

**CO₂ und Sonnenenergie –
Potenziale für die Bioökonomie**

A close-up photograph of several green leaves, likely from a maple tree, with detailed vein patterns visible. The leaves are set against a bright, slightly blurred background, creating a natural and vibrant aesthetic.

Inhalt

Die Herausforderung	3
Die Photosynthese als Vorbild für (bio)technische Verfahren	4
Modifizierte Photosynthese	9
Gasfermentationen	11
Elektrobiosynthese	12
Ausblick: Künstliche Photosynthese	13
Wie stehen biotechnische Verfahren im Vergleich da?	15
Aktivitäten in Baden-Württemberg	16
Was zu tun ist	17



Die Herausforderung

Deutschland hat sich mit dem Übereinkommen der UN-Klimakonferenzen von Paris verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 95 Prozent verglichen mit dem Stand von 1990 zu verringern. Hierfür ist eine weitgehende Defossilisierung nötig, also der Verzicht auf die Nutzung fossiler Rohstoffe zugunsten erneuerbarer und klimagasneutraler Energieträger. Zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs der industriellen Produktion muss zudem eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs – unter anderem durch die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) als Rohstoff – erreicht werden.

Vorbild hierfür ist die Natur: Durch Photosynthese setzen Pflanzen, Algen und Bakterien mit Hilfe der Sonnenenergie jährlich global 450 Milliarden Tonnen CO₂ aus der Luft in Biomasse und vielfältige organische Substanzen um. Land- und Forstwirtschaft beruhen auf dieser Photosyntheseleistung. In der Bioökonomie wird primär land- und forstwirtschaftlich produzierte Biomasse energetisch und industriell genutzt. Hierdurch leistet die Bioökonomie einen wichtigen Beitrag zur Defossilisierung.

Weil aber biomassebasierte biotechnische Verfahren für industrielle und energetische Anwendungen potenziell in Nutzungskonkurrenz um Agrar- und Forstflächen für Nahrungsproduktion und Ökosystemdienstleistungen stehen, sind auch andere biotechnische Verfahren, die eine solarenergiegetriebene CO₂-Nutzung ermöglichen, von großer Bedeutung. Derartige Verfahren beruhen auf den Prinzipien der natürlichen Photosynthese, ohne sie 1:1 zu kopieren.

Diese Broschüre möchte die Aufmerksamkeit von Entscheidungsträgerinnen und -trägern in Politik, Forschung, Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Gruppen sowie von interessierten Bürgerinnen und Bürgern auf das Potenzial der Bioökonomie lenken und aufzeigen, wie die bislang wenig beachtete mikrobielle Photosynthese und andere biotechnische Verfahren die bisherigen Ansätze zur CO₂-Nutzung wirkungsvoll ergänzen können.

Die Photosynthese als Vorbild für (bio)technische Verfahren

Die natürliche Photosynthese ist ein biochemischer Prozess, bei dem die Energie des Sonnenlichts in chemisch gebundene Energie umgewandelt wird. Diese wird genutzt, um aus CO₂ aus der Luft und Wasser (H₂O) komplexe organische Verbindungen zu synthetisieren.

Das Spektrum der Ansätze, die von der natürlichen Photosynthese inspiriert sind, reicht von rein biotechnischen Verfahren über hybride Verfahren, die technische und biotechnische Prozessschritte kombinieren, bis hin zu rein technischen Verfahren wie Power-to-X und der künstlichen Photosynthese (Abbildung 1).

Power-to-X-Ansätze befinden sich aktuell in der Entwicklung und teilweise bereits in der industriellen Umsetzung. Sie nutzen Strom zum Beispiel aus Solarenergie, um elektrolytisch Wasserstoff (H₂) herzustellen. Dieser dient als Reduktionsmittel, um CO₂ chemisch-katalytisch zu reduzieren und zu Produkten umzusetzen. Unter „künstlicher Photosynthese“ versteht man rein technische Systeme, in denen alle Prozessschritte in einer Anlage räumlich und zeitlich vollständig miteinander integriert und dadurch sehr effizient sind.

Im Folgenden werden die biotechnischen Verfahren vorgestellt. Natürliche Photosynthese, Power-to-X-Ansätze und künstliche Photosynthese werden zu ihrer Einordnung und zum Vergleich herangezogen.

