

Erneuerbare statt fossile Rohstoffe – eine Chance für die Schweiz

Was sind geeignete Quellen für erneuerbare Rohstoffe? Wie können aus diesen Gebrauchs- und Wertstoffe hergestellt werden? Was sind Bioraffinerien? Wo liegt die grosse Wertschöpfung? Was sind die Chancen für die Schweiz?

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences

Inhaltsverzeichnis

2	1 Einleitung
3	Vorwort
4	2 Heutige Situation und strategische Herausforderungen
6	3 Rohstoffe
6	3.1 Biomasse
10	3.2 Kohlendioxid CO ₂
12	3.3 Biogas
13	4 Veredelung der Rohstoffe
13	4.1 Chemische Verfahren
15	4.2 Mikrobielle Verfahren und Säugetierzellen
18	4.3 Pflanzen und Pflanzenzellkulturen
19	4.4 Algenkulturen
20	5 Bioraffinerien
22	6 Feststellungen
24	Empfehlungen

1 Einleitung

Im Rahmen eines SATW-Projektes untersuchte eine Arbeitsgruppe bestehend aus Richard Braun, Kaspar Eigenmann, Daniel Gygax, Serge Kocher, Ulla Létinois, Adrian Rüeeggsegger und Christian Suter Möglichkeiten zur ersatzweisen Verwendung erneuerbarer Materialien als Ausgangsstoffe für heute weitgehend aus fossilen Quellen hergestellte Produkte. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Energiegewinnung war nicht Gegenstand des Projekts.

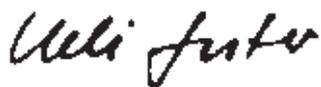
Die Studie soll Quellen für erneuerbare Materialien eruieren und Möglichkeiten aufzeigen, wie aus Biomaterialien Gebrauchs- und Wertstoffe hergestellt werden können. Es sollen erfolgversprechende technische Verfahren für die Herstellung und Umwandlung identifiziert und dabei Fragen der Wirtschaftlichkeit, der Versorgungssicherheit und der Langfristigkeit berücksichtigt werden.

Weiter sollen Entwicklungsperspektiven für die Schweiz evaluiert werden: Wo liegen unsere Stärken und Schwächen? Wo bestehen Fördermöglichkeiten für die Forschung und Entwicklung? Darauf basierend sollen Folgerungen für die schweizerische F&E-Politik aufgezeigt werden.

Vorwort

Energie und Rohstoffe sind das technische Futter der Industrie. Über die Energie-Nutzung wird seit längerem intensiv diskutiert, obwohl gegenwärtig eher zu viel als zu wenig Leistung bereitsteht. Rohstoffe werden im öffentlichen Diskurs eher stiefmütterlich behandelt, wobei seltene Metalle immer wieder einmal im Visier der Presse erscheinen. Erneuerbare (das heisst organische) Materialien werden aber (ausser als Objekt der Energiedebatte) kaum erwähnt. Der Grund dafür mag in der billigen Verfügbarkeit der fossilen Ersatzstoffe liegen.

Der vorliegende Bericht behandelt nun diese Rohstoffe und beschreibt den Stand der Technik ihrer Verwendung zur Herstellung von Werk-, Wirk- und Wertstoffen. Dabei wird für den Leser beziehungsweise die Leserin sehr bequem zwischen praktisch schon verfügbaren und noch erst als Konzept vorhandenen Prozessen unterschieden. Auch der notwendigen und vielversprechenden industriellen Kombination von Biotechnologie und Chemie wird der notwendige Platz eingeräumt. Die Auslegeordnung endet mit den in der Schweiz noch nicht über das Konzeptstadium hinausgewachsenen Bioraffinerien. Das Papier schliesst mit einer knappen Liste von Feststellungen und vier Empfehlungen, denen man nur beste Aufnahme in Industrie, Politik und der breiten Bevölkerung wünschen kann, damit diese «Chance für die Schweiz» auch wirklich wahrgenommen wird.



