoffe. *Spirulina* (biologisch korrekt *Arthrospira*) und die Grünalge *Chlorella* werden zu diesem Zweck gezüchtet und als Extrakt vermarktet. Astaxanthin aus *Haematococcus* spielt als roter Farbstoff bei der Lachszucht eine große Rolle. Aber auch Pharmaka wie immunstimulierende Polysaccharide, antibakterielle, fungizide und antivirale Stoffe oder auch Mittel zur Behandlung der Alzheimer-Krankheit werden erforscht (Bild 3).

Was für die Nahrungsergänzungsmittel gilt, lässt sich auch auf die Grundnahrungsmittel übertragen: Die Verbesserung der Versorgung mit pflanzlicher Biomasse, ohne dass zusätzliche Ackerflächen benötigt werden, ist ein typisches Einsatzfeld der Mikroalgen-Technologie. Mehrere internationale Firmen der Lebensmittelindustrie beschäftigen sich intensiv mit der Nutzung von Mikroalgen. Ziel ist es beispielsweise, farb-, geruchs- und geschmacksneutrale Proteinkomponenten anzubieten. Auch werden bereits Polysaccharide aus Makroalgen, wie Alginate oder Carrageen, als Zusatzstoffe bzw. Dickungsmittel in Lebensmitteln verarbeitet. Diese sollen längerfristig nicht nur als Zusatzstoffe betrachtet werden, sondern maßgeblich zur Welternährung beitragen.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld der Mikroalgen sind Futtermittel. Angesichts überfischter Weltmeere besteht ein gesellschaftlicher Konsens darin, dass die nach-

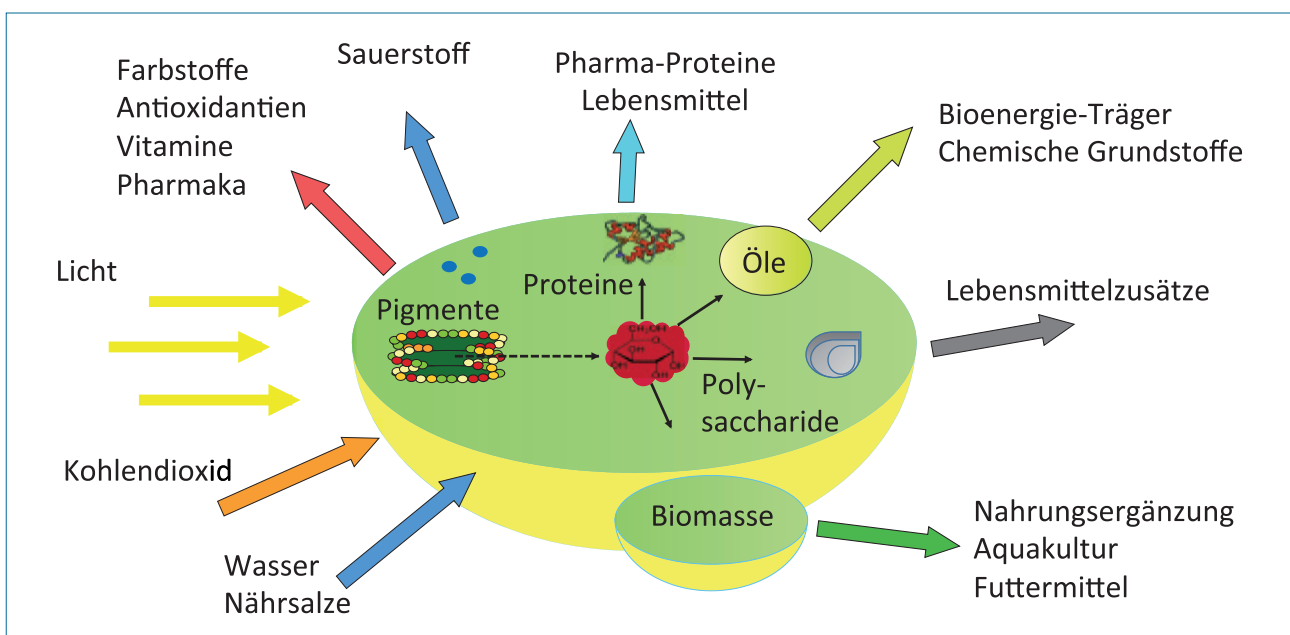


Bild 3: Mikroalgen wandeln Sonnenlicht und CO<sub>2</sub> auf verschiedenen Stoffwechselwegen zu Biomasse und zu wertvollen Inhaltsstoffen um.

haltige Aquakultur massiv ausgeweitet werden muss. Der Fisch steht am Ende der Nahrungskette, die Alge am Anfang. Ein gesunder Fisch als gesundes Nahrungsmittel benötigt u.a. Fettsäuren, Proteine und Pigmente, die letztlich aus Algen stammen und über die Nahrungskette weitergegeben werden. Deshalb werden industrielle Aquakulturen häufig mit Fischöl und Fischmehl gefüttert, was allerdings im Gegenzug die aktuelle Überfischung noch unterstützt. Weil sie der nachhaltigen Erzeugung von Meeresfrüchten und Speisefischen durch die Zufütterung von Algen gerecht werden muss, ist die Aquakultur inzwischen zu einem Treiber der Mikroalgenbiotechnologie geworden.

Aber die Algenbiotechnologie will nicht nur den Sektor der Hochwertprodukte und Nahrungsmittel bedienen, sondern auch in Richtung Massenprodukte mit mittlerem und niedrigem Preisniveau gehen. Mögliche Zielprodukte sind Fein- und Plattformchemikalien für die chemische Industrie wie z. B. Monomere für Biokunststoffe, bestimmte Fettsäuren und das Isopren. Mehr als fünf Prozent des in Deutschland importierten Erdöls werden für Kunststoffe eingesetzt, ein Markt, der sich mit mikroalgenbasierten Rohstoffen nachhaltiger bedienen ließe.

Erneuerbare Energieträger werden beim Energiemix der Zukunft den Hauptteil übernehmen. Ein wichtiges Standbein ist dabei die Nutzung von grundlastfähiger Biomasse. Mikroalgenbiomasse kann in Biogasanlagen zu Methan vergoren werden und ist dabei unabhängig von der landwirtschaftlichen Produktion. Interessanter ist jedoch die Nutzung des hohen Ölanteils in Mikroalgen für nachhaltige Biotreibstoffe. Neben der Nutzung der Ölfraktion kann auch die gesamte Algenbiomasse thermochemisch in sogenanntes „grünes Erdöl“ umgewandelt werden. Weitere Möglichkeiten, Energieträger mit Hilfe von Mikroalgen zu gewinnen, sind die direkte Bildung von Wasserstoff, Kohlenwasserstoffen oder Bioethanol. Bei diesen Anwendungen geht es jedoch um Mengen im Giga-Tonnenbereich.

**Herausforderung:** In den vielen bisher noch nicht untersuchten Algen steckt zwar ein riesiges Potential für die Bioökonomie in Deutschland. Viele mögliche Zielprodukte werden im Screening aber noch nicht erkannt oder gesucht. Selektierte Stämme können besonders im Bereich chemische Grundstoffe und Energie das Produktportfolio entscheidend erweitern und helfen, die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und die Produktqualität an die notwendigen Standards anzupassen.