Allen von der Photosynthese inspirierten Ansätzen ist gemeinsam, dass sie technische Lösungen für die drei Photosyntheseschritte – Wandlung der Solarenergie in nutzbare Energie, Reduktion des CO₂, Synthese der gewünschten Produkte – umfassen müssen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht, wie diese Schritte in den jeweiligen Verfahren technisch umgesetzt werden können.

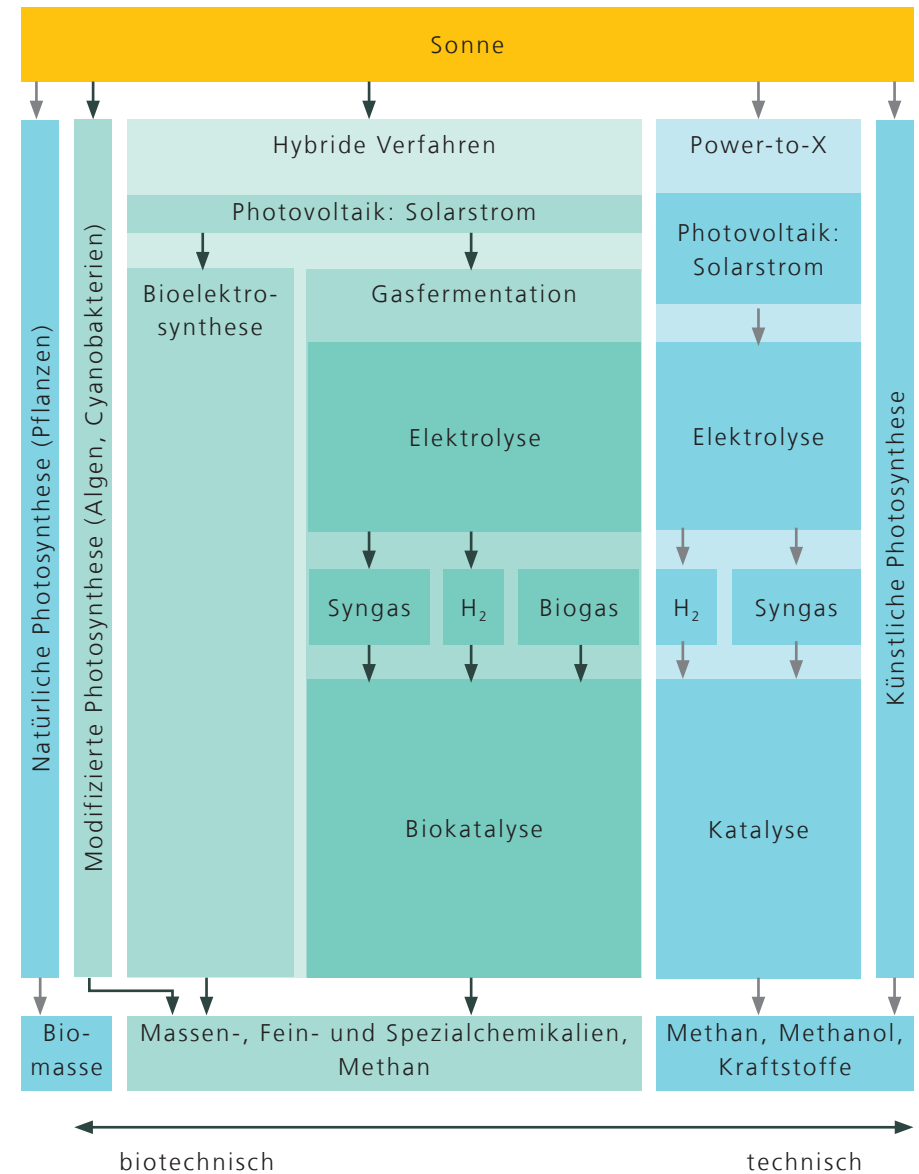
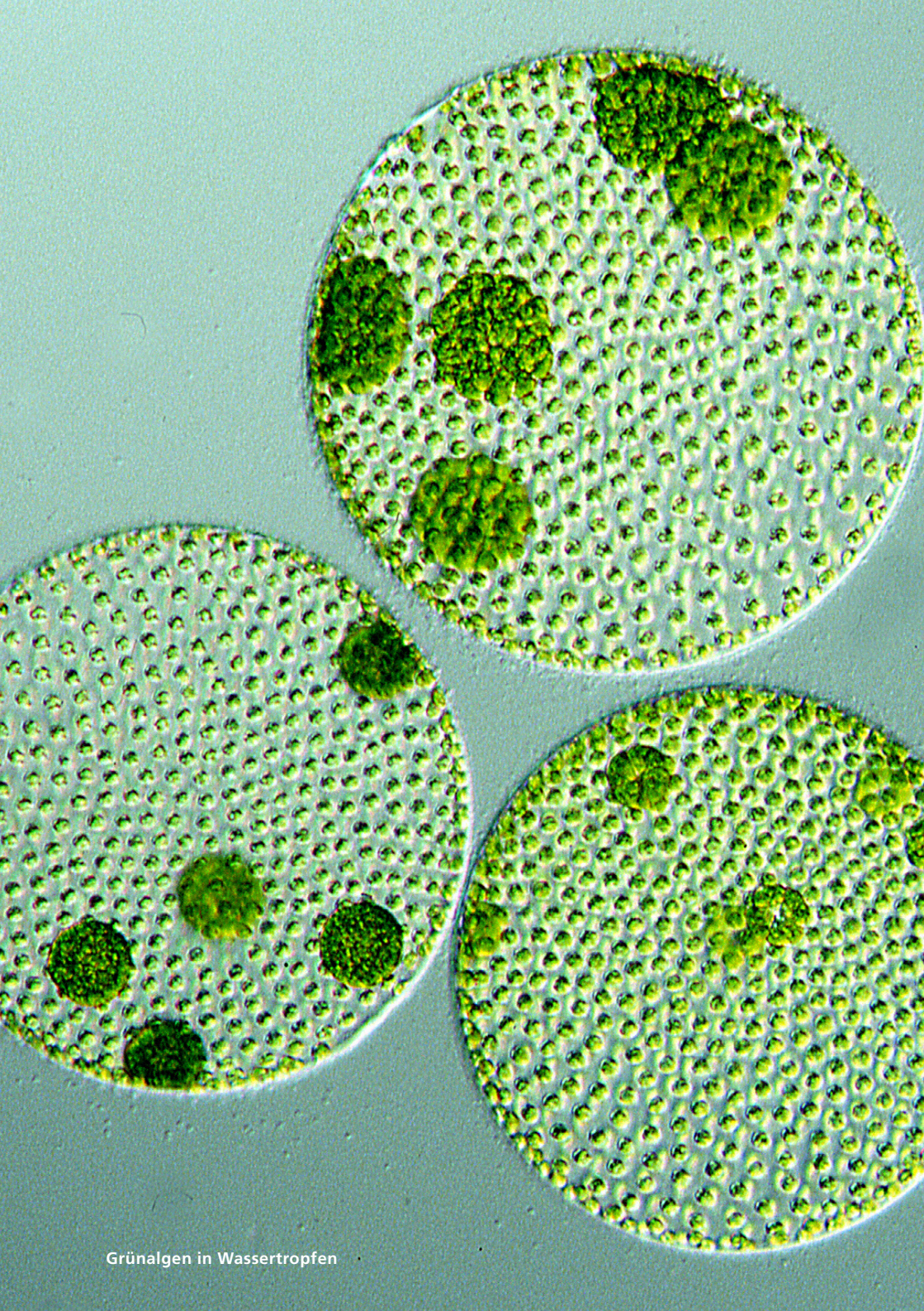