Ulrich W. Suter, Präsident SATW

Dabei interessierte es, wie weit in den Unternehmen heute Biomaterialien verwendet werden, ob in den Unternehmenszielen und -strategien biobasierte Materialien eine Rolle spielen und auf welche Weise entsprechende Innovationshorizonte verfolgt werden. Gleichzeitig hat die Arbeitsgruppe untersucht, wo an Schweizer Hochschulen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geleistet werden, die einen Beitrag zu dieser Zielsetzung leisten können.

Diese Broschüre fasst die Resultate zusammen. Nach einer Analyse der heutigen Situation und der strategischen Herausforderungen in Kapitel 2 werden die Möglichkeiten sowie Vor- und Nachteile verschiedener erneuerbarer biologischer Ausgangsmaterialien in Kapitel 3 dargestellt. In Kapitel 4 werden verschiedene Techniken zur Veredelung diskutiert. Kapitel 5 ist dann dem Ersatz von konventionellen Erdölraffinerien durch Bioraffinerien gewidmet.

Schliesslich werden in Kapitel 6 Folgerungen für die Förderung von technischen Verfahren und für die Schwerpunktbildung in der Forschung und Entwicklung gezogen. Auf der Rückseite folgen Empfehlungen für die schweizerische Forschungspolitik.



2 Heutige Situation und strategische Herausforderungen¹

Seit rund 70 Jahren sind wir von der erdölbasierten Chemie abhängig. Heute werden etwa 90 Prozent aller organisch-chemischen Alltagsgüter aus Erdöl hergestellt. So werden zum Beispiel jährlich 115 Mio. Tonnen Ethylen, 70 Mio. Tonnen Propylen und 70 Mio. Tonnen aromatische Verbindungen als wichtige Grundchemikalien aus Erdöl produziert. Die Produkte der Petrochemie sind allgegenwärtig. Die Herstellung von chemisch-technischen Alltagsprodukten auf der Basis von Erdöl stellt einen bedeutenden Wertschöpfungsprozess dar, der jedoch mehrere Herausforderungen birgt.

Die erste Herausforderung liegt in der beschränkten Verfügbarkeit des Erdöls. Eine «Produktion» ist nicht möglich. Die Vorkommen würden zwar noch sehr lange reichen, wenn das Erdöl nur für die Petrochemie eingesetzt würde. Die Realität sieht aber so aus, dass der Grossteil als Treib- und Brennstoff genutzt wird. Dadurch werden auch die für die Petrochemie nutzbaren Reserven geschmälert. Zudem ist der Erdölpreis eine Herausforderung. Dieser basiert auf den Kosten für Förderung, Transport und Lagerhaltung, Aufschlag der Förderunternehmen und -länder sowie globalen, zum Teil spekulativen Handelsstrukturen.

Die zweite Herausforderung liegt darin, dass die Herstellung chemischer Produkte auf Erdölbasis sehr hohe gesellschaftliche, im Preis nicht voll reflektierte externe Kosten verursacht: Die Umweltbelastung durch die Erdölgewinnung, die hohen ökologischen Risiken beim Transport des Rohöls in Pipelines oder über die Weltmeere, der enorme Aufwand an Energie bei der petrochemischen Primärverarbeitung, das Störfallrisiko industrieller Chemieanlagen, die Beseitigung der Produktionsabfälle und unerwünschter Nebenprodukte, die Belastung der Umwelt mit den Zersetzungsprodukten nach dem Gebrauch und insbesondere der klimaschädliche Eintrag von Kohlendioxid CO₂ und anderen Schadstoffen in die Biosphäre.

Die dritte Herausforderung ist grundlegender, thermodynamischer Art. Thermische Energie kann nicht vollständig in andere Energieformen umgewandelt werden, sondern es wird immer ein Rest als Wärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Sobald wir Rohstoffe nutzen, wird die Umgebung also unweigerlich «aufgeheizt».

Natur zeigt Ausweg aus Abhängigkeit von Erdöl

Gibt es einen Ausweg aus unserer Abhängigkeit vom Erdöl? Seit Millionen Jahren betreibt die Natur weltweit eine sanfte Chemie basierend auf Kreislaufprozessen. Grundlage dieser natürlichen Syntheseprozesse ist die Photosynthese. Dabei dienen die einfachen Ausgangsstoffe CO₂ und Wasser als Basis für den Aufbau eines breiten Spektrums an komplexen, strukturierten und wertvollen Endprodukten.