**Handlungsbedarf:** Der Dialog zwischen der Industrie mit ihren Bedürfnissen und der Biologie mit der Kenntnis der

Vielfalt muss intensiviert werden. Durch eine bessere und vor allem breitere, kontinuierlich auf aktuelle Kenntnisse abgestimmte Ausrichtung von Screening-Programmen und verstärkte Aktivitäten zur Anwendung der an Modellalgen entwickelten Methoden auf andere Spezies kann das Potenzial, marktfähige Produkte zu liefern, signifikant verbessert werden.

## 3. Photobioprozesse – Technologien entlang der Wertschöpfungskette

Das Potential von Mikroalgen muss schließlich in Produktionsanlagen verfahrenstechnisch umgesetzt werden. Als die wichtigsten Vorteile in Hinsicht auf Produktionsbedingungen ergeben sich:

- » Mikroalgen weisen anders als Landpflanzen keine ausgeprägten jahreszeitlichen Wachstumsperioden auf. Deshalb kann ganzjährig in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Licht produziert werden.
- » Mikroalgen können in offenen (Bild 4) oder geschlossenen (Bild 2) Reaktoren verfahrenstechnisch weitgehend automatisiert produziert werden.
- » Bei der Anzucht der Mikroalgen in geschlossenen Reaktoren wird weniger Wasser pro produzierter Biomasse benötigt.

Die verfahrenstechnische Forschung und Entwicklung in den Richtungen Mikroalgenkultivierung und -weiterverarbeitung ist in Deutschland an mehreren akademischen und industriellen Forschungseinrichtungen etabliert und international konkurrenzfähig.

### 3.1. Die Algenkultivierung – der technische Ankerpunkt der Wertschöpfungskette

In einem Photobioreaktor kommen die Mikroalgen mit Licht, CO<sub>2</sub>, Wasser und Nährstoffen zusammen. Hier spielen sich sämtliche Wachstums- und Produktbildungsvorgänge ab (Bilder 5 und 6).

Offene Reaktoren (Open Ponds, Bild 4), ausgeformt etwa als sogenannte „Raceway“-Ponds, sind heute der technische Standard der kommerziellen Mikroalgenproduktion für spezielle Algenarten. Sie ermöglichen die Herstellung von Algenbiomasse zu moderaten Kosten, allerdings nur bei niedrigen Biomassekonzentrationen und Produktivitäten. Landwirtschaftlich unbrauchbare Flächen sind für die Algenproduktion in „Raceway“-Ponds geeignet und präferentiell zu nutzen, da so eine Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion vermieden werden kann.

Ein Nachteil der offenen Reaktorsysteme ist allerdings, dass die große, gegenüber der Umgebung exponierte Oberfläche der offenen Becken ein Einfallstor für Kontak-



Bild 4: Open-pond Demonstrationsanlage (40 ha) von Sapphire Energy in Columbus, New Mexico, USA (Copyright Sapphire, USA).

minationen darstellt. Zwar können diese unerwünschten Organismen durch die Wahl entsprechender Vorsorge-maßnahmen, wie zum Beispiel der Verwendung salztoleranter Algenspezies in hypersalinen Medien oder einer pH-Anpassung des wässrigen Mediums minimiert werden, allerdings wird dadurch das Anwendungsspektrum auf Algenarten beschränkt, die diese Bedingungen tolerieren. Bei Produkten, die nach GMP-Richtlinien produziert werden müssen, kommen solche Anlagen offensichtlich nicht infrage.

Zur Produktion von Commodities ist auch bei der Nutzung von Open Ponds weitere Forschung notwendig, um z.B. die Kosten für CO<sub>2</sub> (Transport, Speicherung und Eintrag) und den Energieeintrag zu senken.

Einige der genannten Nachteile können mit Hilfe von geschlossenen Reaktoren überwunden werden. Diese fassen die Algensuspension mit einer transparenten Hülle ein, durch die das Licht einfallen kann. Da Licht nicht wie ein chemisches Substrat durch Mischen verteilt werden kann, bilden sich durch die gegenseitige Abschattung der Algen starke Gradienten aus. Es haben sich einige Designkriterien herausgebildet, um das auf eine gegebene Grundfläche einfallende (Sonnen-)Licht möglichst gleichmäßig in der Suspension zu verteilen. So muss die transparente Oberfläche im Verhältnis zum Volumen groß sein und das Medium sollte nur in dünnen Schichten vorliegen. Eine schlichte Erhöhung der angebotenen Lichtleistung ist allerdings auch keine sinnvolle Lösung. Mikroalgen können große Lichtstärken, wie sie etwa mittags auftreten, gar nicht verarbeiten. Das Licht muss also über eine die Grundfläche übersteigende Reaktoroberfläche „verdünnt“ werden. Bei geschlossenen Systemen haben

sich zwei Grundtypen herausgebildet, die Plattenreaktoren (Bild 5) und die Rohrreaktoren (Bild 6).

Sowohl beim Platten- als auch beim Rohrreaktor kommen die entscheidenden technologischen Impulse und Fortschritte aus Deutschland und Europa. Weitere Optimierungen in Richtung geringerer Kosten und höherer energetischer Wirkungsgrade sind in der Forschungs-Pipeline.

Bei der kleinskaligen Produktion hochpreisiger Feinchemikalien mit Mikroalgen treten energetische Aspekte in den Hintergrund und es kann z.B. auch mit künstlicher Beleuchtung gearbeitet werden. Insbesondere hat die rasante Entwicklung im Bereich der LEDs hier einen Technologieschub möglich gemacht. Am Markt sind beleuchtete Forschungs- und Technikumsreaktoren erhältlich, deren Qualifizierung nach GMP etwa für den Pharmabereich gegeben ist.

Im industriellen Maßstab bestehen jedoch nach wie vor erhebliche Probleme, um Algenbiomasse kostengünstig und vor allem energieneutral zu produzieren. Laufende Forschungsvorhaben in Richtung preiswerter, materialsparender Reaktoren tragen diesem Umstand Rechnung.

Photobioreaktoren für Mikroalgen müssen für optimale Ergebnisse das Medium durchmischen und mit CO<sub>2</sub> begasen. Industrie und Forschungsinstitute haben diese Herausforderung angenommen, und die ersten in diese Richtung stark verbesserten Pilotreaktoren sind im Praxistest. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Erwärmung in den Reaktoren durch die Absorption des einfallenden Sonnenlichts. Hier arbeiten Biologen, Bioverfahrenstechniker und Thermodynamiker interdisziplinär zusammen, um etwa