Abbildung 1: Von der natürlichen Photosynthese inspirierte Verfahren

Tabelle 1: Übersicht über Prozessschritte der natürlichen Photosynthese und ihre Umsetzung in technischen und biotechnischen Verfahren

Prozessschritt	Natürliche Photosynthese	Biotechnische Verfahren			Power-to-X
		Modifizierte Photosynthese	Hybride Verfahren		
			Gasfermentation	Elektrobiosynthese	
Wandlung Sonnenenergie zu [Energieform] Bereitstellung von [Reduktionsmittel]	Biochemisch gebundene Energie Biochemisch gebundene Reduktionsmittel aus H ₂ O	Biochemisch gebundene Energie und Reduktionsmittel aus H ₂ O ggf. durch Bioengineering optimiert	Solarstrom aus Photovoltaik H ₂ aus H ₂ O-Elektrolyse	Solarstrom aus Photovoltaik Elektronen als Reduktionsmittel	Solarstrom aus Photovoltaik H ₂ aus H ₂ O-Elektrolyse
CO ₂ -Reduktion	Biokatalytisch	Biokatalytisch, ggf. durch Bioengineering optimiert			Chemisch-katalytisch
Produktsynthese	Biosynthese	Biosynthese, ggf. durch Bioengineering optimiert			Chemische Synthese
Produkte	Kohlenhydrate Biomasse	Massen-, Fein- und Methan, Ethanol, langkettige	Spezialchemikalien, zum Beispiel Butanol, organische Säuren, funktionalisierte Kohlenstoffverbindungen		Vorwiegend C1-Verbindungen, (zum Beispiel Methan, Methanol), Kraftstoffe