Seit den 1980er Jahren wird in Brasilien aus Zuckerrohr und in den USA aus Mais in grossem Umfang Bioethanol hergestellt. Seit den 1990er Jahren wird Biodiesel durch Umesterung aus pflanzlichen Ölen als Treibstoffzumischung eingesetzt. Die Verwendung von erneuerbaren Rohstoffen für Zwecke, die nicht der Energiegewinnung dienen, ist jedoch immer noch marginal. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass fossile Rohstoffe heute ökonomisch viel attraktiver sind als Biomasse. In Deutschland etwa verwendet die chemische Industrie rund 87 Prozent fossile Rohstoffe und 13 Prozent erneuerbare Rohstoffe. Im gesamten Europa verwendet die chemische Industrie etwa 8 Prozent erneuerbare Rohstoffe. Von fossilen Rohstoffen wegzukommen, ist Teil der Nachhaltigkeitsprogramme der Industrie. Aufgrund der schwierigen Rahmenbedingungen liegt der Schwerpunkt aber auf anderen Aspekten der Nachhaltigkeit, zum Beispiel der Reduktion des Energieverbrauchs.

	Fossile Rohstoffe	Erneuerbare Rohstoffe
Beispiele	Erdöl, Erdgas, Kohle	Holz
Verfügbarkeit	begrenzt (nicht erneuerbar)	fast unbegrenzt (erneuerbar)
Kreislauf	Kreislauf unterbrochen (einmaliger Gebrauch)	Kreislauf geschlossen (mehrfacher Gebrauch)
Abfallproblematik	<ul style="list-style-type: none"> • unerwünschte Nebenprodukte • Produktionsabfälle • Sondermüll • umweltbelastende Zersetzungsprodukte • CO₂-Ausstoss 	stark reduzierter Abfall
Wiederbeschaffungskosten	willkürlicher Wert (Wiederbeschaffung unmöglich)	realer Wert
Produktion	global, monopolisiert, international, überregional	regional, lokal, dezentral, autark, autonom, diversifiziert
Aufarbeitung	chemisch, physikalisch	physikalisch, enzymatisch, chemisch
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> • globaler Transport (Pipelines, Öltanker) • Störfälle in Industrieanlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Übernutzung des Bodens • Konkurrenz zu Nahrungsmittelproduktion
Infrastruktur	etabliert	kaum etabliert

Tabelle 1: Gegenüberstellung von fossilen und erneuerbaren Rohstoffen

Eigenschaften fossiler und erneuerbarer Rohstoffe

Als Kohlenstoffquelle für die Chemie kommen ausser fossilen Rohstoffen und Biomasse nur noch CO₂ und Karbonate in Frage. Die Nutzung von CO₂ und Karbonaten erfordert aber aus thermodynamischen Gründen einen hohen Energieaufwand. Durch Pflanzen fixiertes und in Biomasse umgewandeltes CO₂ ist hingegen eine attraktive und nachhaltige Kohlenstoffquelle, die quasi ein Recycling von CO₂ darstellt.

Immer ist aber eine Gesamtbetrachtung (zum Beispiel anhand eines Life Cycle Assessments, LCA) erforderlich. So kann es effizienter sein, nachwachsende Rohstoffe als Energieträger zu nutzen, um die fossilen Vorräte zu schonen, damit sie möglichst lange für die Herstellung chemischer Produkte zur Verfügung stehen. Langfristig

wird es aber auch für die chemische Industrie wichtig sein, erneuerbare Rohstoffe zu verwenden. Daher ist der Ersatz von fossilen durch alternative Rohstoffe im Sinne von Kreislauf-Prozessen auf jeden Fall sinnvoll.