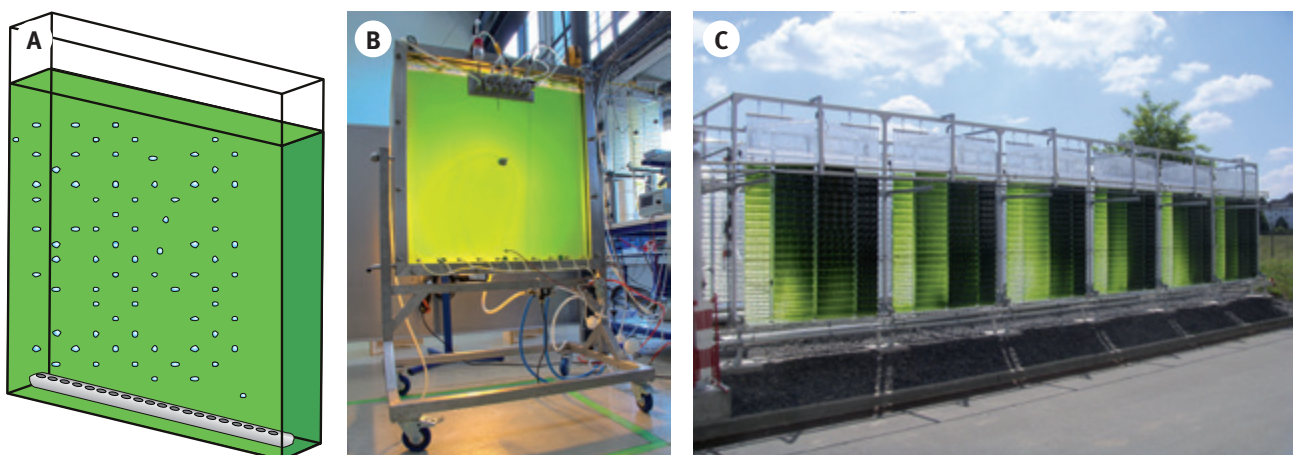


Bild 5: Plattenreaktoren bestehen aus transparenten Platten, die die Algensuspension einschließen. Das lebensnotwendige CO<sub>2</sub> wird durch Luftblasen von unten zugeführt, wobei die Blasen auch zum Mischen dienen. (A) Schemazeichnung (B) Ein Forschungsreaktor am KIT, Abteilung Bioverfahrenstechnik (C) Entwicklung aus Deutschland: Der Flachplattenairlift (FPA) der Subitec GmbH, Stuttgart

jahreszeitlich angepasste Algenstämme auszuwählen oder z. B. durch den Einsatz von vorgeschalteter Infrarot-Filter den Wärmeanteil des Sonnenlichts abzusenken oder diesen gar noch energetisch zu nutzen. Erkenntnisse über den Einfluss des Sonnenlichts, die im Zusammenhang mit simulierten lokalen Klimabedingungen gewonnen werden, ermöglichen die Auswahl optimaler Standorte oder bei gegebenem Standort die Auswahl eines optimalen Algenstammes für zukünftige Produktionsstätten.

Ein weiterer erfolgversprechender Ansatz, um die Wirtschaftlichkeit einer Großproduktion zu erreichen, besteht darin, dass man die Vorteile von geschlossenen Systemen (hohe Prozessstabilität und Produktivität) mit denen offener Systeme (geringe Investitions- und Betriebskosten) kombiniert. Hierbei werden die Photobioreaktoren genutzt, um ein konzentriertes qualitativ hochwertiges, vitales und kontaminationsfreies Inokulum für die Open Ponds bereitzustellen, um dadurch die Prozessstabilität der offenen Systeme zu erhöhen.

**Herausforderung:** Es werden sich, abhängig von der spezifischen Wertschöpfung und den Standortbedingungen, verschiedenartige Designs von Photobioreaktoren durch-

setzen. Um die Kosten für geschlossene Systeme zu senken, müssen transparente Materialien optimiert und die Produktionsverfahren für die Serienproduktion der Photobioreaktoren weiterentwickelt werden. Deutschland kann auf diesem Feld bereits auf Erfolge verweisen und in Zukunft mit dem vorhandenen prozesstechnischen Hintergrund bei engagiertem Einsatz aller beteiligten Stakeholder weiterhin eine führende Rolle einnehmen.

**Handlungsbedarf:** Reaktoren werden oft bei einzelnen Firmen oder werden von einzelnen akademischen Arbeitsgruppen im Rahmen von Verbundprojekten entlang der Wertschöpfungskette entwickelt. Bislang mangelt es jedoch an Materialforschung für transparente Kunststoffe, um diese für den Einsatz in Photobioreaktoren zu optimieren. Hierbei sind – neben geringen Materialkosten – besonders der UV-Beständigkeit, der Verarbeitbarkeit durch Thermoformen sowie der Verringerung der Biofilmbildung besonderes Augenmerk zu schenken. Zudem sollten die Praxistests verschiedener geschlossener Systeme im Rahmen von größeren Verbundprojekten vorangetrieben werden, um auch die verfahrenstechnischen Fragestellungen wie z. B. Reinigungsprozesse im Pilotmaßstab untersuchen zu können.