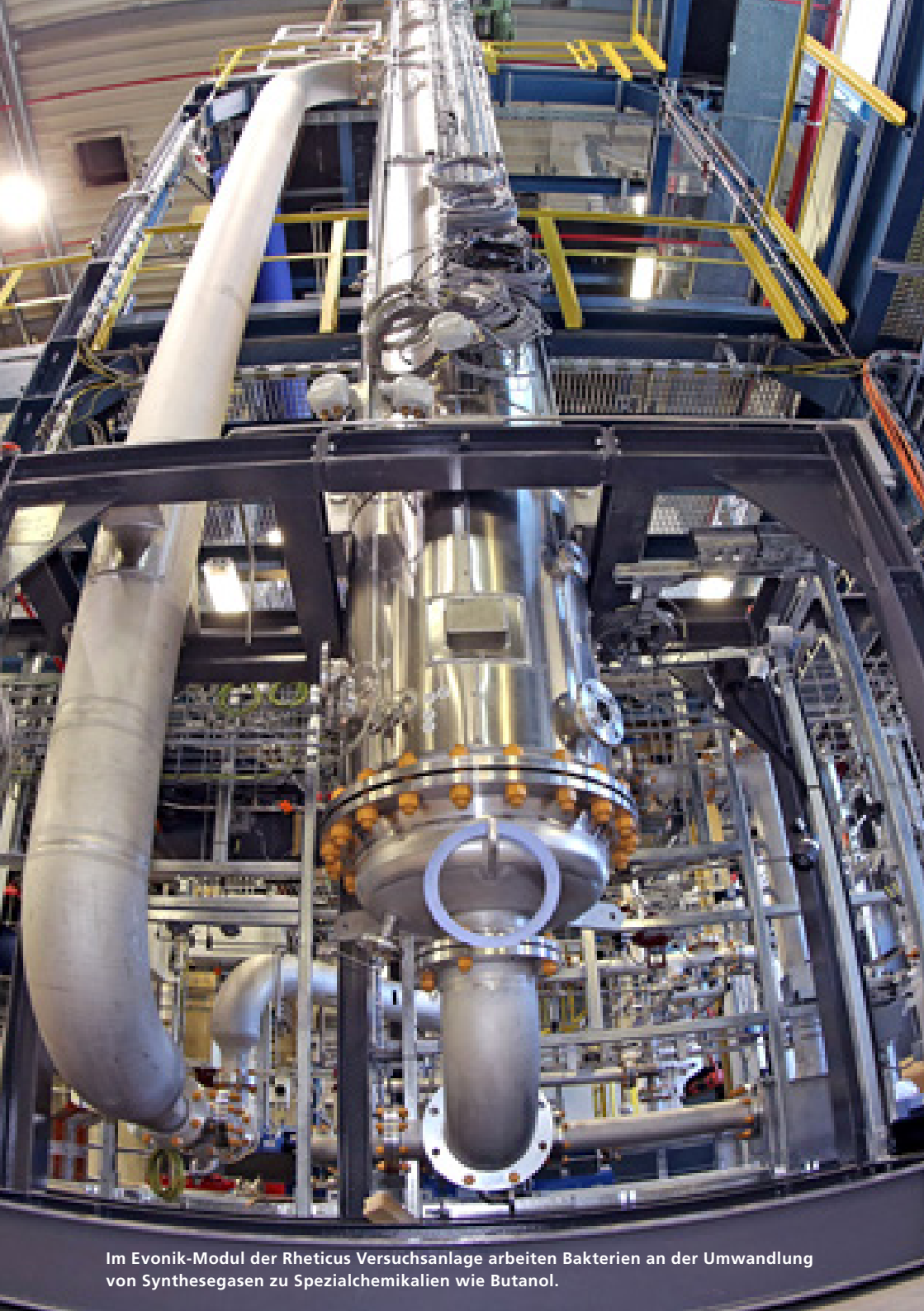
Modifizierte Photosynthese

Grünalgen und Cyanobakterien sind Mikroorganismen, die natürlicherweise zur Photosynthese befähigt sind. Wie bei Pflanzen erfolgen Sonnenenergiekonversion und Produktbildung in einem voll integrierten biologischen System.

Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Nutzpflanzen kann die Kultivierung dieser Mikroorganismen aber auf landwirtschaftlich nicht nutzbaren Flächen erfolgen, was Landnutzungskonflikte entschärfen kann. Zudem bergen sie das Potenzial, einen höheren Produktertrag pro Anbaufläche zu erzielen – unter anderem, weil Sonnenenergie und CO_2 effizienter in die Produktsynthese gelenkt werden können, da Mikroorganismen keine Wurzeln, Stängel oder Blätter ausbilden müssen.

Die photosynthetischen und biosynthetischen Stoffwechsellösungen der Grünalgen und Cyanobakterien werden bei der modifizierten Photosynthese durch gen- und verfahrenstechnische Veränderungen optimiert. Optimierungsziele sind höhere Wirkungsgrade der Solarenergiewandlung, höhere CO_2 -Fixierungs- und Produktbildungsrate, höhere Langzeitstabilität der Produktionsprozesse sowie die Synthese neuer Produkte mit hoher Ausbeute. Das Produktspektrum reicht von Massen-, Spezial- und Feinchemikalien über Nahrungsergänzungsmittel und Kosmetika bis hin zu Pharmazeutika.

Technologisch weit entwickelt und im industriellen Maßstab kommerzialisiert sind Verfahren zur Herstellung von Spezialchemikalien oder Nahrungsergänzungsmitteln. Es gibt Pilotanlagen für die Umsetzung von CO_2 -haltigen Kraft- und Zementwerksabgasen beispielsweise zu Fischfutter. Um CO_2 in größerem Maßstab nutzen zu können, müssen die Verfahren noch optimiert und vergrößert werden.



Gasfermentationen

So genannte autotrophe Bakterien verfügen über Stoffwechselwege, die CO_2 als Kohlenstoffquelle für den Aufbau von höherwertigen organischen Verbindungen nutzen. Das Konzept der Gasfermentation nutzt diese Eigenschaft, um industriell relevante Produkte wie Biokraftstoffe oder chemische Grundstoffe aus CO_2 in Abgasströmen herzustellen.

Acetogene Bakterien können aus CO_2 Essigsäure oder Ethanol produzieren. Als Energiequelle und Reduktionsmittel benötigen sie zudem Kohlenstoffmonoxid (CO) oder Wasserstoff (H_2). Wenn der Abgasstrom bereits eine ausreichende Konzentration an H_2 oder CO aufweist, kann das Abgas direkt für die Gasfermentation genutzt werden, beispielsweise bei Abgasen aus Stahl-Hochöfen. In den meisten Fällen muss jedoch zusätzlich H_2 zugeführt werden, der aus solarstrombetriebener Wasserelektrolyse stammt.

Für Abgase aus der Stahlindustrie hat die Gasfermentation bereits die Marktreife erreicht: Die US-Firma LanzaTech hat ein industrielles Verfahren zur Ethanolproduktion entwickelt und betreibt neben Demonstrationsanlagen auch eine kommerzielle Anlage in China. Eine erste europäische Demonstrationsanlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 80 Millionen Litern Ethanol wird derzeit in Ghent, Belgien, errichtet.

Zurzeit werden Gasfermentationsverfahren so weiterentwickelt, dass sie auch in anderen Branchen und für anders zusammengesetzte Abgasströme einsetzbar sind: Beispielsweise entwickeln die Unternehmen Evonik und Siemens im Rheticus-Projekt, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird, einen integrierten Prozess, in dem ein Elektrolyse-Modul zur H_2 und CO -Bereitstellung an eine Gasfermentation gekoppelt ist. Aus deren Reaktionsprodukten sollen in weiteren Fermentationsschritten höherwertige Kohlenstoffverbindungen wie Butanol und Hexanol hergestellt werden. Die Inbetriebnahme einer ersten Versuchsanlage soll im Jahr 2020 erfolgen.

Methanogene Archaeobakterien können aus CO_2 und H_2 Methan produzieren. Rohbiogas aus Biogasanlagen enthält noch CO_2 . Koppelt man eine biologische Methanisierungsstufe an Biogasanlagen und führt H_2 zu, kann dieses CO_2 in Methan umgewandelt und so die Methanausbeute von Biogasanlagen erhöht werden. Erste Anwendungen der biologischen Methanisierung sind bereits auf dem Markt.