Aufgrund des aktuell tiefen Rohölpreises sind heute nur Produkte mit hoher Wertschöpfung wirtschaftlich interessante Ziele für erneuerbare Rohstoffe. Diese setzen sich im Markt nur durch, wenn sie entweder ökonomische oder technische Vorteile gegenüber fossilen Rohmaterialien aufweisen. Die ökonomischen Faktoren führten auch dazu, dass Forschung und Entwicklung bis vor wenigen Jahren dem Bereich der erneuerbaren Rohstoffe wenig Aufmerksamkeit schenkten. In den letzten Jahren hat sich dies vor allem ausserhalb der Schweiz geändert. Insbesondere die Idee von Bioaffinerien brachte neue Impulse.

¹ Behrens M et al., Catalysis for the conversion of biomass and its derivatives, Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge, Verlag epubli (2013) ISBN 978-3-8442-4282-9: 1–457

Erdölvereinigung, FAQ (2012) http://www.erdoel-vereinigung.ch/Libraries/Zahlen_und_Fakten/Jahresgrafiken_2012_d_12.pdf

Fischer H, Stoff-Wechsel: Auf dem Weg zu einer solaren Chemie für das 21. Jahrhundert, Verlag Kunstmann (2012) ISBN 978-3-88897-808-1: 137–171

Fraunhofer ISI, Potenzialanalyse der industriellen weissen Biotechnologie (2007): 40 http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/t/de/publikationen/potenzialanalyse_weisse_bt.pdf

Knizia K, Kreativität, Energie und Entropie: Gedanken gegen den Zeitgeist, Verlag Econ (1992) ISBN 3-430-15496-0: 90–100



3 Rohstoffe

3.1 Biomasse

Vor dem Aufkommen der erdölbasierten Chemie vor rund hundert Jahren stammten fast alle Ausgangsmaterialien aus pflanzlicher und tierischer Biomasse. Dieser Anteil sank zuerst kontinuierlich und blieb dann bei rund zehn Prozent stabil¹. Dies zeigt, dass gewisse biogene Rohstoffe trotz billigem Erdöl ökonomisch konkurrenzfähig blieben. Rohstoffe aus Biomasse werden heute im Umfang von rund 50 Mio. Tonnen pro Jahr für die Herstellung von chemischen Substanzen genutzt².

Durch die Erschliessung neuer Quellen und verbesserte Methoden der Veredelung solcher Rohstoffe (siehe Kapitel 4) liesse sich die Menge noch beträchtlich steigern. Ob Biomasse dazu verwendet werden soll, Erdölprodukte zu ersetzen, muss jedoch von Fall zu Fall entschieden werden, am besten anhand eines Life Cycle Assessments (LCA). Denn nicht immer ist eine nachwachsende Ressource in der Gesamtbilanz unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit optimal und es gibt auch bei biogenen Ressourcen eine Nutzungskonkurrenz. So kann beispielsweise Holz auch als Brennmaterial verwendet werden – wodurch ebenfalls fossile Ressourcen geschont werden – oder als Baustoff.

Beruhend auf ihren chemischen Eigenschaften kann man die mengenmässig wichtigsten biogenen Rohstoffe in drei Gruppen einteilen: Zucker und Stärke, Holz und Pflanzenreste sowie Öle und Fette.

Zucker und Stärke

Was im Alltag als Zucker bezeichnet wird, ist Saccharose, ein Disaccharid aus Glukose und Fruktose. Pflanzen produzieren bei der Photosynthese Glukose, die als Baustein für Saccharose, Stärke und Zellulose dient. Stärke ist ein aus zahlreichen verknüpften Glukosemolekülen bestehendes Makromolekül. Zucker und Stärke sind wichtige Rohstoffe für die Lebensmittelindustrie. Eine zunehmende Bedeutung erlangte in den letzten Jahren die Vergärung von zucker- oder stärkehaltigen Pflanzenteilen zur Gewinnung von Ethanol.

Stärke wird schon seit einiger Zeit technisch genutzt als Hilfsstoff in der Textil- und Papierbranche. Auch zur Herstellung von biologisch abbaubaren Kunststoffen wie Polylaktat ist sie geeignet³. Mulchfolien aus Polylaktat schützen frisch gepflanzte Setzlinge vor aufkommendem Unkraut. Die Folien sind biologisch abbaubar und Reste können nach Gebrauch untergepflügt werden. Insgesamt werden auf einer Anbaufläche von 300'000 Hektaren Ausgangsmaterialien für Biokunststoffe hergestellt. Das entspricht rund 2 Promille der gesamten weltweiten Ackerbaufläche.