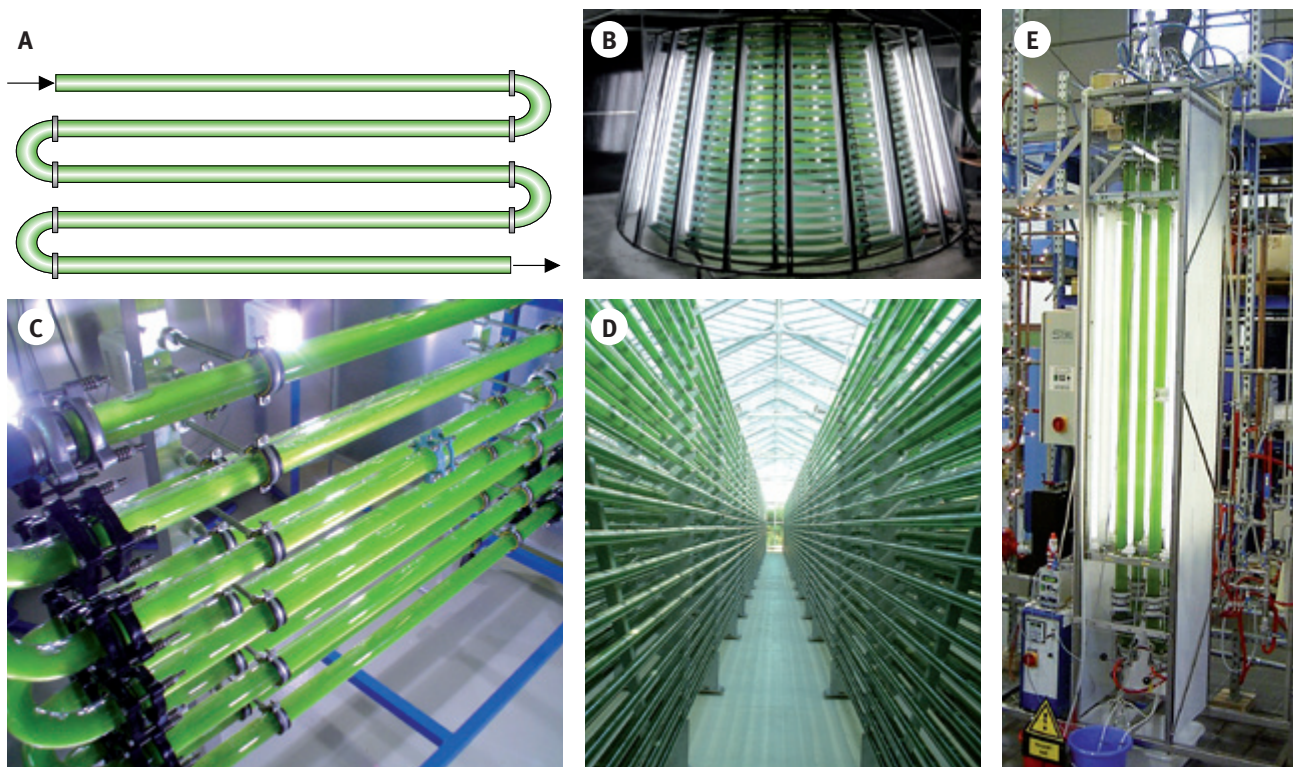


Bild 6: Rohrreaktoren bestehen aus Glas- oder transparenten Kunststoffrohren, die horizontal oder vertikal angeordnet sind und in denen die Algensuspension umgepumpt oder mit dem air-lift-Prinzip zirkuliert wird. (A) Grundprinzip Rohrreaktor (B) Entwicklung aus Deutschland: Der „Tannenbaum-Reaktor“ der GICON-Firmengruppe (C) Forschungs-Rohrreaktor am KIT, Abteilung Bioverfahrenstechnik (D) Entwicklung aus Deutschland: Die europaweit größte geschlossene Algenanlage in der Altmark (Roquette Klötze, Design igy) (E) Ein sterilisierbarer Photobioreaktor der upscale-fähigen MEDUSA-Baureihe (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik)

#### 3.2. Die Aufarbeitung – der herausfordernde Weg zum Endprodukt

Oft übersehen, aber von großer Bedeutung für die industrielle Mikroalgenbiotechnologie sind die Kosten für Downstream-Prozesse, die oft über die Rentabilität des Gesamtprozesses entscheiden. Die Zellernte ist der nächste Schritt in der Wertschöpfungskette nach der Kultivierung. Diese verfahrenstechnische Aufgabe einer Fest-/Flüssigtrennung kann grundsätzlich durch Flotation, Filtration oder Zentrifugation erfolgen und liefert ein pastöses, als *Slurry* bezeichnetes Produkt zur Weiterverarbeitung. Für die Abtrennung von Mikroorganismen wie Hefen oder Bakterien werden seit Jahrzehnten entsprechende Geräte speziell dafür entwickelt und vertrieben. Im Falle der Mikroalgen gibt es jedoch eine spezifische Problematik. Der Feststoffgehalt liegt in etwa eine Größenordnung unter den in der klassischen Fermentationstechnik erzielten Werten, damit muss also ca. die 10-fache Menge an Wasser pro geernteter Menge Mikroalgenbiomasse bewegt werden. Speziell bei der Herstellung biobasierter chemischer Energieträger aus Mikroalgen muss diese Abtrennung neben der Bewältigung sehr großer Mengen noch möglichst energieeffizient ablaufen, was bei klassischen biotechnologischen Prozessen keine derartig große Rolle spielt. Darauf hat die Industrie auch mit Beteiligung namhafter deutscher Hersteller bereits mit der Entwicklung z. B. neuartiger Zentrifugen reagiert. Für die Anwendung an Mikroalgen müssen auch andere energieeffiziente Ernteprozesse wie Filtration, Flokkulation und Flotation angepasst und optimiert werden.

Es schließen sich, ähnlich wie bei der Verarbeitung pflanzlicher Rohstoffe, gegebenenfalls Schritte wie Trocknung, mechanischer Aufschluss, Extraktion oder chemische oder hydrothermale Umwandlung an. Auch hierfür gibt es zwar grundsätzlich Verfahren, die für die Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen entwickelt werden, die aber für die Algen zumindest angepasst werden müssen. So verhindert die pastöse Konsistenz des *Slurry* im Vergleich zu Ölsaaten wie Raps ein einfaches mechanisches Auspressen. Der relativ hohe Wassergehalt der Algenzellmasse kann außerdem den Einsatz von Extraktionsmitteln oder Hydrolyseverfahren erschweren.

Andererseits ist die Algenbiomasse jedoch für viele biologische und chemische Prozesse wesentlich leichter zugänglich als etwa Lignocellulose (wie Stroh oder Holz), die aktuell als biogener Rohstoff viel diskutiert wird. Dadurch ist die Fraktionierung der Komponenten ohne aufwendige

Vorbehandlung möglich, aber auch eine direkte energetische Verwertung in Biogasanlagen kommt infrage. Auf diesem Gebiet gibt es eine weltweit aktive Forschungslandschaft, speziell auch in Deutschland, da die nötige Infrastruktur zur Behandlung der Fragestellungen der Biomassenutzung von Agrarpflanzen oder Restbiomassen bereits vorhanden ist.

**Herausforderung:** Gerade für niedrigpreisige Produkte aus Algenbiomasse stehen energieeffiziente Aufarbeitungsprozesse noch nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung. Generell gibt es bisher nur geringe industrielle Erfahrungswerte mit den Besonderheiten in der Aufarbeitung von Mikroalgen beim Einsatz großer Mengen.

**Handlungsbedarf:** Da die aktuell erreichten Zelldichten bei Photobioreaktor-Kultivierungen relativ gering sind, müssen energieeffiziente Prozesse zur Abtrennung der Biomasse entwickelt und optimiert werden. Entwicklungen aus dem universitären Bereich sollten verstärkt durch Unternehmenspartner zur Marktreife entwickelt werden.

#### 3.3. Die Bioraffinerie – Wege zur ganzheitlichen stofflichen und energetischen Nutzung der Mikroalgenbiomasse

In einer Erdölraffinerie wird komplexes Rohöl in verschiedene Fraktionen aufgetrennt, die jeweils vollständig weiterverarbeitet werden. Reststoffe, die nicht genutzt werden können, fallen kaum noch an. In Analogie dazu soll in einer Bioraffinerie Biomasse durch Isolierung und Veredelung ihrer Inhaltsstoffe in verschiedenen Wertschöpfungsketten möglichst vollständig stofflich und gegebenenfalls auch energetisch verarbeitet werden (Bild 7). Mikroalgenbiomasse ist für die Verarbeitung in einer Bioraffinerie besonders geeignet:

- » Mikroalgen enthalten keine holzigen Anteile. Deshalb sind sie leicht aufzuschließen und können als Biomasse insgesamt oder in ihren Komponenten problemlos verarbeitet werden.
- » Mikroalgen können einen Ölgehalt bis zu 50 % der Biotrockenmasse aufweisen. Dieser Wert liegt über dem von Landpflanzen.
- » Verschiedene Mikroalgenspezies enthalten eine Vielzahl hochinteressanter Inhaltsstoffe, deren Vermarktung ein Bioraffineriekonzept rentabel machen kann.

Die Nutzungsmöglichkeiten der Mikroalgenbiomasse in der Bioraffinerie sind vielfältig und aufgrund der vielen bisher kaum genutzten Algenspezies auch noch kaum vollständig absehbar. Beispielsweise können die hochwertigen ungesättigten Fettsäuren (PUFA) für die menschliche Ernährung, gesättigte Fettsäuren dagegen für technische Zwecke eingesetzt werden. Aus der verbleibenden Biomasse können danach Proteine für die Tierernährung separat gewonnen und vermarktet werden, während die dann letztendlich resultierende Biorestmasse über eine Biogasanlage noch energetisch genutzt wird. Ein vielversprechendes Konzept, welches gerade erprobt wird, sieht die Nutzung von CO<sub>2</sub> aus der Bioethanolanlage zur Produktion von Proteinen (für Tierfutter) und Stärke (für die Ethanolproduktion) vor, während die Restbiomasse in der Biogasanlage energetisch genutzt wird<sup>2</sup>. Ausschlaggebend für den wirtschaftlichen Erfolg solcher Nutzungskonzepte wird sein, aus dem möglichst billig hergestellten Rohstoff Biomasse möglichst wertvolle Produkte zu gewinnen, die vom Markt gut angenommen werden.