Die bereits marktreifen Anwendungen der Gasfermentation bedienen bislang lediglich Nischenmärkte. Sie zeigen jedoch die industrielle Anwendbarkeit biotechnischer Verfahren zur CO_2 -Nutzung und leisten somit einen wichtigen Beitrag, die Bekanntheit und Akzeptanz in der Industrie zu erhöhen. Aktuelle Entwicklungsarbeiten zielen auf eine breitere industrielle Anwendung der Gasfermentation ab. Hierfür müssen die Verfahren für die Herstellung höherwertiger organischer Verbindungen weiter optimiert und ihre Praxistauglichkeit in Pilot- und Demonstrationsanlagen nachgewiesen werden.

Elektrobiosynthese

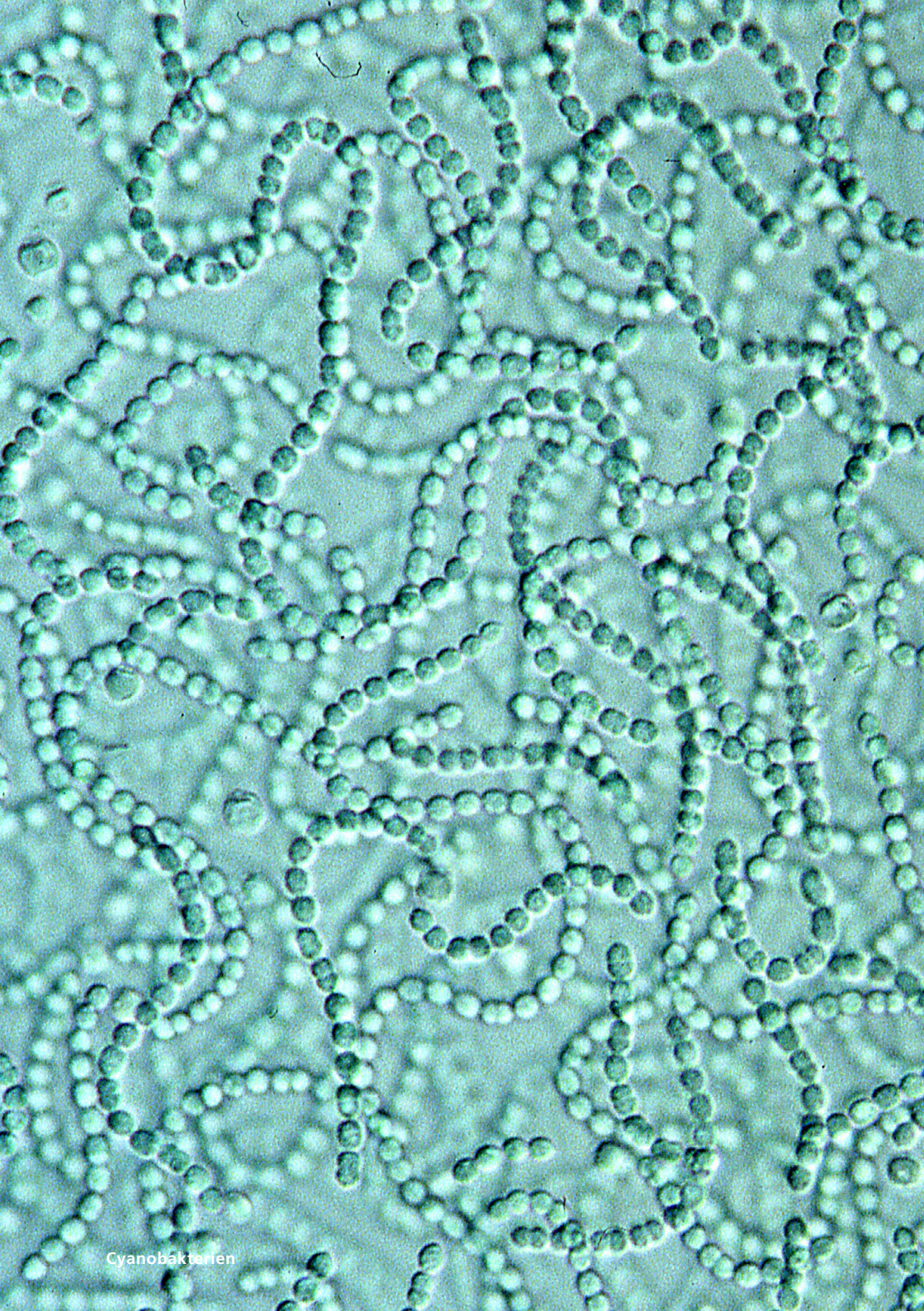
Verschiedene CO_2 -nutzende Bakterien sind in der Lage, als Biofilm auf stromdurchflossenen Elektroden zu wachsen und die elektrische Energie für die Reduktion von CO_2 zu nutzen. Diese so genannte Elektrobiosynthese birgt das Potenzial, auf diese Weise ein breites Spektrum an Massen-, Fein- und Spezialchemikalien zu synthetisieren.