Holz und Pflanzenreste

Ein grosser Teil der pflanzlichen Trockensubstanz befindet sich in den Zellwänden der Pflanzen. Diese bestehen rund zur Hälfte aus Zellulose, einem Makromolekül aus Glukose-Untereinheiten (siehe Abbildung 1). Die weiteren wichtigen Bestandteile der Zellwände sind Hemizellulose, ein Gemisch von Makromolekülen aus verschiedenen Zuckerbausteinen, sowie Lignin, ein dreidimensional und amorph vernetztes Makromolekül aus phenolischen Bausteinen. Die Zellwände von verholzten Pflanzenteilen enthalten bis zu 30 Prozent Lignin. Weil die Biomasse auf der Erde hauptsächlich aus Pflanzen besteht, zählen Zellulose, Hemizellulose und Lignin zu den mengenmässig wichtigsten Bioressourcen überhaupt.

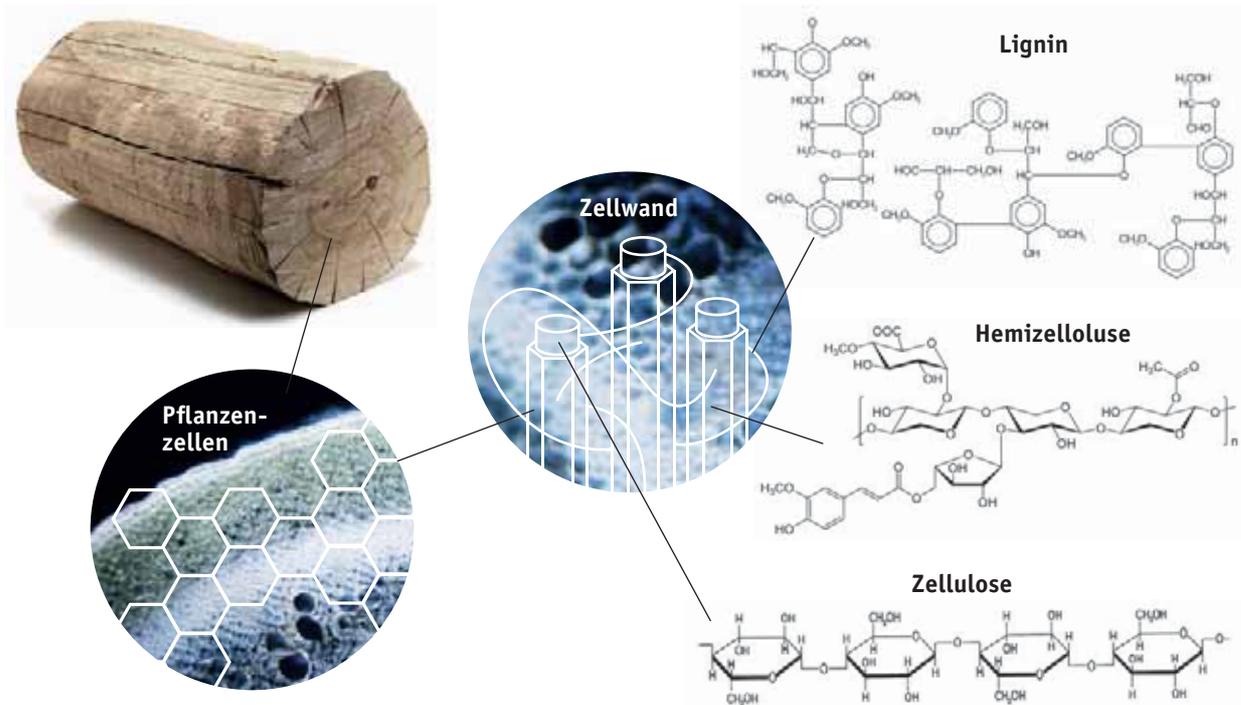


Abbildung 1: Molekularer Aufbau von Holz⁴

Holz wird seit langer Zeit nicht nur als Brenn- und Baumaterial genutzt, sondern auch zur Herstellung von Papier – jährlich weltweit rund 280 Mio. Tonnen¹. Zu diesem Zweck wird die Zellulose benötigt; als Nebenprodukte fallen beträchtliche Mengen an Lignin und Hemizellulose an. Lignin und Hemizellulose werden heute erst zu einem geringen Anteil für chemische Synthesen weiterverwendet. Üblich ist die Verbrennung, um die Prozesswärme für die Papierherstellung zu erzeugen. Immerhin werden aus Hemizellulose rund

150'000 Tonnen Furfural pro Jahr gewonnen¹. Dies ist eine ölartige Substanz, die zur Herstellung von Chemiefasern und Kunstharzen oder – über die Zwischenstufe Furan – von Lösungsmitteln verwendet werden kann. Auch die Produktion von Polyalkoholen als Ausgangsmaterial für Kunststoffe und von Aminen als Ausgangsmaterial für Farbstoffe aus Hemizellulose ist möglich. Lignin könnte als Basis für die Herstellung zahlreicher Chemikalien wie Benzol und Phenolen verwendet werden (siehe Tabelle 2).

Lignin als Ressource für				
Produkte über Synthesegas	Kohlenwasserstoffe	Phenole	Oxydierte Produkte	Makromoleküle