Wie Pflanzen benötigen Mikroalgen Stickstoff, Phosphor und Kalium (NPK) für ihr Wachstum. Für industrielle Prozesse ergeben sich hier schnell sehr große Mengen, die die Produktion von Biomasse ökonomisch und ökologisch *ad absurdum* führen würden, wenn die anorganischen Nährstoffe nicht aus unterschiedlichsten Abwässern zurückgewonnen oder aus der Kultivierungslösung der Algen selbst recycelt werden. Das für die Photosynthese benötigte CO<sub>2</sub> sowie Restwärme für die Temperierung kann aus Industrieanlagen genutzt werden. Solche integrierten Systeme sind beispielgebend für eine ressourcenneutrale, wirtschaftliche und ökologische Optimierung der Wertschöpfung mit Mikroalgen für die Bioökonomie.

Ein grundsätzliches Problem von Bioraffinerieprozessen auf Mikroalgenbasis wird immer in den in verschiedenen Größenordnungen benötigten und anfallenden Stoffmengen liegen. Hochwertprodukte sind in der Regel nur kleine Fraktionen der eingesetzten Biomasse. Die restlichen, weniger wertvollen stofflichen Fraktionen fallen dagegen in großen Mengen an, deren vorgesehene Nutzung den Markt schnell überfordern kann. Besonders für den rentablen Einsatz von Reststoffen sind deshalb auch innovative Lösungen gefragt. Insofern müssen integrierte Nut-

<sup>2</sup> [https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/veranstaltungen/2015/neuebiokraftstoffe2015/Schmid-Staiger\\_New\\_Biofuels\\_2015.pdf](https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/veranstaltungen/2015/neuebiokraftstoffe2015/Schmid-Staiger_New_Biofuels_2015.pdf)

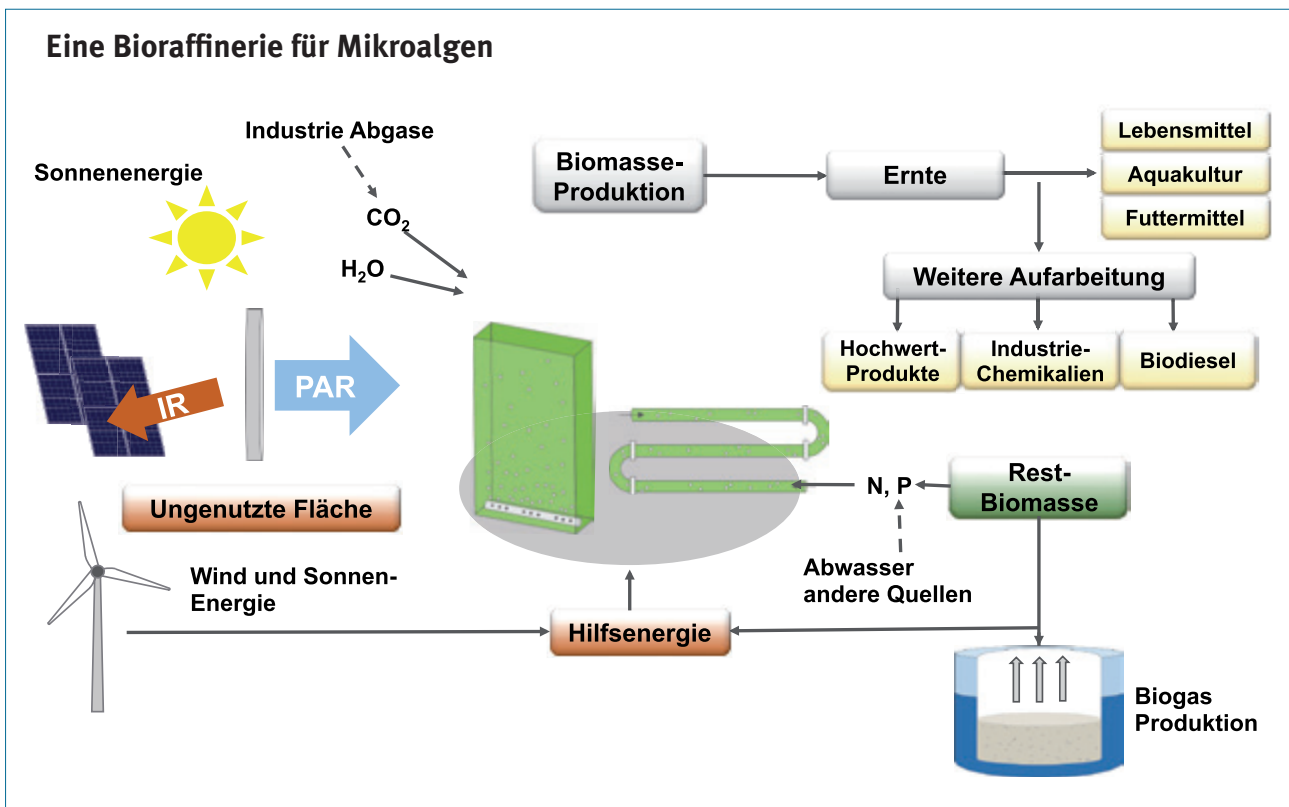


Bild 7: Die Mikroalgen-Bioraffinerie erzeugt aus Rohbiomasse Produkte für verschiedene Anwendungen. Dabei können andere alternative Energien wie Photovoltaik oder Windkraft oder Energie aus der Restbiomasse zum Betrieb der Anlage ebenso ausgenutzt werden wie Nährstoffe aus Abwässern zu Kultivierung der Algen. Die eingesetzte Biomasse wird möglichst vollständig stofflich oder energetisch genutzt.



zungskonzepte immer sehr flexibel und durchdacht an die Marktgegebenheiten angepasst werden. Eine Lösungsmöglichkeit des angesprochenen Problems könnte in Produktionsstämmen liegen, die die gewünschten Produkte während der Kultivierung aus den Zellen ausschleusen. Diese könnten somit aus dem Medium gewonnen werden, ohne dass die Zellen selbst geerntet werden müssten. Dadurch würde deutlich weniger Biomasse anfallen.

**Herausforderung:** Algenbiomasse kann eine wichtige Alternative zu fossilen Rohstoffen in der Bioökonomie werden. Dazu müssen allerdings integrierte Produktions- und Nutzungskonzepte entwickelt werden, die sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll sind und die flexibel an die Marktgegebenheiten angepasst werden können. Sollte das gelingen, wäre die mikroalgenbasierte Bioraffinerie allerdings ein Schlüssel zu einer international wettbewerbsfähigen, umwelt- und sozialverträglichen (Bio-) Wirtschaft, ganz im Sinne der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ausgerufenen Forschungsagenda „Green Economy“<sup>3</sup>.