Da die Bakterien direkt mit den Elektroden interagieren und die Elektrobiosynthese keinen „Umweg“ über eine Wasserelektrolyse und die Zuführung von Wasserstoff benötigt, ist sie sehr effizient. Allerdings ist die Elektrobiosynthese noch nicht im Detail verstanden, zum Beispiel wie der Übergang von Elektronen auf die Bakterien erfolgt.

Zurzeit sind elektrobiosynthetische Verfahren erst im Labormaßstab umgesetzt. Neben der Aufklärung der Mechanismen des Elektronentransfers zwischen Bakterium und Elektrode liegen Herausforderungen darin, ausreichend hohe Stromdichten auf die Bakterien zu übertragen und die Verfahren auf einen industriellen Maßstab zu skalieren. Hierfür werden neue Elektroden- und Bioreaktorkonzepte entwickelt.

Ausblick: Künstliche Photosynthese

Langfristiges Ziel der Entwicklung von bioinspirierten Prozessen zur solargetriebenen CO_2 -Nutzung ist die Entwicklung „künstlicher Blätter“. Dies sind rein technische Systeme, in denen die Prozessschritte der Umwandlung von Solarenergie und der katalytischen Synthese von Produkten aus CO_2 in einer Anlage räumlich und zeitlich vollständig miteinander integriert und dadurch sehr effizient sind. Es gibt bereits Prototypen im Labormaßstab. Aktuelle Herausforderungen liegen in der Erhöhung der Leistungsfähigkeit und der Robustheit der Anlagen, der Vermeidung teurer Materialien, sowie in der Entwicklung von Fertigungsverfahren für großflächige Anlagen.



Wie stehen biotechnische Verfahren im Vergleich da?

Die vorgestellten biotechnischen Verfahren erweitern und ergänzen das Spektrum verfügbarer Optionen zur CO₂-Nutzung.

Sie können Flächennutzungskonkurrenzen zwischen Nahrungsmittelproduktion, industrieller und energetischer Biomassenutzung verringern, wenn sie auf landwirtschaftlich nicht nutzbaren Flächen betrieben werden. Zudem ermöglichen sie einen Ausbau der industriellen Biotechnologie, ohne deren Bedarf an Biomasse als C- und Energiequelle zu erhöhen.

Mit biotechnischen Ansätzen ist prinzipiell eine große Produktvielfalt herstellbar, von einfachen Energieträgern und Grundchemikalien bis hin zu komplexen Fein- und Spezialchemikalien. Während Power-to-X-Ansätze vorrangig auf eine Energiespeicherung in einfachen Molekülen abzielen, liegen Stärken der biotechnischen Verfahren in der Herstellung längerer, funktionalisierter Kohlenstoffverbindungen. Biotechnische Verfahren sind im Allgemeinen weniger von seltenen Rohstoffen abhängig als Power-to-X-Ansätze und robuster gegenüber schwankenden CO₂-Konzentrationen und Katalysatorgiften in industriellen Abgasen.

Power-to-X-Ansätze müssten ab dem Jahr 2030 industriell eingesetzt werden, um die gesteckten Defossilisierungsziele zu erreichen. Sie können durch biotechnische Verfahren wie die biologische Methanisierung und spezielle Gasfermentationsverfahren ergänzt werden. Denn diese Verfahren haben in Nischenanwendungen bereits industrielle Einsatzreife erreicht, so dass ihr breiterer Einsatz ab 2030 möglich ist. Für die Produktion von Wertstoffen aus CO₂-haltigen Abgasen durch Grünalgen und Cyanobakterien, für weiterentwickelte Gasfermentationsverfahren und die Elektrosynthese kann der industrielle Einsatz voraussichtlich bis 2030 demonstriert werden.

Aktivitäten in Baden-Württemberg

Die „Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (LSN!B)“ weist das CO₂-Recycling mit biotechnischen bzw. bioinspirierten Technologien explizit als Beitrag zu den Klimaschutzzielen 2030/2050 aus: Baden-Württemberg wird gemeinsam mit anwendungsnaher Forschung und Industrie einen Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO₂-Recycling aufbauen.