<ul style="list-style-type: none"> • Methanol • Dimethylether • Ethanol 	<ul style="list-style-type: none"> • Benzol • Toluol • Xylol 	<ul style="list-style-type: none"> • Phenol • substituierte Phenole • Catechol 	<ul style="list-style-type: none"> • Carbonsäuren • Aldehyde • Vanillin 	polymere Zusätze z.B. für Kunststoffe, Klebstoffe oder Bindemittel

Tabelle 2: Lignin als potenzielle Ressource für zahlreiche Chemikalien (nach², gekürzt)



Holz und Pflanzenreste wie Stroh, Maisstängel und andere Ernterückstände oder pflanzliche Abfälle sind in beträchtlichen Mengen vorhanden und finden in der Nahrungsmittelproduktion keine Verwendung. Deshalb wäre es besonders sinnvoll, diese als Rohstoffe für chemische Produktionsverfahren zugänglich zu machen. Allerdings sollte ein gewisser Anteil von Pflanzenresten auf den Äckern belassen werden, um die Qualität des Bodens (Humus) zu erhalten.

Am effektivsten ist es, wenn die Biomasse so genutzt wird, dass möglichst wenig Änderungen an ihrer Struktur erforderlich sind. Ein interessantes Anwendungsfeld ist deshalb die so genannte Nanozellulose, eine Möglichkeit, speziell aufbereitete Zellulosefasern stofflich zu nutzen, zum Beispiel als Ressource für die Herstellung oder Verstärkung von Kunststoffen⁶. Nur dort, wo aus diesen biologischen Ressourcen nicht direkt die gewünschten Endprodukte hergestellt werden können, ist deren Bereitstellung für etablierte petrochemische Verfahren zweckmässig. Es sind dabei neue Schnittstellen gefragt (siehe Kapitel 5). Ein vielversprechender Schritt ist zumindest im Labormassstab gelungen: die direkte Umwandlung von Zellulose in Stärke durch eine biotechnische Kaskade von vier Enzymreaktionen⁵.

Bei der Verwendung von Holz als Ressource ist jedoch nicht nur die Umwandlung der «sperrigen» Biomoleküle Zellulose, Hemizellulose und Lignin eine Herausforderung, sondern schon die Bereitstellung von homogenem Ausgangsmaterial. Denn die Anteile von Zellulose, Hemizellulose und Lignin sind von Pflanzenart zu Pflanzenart sehr unterschiedlich und schwanken auch innerhalb derselben Art, verursacht zum Beispiel durch wechselnde Umweltbedingungen. Somit müssen die entsprechenden Prozesse sehr robust sein.