**Handlungsbedarf:** Bioraffineriekonzepte werden für die Nutzung von pflanzlichen Roh- und Reststoffen bereits auf breiter Front wissenschaftlich untersucht und technisch realisiert. Mikroalgen müssen und können als Rohstoffquelle in diese Aktivitäten mit einbezogen werden. Dazu zählen etwa die gezielte Fraktionierung mit diversen Extraktionsverfahren, chemische Konversion einzelner Komponenten und schließlich die energetische Verwertung der Restbiomasse über Biogasgewinnung oder hydrothermale Prozesse. Dazu ist dringend erforderlich, Algenbioraffinerie-Demonstrationsanlagen zu errichten und zu betreiben, um belastbare Erkenntnisse über die Nachhaltigkeit solcher industriellen Wertschöpfungsketten zu gewinnen. Diese Bewertungen sind für die Suche nach Investoren zur Realisierung von industriellen Anlagen maßgeblich. Ob Investitionen im Inland erfolgreich sind, wird auch davon abhängen, wie schnell die Demonstrationsanlagen zur Verfügung stehen.

---

<sup>3</sup> siehe <http://www.fona.de/green-economy>

## 4. Prozessintegration – Mikroalgenproduktion im ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Umfeld

Biomasse als Alternative zu fossilen Rohstoffen für industrielle Prozesse auf breiter Basis zu etablieren, stellt eine Herausforderung dar. Die Integration von Bioraffinerieprozessen in bestehende industrielle Abläufe und Strukturen macht intensive Anpassungen auf beiden Seiten unumgänglich. Allerdings wächst der Druck, auch die produzierende Industrie nachhaltiger auszurichten. Es wird wie bei allen entsprechenden Entwicklungen ein längerer Anpassungsprozess bei allen Partnern nötig sein, der aber mit gezielten Bemühungen der Stakeholder zu beschleunigen ist. Die natürliche genetische Vielfalt der Algen (Biodiversität) wird allerdings die Prozessintegration in vielen Fällen erleichtern. Aktuelle Forschungsergebnisse legen nahe, dass Produktionsprozesse mit Mikroalgen sich vergleichsweise leicht in bestehende Energie- und Stoffkreisläufe integrieren lassen (Nutzung von Abwasser, Salz- und Brackwasser, Abwärme und Abgasen) und dass eine Anpassung an lokale Umweltbedingungen möglich ist. Die fast unbegrenzte Vielfalt an möglichen Produkten wird eine besonders flexible Berücksichtigung des Bedarfs der beteiligten Märkte erlauben.

Mikroalgen scheinen ideale Voraussetzungen zu bieten, als Basis für etablierte und innovative Produkte zu dienen und in der Gesellschaft akzeptiert zu werden. Neben ihrer Nachhaltigkeit werden sie in der Regel vollkommen zu Recht als unbedenkliche Quelle für interessante Produkte wahrgenommen, mit denen Umweltschutz, Energieeinsparung und Unabhängigkeit von Rohstoffländern gewonnen werden kann. Im Gegensatz zu vielen Pflanzen stehen Mikroalgen nicht unmittelbar mit der Lebensmittelproduktion in Konkurrenz, so dass auch in dieser Hinsicht Akzeptanz vorhersehbar ist.

### 4.1. Standortfragen – wohin zwischen Licht und Schatten, Wüste und Meer

Die Wahl eines geeigneten Standortes ist essentiell für den Erfolg der Algenproduktion. Allerdings bedingen die verschiedenen Nutzungsarten von Algen auch sehr unterschiedliche Anforderungen an den Standort. Einige Studien zu möglichen Standorten für die Mikroalgen-

Bioraffinerie zeigen zwar keine eindeutige Präferenz für bestimmte Länder oder Klimazonen, offenbaren aber die vielfältigen Möglichkeiten. Landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen sind reichlich auf unserer Erde verfügbar, die Höhe der Sonneneinstrahlung stellt bei der Auswahl nicht das entscheidende Kriterium dar. Die Verfügbarkeit von Wasser, Kohlendioxid, Nährstoffen und Energie sind allerdings wichtige Voraussetzungen. Obwohl in der Sahara etwa 2,5 mal so viel Sonnenlicht pro Jahr und Hektar wie in Mitteleuropa eingestrahlt wird, relativiert sich dieser Vorteil durch Probleme der Infrastruktur, zu hoher Einstrahlung am Tage sowie den hohen Temperaturen.

Wie schon dargestellt, spielen bei der Produktion von Hochwertprodukten die Kosten der Kultivierung eine untergeordnete Rolle. Durch den hohen erzielbaren Preis der Produkte in einem relativ kleinen Markt können geringe Produktivitäten und teure Kultivierungsbedingungen toleriert werden; zudem sind keine großen Flächen erforderlich. Für diese Anwendungen sind geschlossene Photobioreaktoren prädestiniert und durchaus in Europa einsetzbar. Sich schnell entwickelnde Aktivitäten in europäischen Ländern wie Italien, Frankreich und Spanien sind vielversprechend bei der Nutzung des Sonnenlichtes. Für weiter nördlich liegende Länder gibt es wiederum andere Standortvorteile. Das sind hier lange Tage mit ideal verteilten Lichtverhältnissen im Sommerhalbjahr und die Möglichkeit der gezielten Nutzung von temperaturregulierenden Maßnahmen. Verfügbarkeit von industriellem CO<sub>2</sub> und Niedertemperatur-Abwärme ermöglichen zukünftig auch eine Kultivierung in den sonnigen, aber kalten Frühlings- und Herbstmonaten. So haben sich bereits in Deutschland einige mittelständische Unternehmen angesiedelt, die Algen kultivieren und verarbeiten.

Geht es auf der anderen Seite um die Produktion von sogenannten *Commodities*, wie zum Beispiel Biokraftstoffen, dann unterliegen diese einem enormen Preisdruck; zudem sind sehr große Produktionskapazitäten notwendig, damit sie eine industrielle Relevanz erreichen. Um diese beiden Randbedingungen zu berücksichtigen, werden große Flächen (ca. 10.000 ha), genügend Sonnenlicht (> 2.000 kWh/m<sup>2</sup>/a) und die Verfügbarkeit von kostengünstigem Kohlendioxid, Wasser und Nährstoffen notwendig.

## 4. PROZESSINTEGRATION – MIKROALGENPRODUKTION IM ÖKOLOGISCHEN, ÖKONOMISCHEN UND GESELLSCHAFTLICHEN UMFELD



Bild 8: Versuchsanlagen in Afrika. In den sonnenreichen Entwicklungsländern steht die Versorgung der Bevölkerung mit Proteinen im Vordergrund. (Foto Christophe Hug, Antenna Technologies Foundation, Geneva, Switzerland)

Bestimmte Mikroalgen können, anders als die meisten Kulturpflanzen, in Salzwasser gedeihen. Standorte an Meeresküsten oder sogar auf dem Meer bieten den Vorteil, dass der nicht limitierte Vorrat an Seewasser dabei auch für eine gute Temperierung der Algenkulturen sorgt. Diese Anwendungen werden typischerweise im Südwesten der USA, dem Mittleren Osten oder Australien realisiert werden. Bild 8 zeigt Beispiele für die weltweiten Aktivitäten auch außerhalb der klassischen Industrieländer.