Baden-Württemberg hat sowohl in Power-to-X-Ansätzen als auch biotechnischen Verfahren zur CO₂-Nutzung eine sehr gut aufgestellte Forschungs- und Entwicklungslandschaft an den Universitäten und Hochschulen des Landes und in außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Auch einschlägig tätige Unternehmen gibt es in Baden-Württemberg. Das Land weist damit beste Voraussetzungen auf, sich künftig konkret auf biotechnische und bioinspirierte Verfahren zur CO₂-Nutzung auszurichten.

Hierfür bedarf es noch einer verstärkten Kooperation zwischen den Akteuren, die Power-to-X-Ansätze entwickeln, und jenen, die biotechnische Verfahren erforschen, um Synergien zu schöpfen. Ziel sollte eine stärkere Ausrichtung auf anwendungsorientierte und industrierelevante Fragestellungen sein, um den industriellen Einsatz der Verfahren bald demonstrieren zu können.

Was zu tun ist

Damit das Potenzial biotechnischer Verfahren zur CO₂-Nutzung und zur Kohlenstoffkreislaufführung erschlossen werden kann, ist folgendes zu tun:

- *Erhöhung des Bekanntheitsgrads* dieser Verfahren in Politik, Forschung, Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Gruppen sowie bei interessierten Bürgerinnen und Bürgern. Ziel ist es, biotechnische Verfahren in künftige Strategien und Aktivitäten einzubinden.
- *Technologische Weiterentwicklung* der biotechnischen Verfahren zur CO₂-Nutzung, indem Akteure in Forschung, Entwicklung und Industrie mobilisiert, Kompetenzen (zum Beispiel Biotechnologie, Prozesstechnik, Elektrolyse) zusammengeführt und Forschung und Entwicklung auf anwendungsbezogene Fragestellungen mit Industrierelevanz ausgerichtet werden. Für reifere Technologien sollten Demonstrationsanlagen angestrebt werden.
- Den *Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO₂-Recycling*, der in der „Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (LSN!B)“ vorgesehen ist, langfristig anlegen und verschiedene Förderinstrumente wählen, die dem Forschungsbedarf, dem unterschiedlichen Reifegrad der Verfahren und der erforderlichen Netzwerkbildung Rechnung tragen.
- *Vergleichende Analyse und Bewertung* aller Ansätze zur CO₂-Nutzung (unter anderem auch Land- und Fortwirtschaft, bio-basierte Produktion, Power-to-X) mit ihren spezifischen Potenzialen, Stärken und Schwächen. Ziel sind Kombinationen von CO₂-Nutzungsoptionen, die wechselseitig Schwächen kompensieren und sich synergistisch ergänzen.
- *Rahmenbedingungen weiterentwickeln*, damit ein künftiger Betrieb von CO₂-Nutzungstechnologien wirtschaftlich möglich wird. Dies setzt Anreize, die Verfahren jetzt bis zur industriellen Anwendungsreife zu entwickeln.

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Kontakt

Bärbel Hüsing
Telefon +49 721 6809-210
baerbel.huesing@isi.fraunhofer.de

Autorinnen und Autoren

Bärbel Hüsing
Heike Aichinger
Frank Marscheider-Weidemann
Cornelius Moll
Martin Wietschel

Grafische Gestaltung

Jeanette Braun
Sabine Wurst

© Fraunhofer ISI 2020

www.isi.fraunhofer.de

Bildnachweise

Cover
Rémi Walle für Unsplash
Seite 2
Shutterstock.com/Dewin, Indew
Seite 8
Shutterstock.com/Dr. Norbert Lange
Seite 10
Evonik Industries AG
Seite 14
Shutterstock.com/Dr. Norbert Lange

Druck

Stober GmbH
Druck und Verlag, Eggenstein

Diese Broschüre wurde klimaneutral gedruckt
auf 100 Prozent Recycling-Papier

Diese Broschüre ist Bestandteil des Projekts „Technologie- und Marktstudie: Übersicht über Technologien zur biotechnischen und bioinspirierten CO₂-Fixierung und -Nutzung sowie der Akteure in Baden-Württemberg“. Förderung durch das Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“, FKZ BWCO219001

Der vollständige Bericht mit weiterführenden Informationen ist kostenlos verfügbar unter: <http://s.fhg.de/Wxk>