Parallel zum Betrieb einfacher Anlagen in Entwicklungsländern entwickelt sich die Prozessoptimierung komplexer algenbasierter Produktionstechnologien auch in Deutschland. Beispielsweise ermöglichen Forschungsanlagen die Optimierung von Algenkultivierungsprozessen für unterschiedliche Klimabedingungen durch Simulation verschiedener Sonnenlichts- und realitätsnaher Luftfeuchtigkeits- und Temperaturszenarien (Bild 9).

**Herausforderung:** Die Biodiversität der Algen, die Einbindung spezifischer regionaler Standortvorteile sowie die große Wertschöpfungsspanne der erzeugbaren Produkte für verschiedene Märkte erfordert die Entwicklung von jeweils angepassten Technologien, die eine nahezu globale Verteilung von Produktionsstandorten erlauben.

**Handlungsbedarf:** Politik, Finanzwirtschaft und Wissenschaft sind aufgerufen, kleine und mittelständische Unternehmen und Start-Ups in ihrem Bemühen zu unterstützen, an geeigneten Standorten Produktionsanlagen zu errichten. Ein Förderschwerpunkt sollte die Vernetzung von kompatiblen Technologien und vorhandener Infrastruktur mit der Mikroalgentechnologie sein. Deutsche Industrieunternehmen sollten sich aktiv in die Entwicklung einbringen, um sich auch an außereuropäischen Großprojekten als Technologieträger beteiligen zu können.



Bild 9: Algentechnikum für weltweite Klimasimulationen (TU München)

### 4.2. Internationale Zusammenarbeit – Ausbildung strategischer Allianzen

Trotz aller Fortschritte der Algenbiotechnologie und der gegenwärtigen Installation von Pilotanlagen zur Bereitstellung von Biokraftstoffen auf Ethanol- und Lipid-Basis in den USA besteht auch weiterhin ein grundlagen- und anwendungsbezogener Forschungsbedarf auf diesem Gebiet. Insbesondere vor dem Hintergrund einer vollständigen Nutzung von Algenbiomasse in Bioaffinerie-Konzepten müssen verschiedene biotechnologische und verfahrenstechnische Teildisziplinen eng miteinander kooperieren. Eine Zusammenarbeit in solchen Forschungsverbänden ist aufgrund der fachübergreifenden Thematik auf nationaler Ebene jedoch nur begrenzt möglich. Auf europäischer Ebene kann die Einrichtung von Forschungsclustern innerhalb der entsprechenden Forschungsrahmenprogramme unterstützt werden, allerdings ist die Initiierung relevanter Verbände über die Grenzen der Europäischen Union hinaus – insbesondere mit forschungsintensiven Nationen wie z. B. den USA – kaum möglich.

**Herausforderung:** Gegenwärtig scheint der erforderliche Abstimmungsbedarf der Förderinstitutionen ein Hindernis zu sein, insbesondere weil unterschiedliche Fördermodalitäten und Begutachtungsverfahren auf der jeweiligen nationalen Ebene existieren. Wünschenswert für potentielle Antragsteller ist in diesem Zusammenhang, dass entsprechende Ausschreibungen synchron von den unterstützenden Nationen veröffentlicht und die Förderinstrumente international harmonisiert werden, so dass die Antragstellung, die Begutachtung und der Beginn der Förderung parallel erfolgen kann sowie das Verbundprojekt von den internationalen Partnern unter weitgehend analogen Voraussetzungen durchführbar ist.

**Handlungsbedarf:** Ausgehend von der Etablierung transnationaler Forschungsverbände unter Beteiligung der treibenden Kräfte der internationalen Forschungs-Community, die mittelfristig in strategischen Allianzen münden sollten, ist ein mittel- und langfristiger Innovationsschub für den Forschungs- und Industriestandort Deutschland zu erwarten. Hierfür bedarf es jedoch auch einer Forcierung des Aufbaus entsprechender internationaler Kooperationen von Seiten der Förderinstitutionen.

### 4.3. Der Mensch – Teil, Ziel und Sinn der Wertschöpfungskette

Die Mikroalgenproduktion in großem Maßstab wird einen nachhaltigen Beitrag zur künftigen Gesundheits-, Ernährungs-, Rohstoff- und Energieversorgung leisten. Dabei muss die Zivilgesellschaft jedoch mitgenommen werden. Jeder wird es gerne begrüßen, wenn in den kommenden Jahrzehnten der Hunger in der Welt reduziert werden kann und die Versorgungssicherheit gesteigert wird. Aber wo werden neue Arbeitsplätze entstehen? Für viele Regionen der Welt, in denen wegen der Trockenheit nur wenig Landwirtschaft betrieben wird und die neben der Sonnenenergie keine Bodenschätze besitzen, können Mikroalgen eine große Chance sein. Aufbau und Betrieb der Anlagen werden Arbeitsplätze generieren und damit auch wirtschaftliches Wachstum. Für die Industrieländer bietet sich die Möglichkeit, durch Lieferung der entsprechenden Prozesstechnik und des entsprechenden Know-how ihre Stärken wirtschaftlich einzubringen.

Die Verfügbarkeit von hochwertiger Biomasse für die Bioökonomie ist ein Anliegen der Industrieländer. Darüber hinaus wird die Produktion, so ist die Hoffnung, über viele Regionen der Welt verteilt sein und damit nicht nur die stoffliche, sondern auch die politische Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen mildern. Hinzu kommt, dass die Algenbiotechnologie ein erhebliches Potenzial birgt, Abwässer, die bisher nur als Belastung angesehen werden, nicht nur zu dekontaminieren, sondern als Rohstoffquelle sogar sinnvoll zu nutzen. Auch dieser Aspekt kann neben seinem gesellschaftlichen Nutzen zur Rentabilität von industriellen Prozessen beitragen. Damit das tatsächlich so eintritt, müssen jetzt allerdings schon die Weichen gestellt werden.

Werden die Weichen richtig gestellt, wird die Produktion von Mikroalgen einen positiven Beitrag zum Ausbau einer nachhaltigen Agrarproduktion sowie der stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe im industriellen Maßstab leisten. Dieser Beitrag steht in Einklang mit den Zielen der Bundesregierung, die Deutschland zu einem Innovationsstandort für biobasierte Produkte, Energien und Verfahren, unter der Berücksichtigung von Welternährung sowie Klima-, Ressourcen- und Umweltschutz, ausbauen will. Damit dieser Beitrag weltweit eine wesentliche Größenordnung einnimmt und das Potential der Mikroalgen bestmöglich genutzt wird, ist zudem eine engagierte internationale Zusammenarbeit notwendig. Dies gilt sowohl für den Austausch mit führenden Kräften aus Wissenschaft und Forschung der Industrieländer, als auch für die Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

**Herausforderung:** Für eine erfolgreiche Einführung von mikroalgenbasierten Produkten und Prozessen wird man sowohl die Industrie als auch die Endverbraucher überzeugen müssen. Vorteile der Algenbiotechnologie in Bezug auf Umweltschutz, Ressourcen-Nachhaltigkeit, Energieschonung und innovative Produkte müssen engagiert und breitentauglich kommuniziert werden. Deshalb ist es so wichtig zu demonstrieren, was solche Konzepte leisten können. Verlässliche Aussagen über alle in dieser Veröffentlichung angeführten Rahmenbedingungen sind dafür ebenso eine Voraussetzung wie eine sensible Beurteilung der relevanten Märkte.

**Handlungsbedarf:** Deutschland und Europa generell haben auf der Ebene der – auch öffentlich geförderten – Forschung bereits entscheidende Schritte in Richtung der Realisierung einer Zukunft mit Mikroalgen getan. Die Politik kann nun diesen Weg weiter gehen und die Randbedingungen in Forschung, Wirtschaft, Gesellschaft in Bezug auf Festsetzung von Regularien, Ausbau internationaler Beziehungen und gezielter Forschungsförderung gestalten. Um diesen Forderungen nachkommen zu können, sollte ein nationales Gremium aus Wissenschaft und Industrie beauftragt werden, welches das Thema verfolgt und vermittelt.

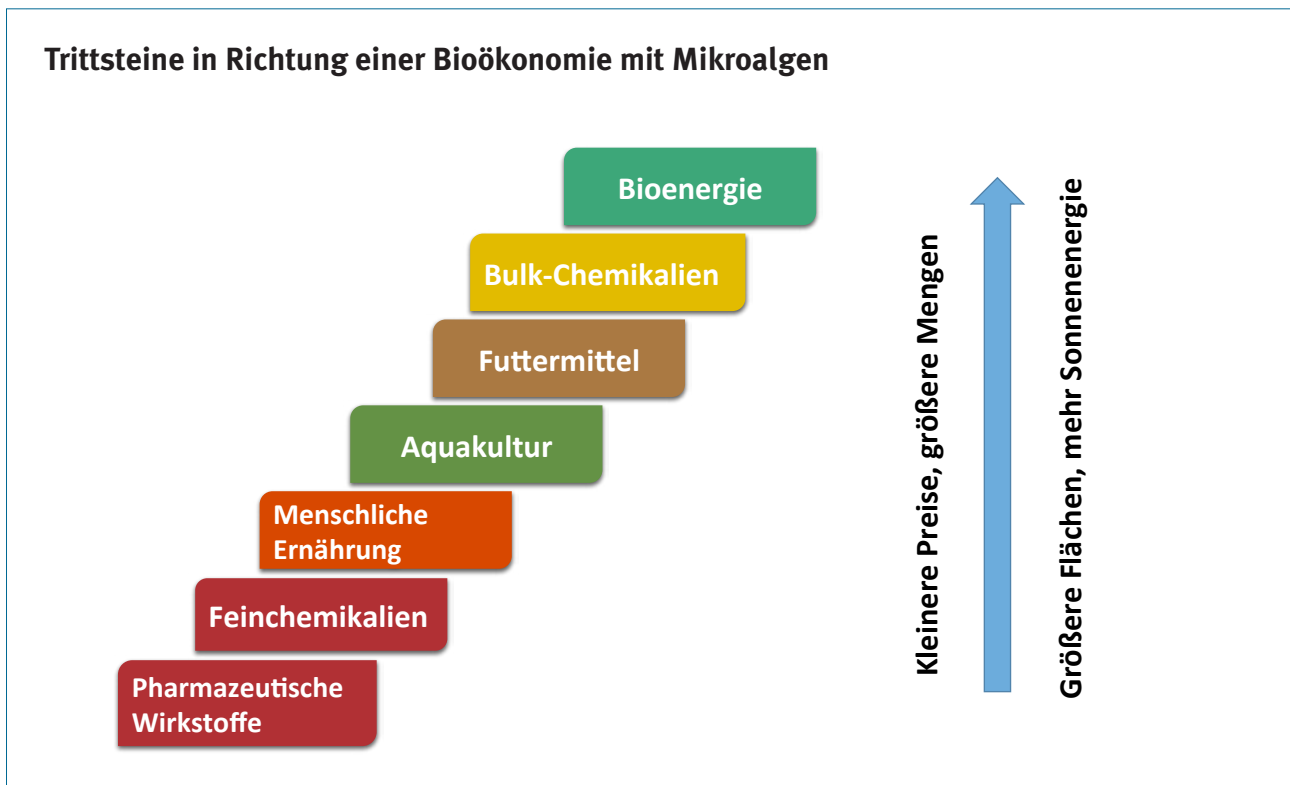


Bild 10: Das Trittstein-Modell der Bioökonomie mit Mikroalgen; ausgehend von den Hochwertprodukten werden zunehmend immer größere Märkte für Massenprodukte unter Nutzung eines zunehmend relevanten Anteils an genutzter Sonnenenergie erschlossen. Der wirtschaftliche Erfolg einer Stufe und die Nachfrage der Märkte treiben Forschung und Technologie zur Realisierung der jeweils nächsten.

## 5. Fazit

Die Politik hat die Mikroalgen bereits in wissenschaftlichen Programmen gefördert und in den aktuellen Bioökonomiestrategien berücksichtigt. Aber es existiert in diesem Zusammenhang noch erheblicher Handlungsbedarf:

- » Regularien auf der deutschen und der europäischen Ebene müssen formuliert und erlassen werden, um Produkte aus Mikroalgen für die Bereiche Pharma, Kosmetik, Lebensmittel, Futtermittel und Treibstoffe dem Markt zugänglich zu machen.
- » Die bereits in den neuen Bioökonomiekonzepten berücksichtigten Forschungsaktivitäten sind mit Nachdruck weiterzuführen und zu intensivieren. Dabei ist auch die Kooperation mit der Europäischen Gemeinschaft und mit Drittländern wie Israel oder den USA für Forschungsinstitute und die Industrie besser zugänglich zu machen. Das Einbeziehen von Schwellen- und Drittweltländern ist auszubauen und koordiniert zu fördern.
- » In diesem Zusammenhang kann die Forschungspolitik noch verstärkt eine Koordinationsrolle übernehmen. Das betrifft sowohl die Grundlagenforschung, die die Alleinstellungsmerkmale der Algen klar herausarbeiten muss, als auch die angewandte Forschung, die über den Labormaßstab hinaus in enger Abstimmung mit der Industrie Konzepte entwickeln muss, die sich als praxistauglich erweisen.
- » Im Schulterschluss mit Wissenschaft und Industrie sind großflächige Demonstrationsanlagen zu bauen, die es deutschen Forschern ermöglichen, sich an vorderster Front an der Weiterentwicklung der Algenbiotechnologie zu beteiligen.

Die deutsche Industrie arbeitet bereits an führender Stelle insbesondere am *Engineering* von verfahrenstechnischen Anlagen der Algenbiotechnologie. Im Hinblick auf zukünftige Märkte sind aber verstärkte Anstrengungen nötig und lohnend.

- » Firmen aus den genannten Bereichen sollten initiativ nach neuen Produkten suchen und zusammen mit der Wissenschaft und wo immer möglich auch gemeinsam neue innovative und effiziente Produktionsverfahren entwickeln.
- » Kleine und Mittelständische Unternehmen sollten (finanziell) in die Lage versetzt werden, sich der Forschung verstärkt zu öffnen und sich fachlich (beratend oder aktiv) an praxisorientierten Entwicklungen zu beteiligen.
- » Viele größere Firmen sind bereits als interessierte Beobachter engagiert oder haben sogar eine aktive Rolle eingenommen und Demonstrationsprojekte ins Leben gerufen. Aber auch hier kann eine aktivere Beteiligung dazu beitragen, das Feld weiter in Richtung Anwendung zu erschließen.



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-0

Telefax: 069 7564-117

E-Mail: [info@dechema.de](mailto:info@dechema.de)