Öle und Fette

Öle und Fette bestehen aus Glycerin (einem dreiwertigen Alkohol) und Fettsäuren. Sie werden vorwiegend auf pflanzlicher Basis gewonnen, zum Beispiel aus Ölpalmen, Raps, Mais oder Soja – derzeit jährlich rund 140 Mio. Tonnen pro Jahr. Davon werden rund 80 Prozent für die Herstellung von Nahrungsmitteln verwendet, der Rest für Futtermittel, Biotreibstoffe und als Rohstoff für die chemische Industrie².

Als Nebenprodukt der Herstellung von Biodiesel fallen aktuell rund 1,4 Mio. Tonnen Glycerin pro Jahr an, wodurch rund drei Viertel der jährlichen Nachfrage abgedeckt werden². Diese in absehbarer Zeit noch zunehmende Quelle von Glycerin macht die Entwicklung von Techniken interessant, die es als Rohstoff für Fermentationsprozesse oder als Plattformchemikalie für weitere Synthesen nutzen könnten.

Biogene Rohstoffe in der Schweiz

In der Schweiz wäre es kaum sinnvoll, in grösserem Ausmass landwirtschaftliche Flächen einzusetzen, um Biomasse für die stoffliche Nutzung zu gewinnen, denn dies ginge zu Lasten der Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Die Schweizer Landwirtschaft deckt bei der heutigen Flächennutzung kalorienmässig nur knapp zwei Drittel des inländischen Nahrungsbedarfs. Zudem sind die Produktionskosten hoch. Wie schon eine breit abgestützte Studie⁷ zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz gezeigt hat, ist auch die Ökobilanz der biogenen Ressourcen nicht immer vorteilhaft. Am Beispiel des Anbaus von Raps als Energiepflanze wurde berechnet, dass Rapsöl bei einer umfassenden Beurteilung der Nachhaltigkeit sogar schlechter abschneidet als Erdöl. Der Grund dafür ist der relativ hohe Aufwand, der für Düngung, Pflanzenschutz und maschinelle Bearbeitung der Felder erforderlich ist. Der in der Schweiz aus Zuckerrüben hergestellte Zucker – rund 300 000 Tonnen im Jahr 2014⁸ – wird fast ausschliesslich für die Lebensmittelproduktion verwendet. Als Nebenprodukt der Zuckerherstellung fielen 2014 zudem rund 56 000

Tonnen Melasse an⁸. Diese kann als Kohlehydratquelle für biotechnologische Umsetzungen dienen sowie für die Herstellung von Futtermitteln.

In der Schweiz kommt am ehesten Holz als Bioressource in Frage. Dessen industrielle Nutzung hat eine lange Tradition. Ein bekanntes Beispiel ist die Papierherstellung. Diese ist in der Schweiz zunehmend bedroht durch ausländische Konkurrenz, was die Schwierigkeit aufzeigt, in einem Land mit hohen Produktionskosten erfolgreich Massengüter herzustellen. In einem Umfeld von langfristig steigenden Erdölpreisen dürfte aber Holz als Ressource für künftige Bioraffinerien von Interesse sein. Es steht auch in grossen Mengen zur Verfügung: 2013 wurden im Schweizer Wald 4,8 Mio. Kubikmeter Holz geschlagen⁹. Um Holz beziehungsweise dessen Bestandteile als Ressourcen für Bioraffinerien zu nutzen, sind aber effizientere Methoden zur Verarbeitung der Komponenten in grossen Mengen notwendig. Im Nationalen Forschungsprogramm NFP 66 «Ressource Holz» ist die chemische Nutzung von Holz ein wichtiger Schwerpunkt¹⁰. Das Forschungsprogramm, das sich über die Jahre 2012 bis 2017 erstreckt, verfügt dazu über ein Modul zum Thema «Holz

als Rohstoff für verwertbare chemische Substanzen». Darin befassen sich sechs Forschungsprojekte insbesondere mit der Entwicklung von biotechnischen Verfahren, die Lignin als Ressource verwenden können. Die SATW hat zudem 2014 zum Thema «Advanced Wood Technologies» ein Transferkolleg durchgeführt¹¹.

Designerorganismen aus der synthetischen Biologie könnten die direkte Stofftransformation von Holz zu Wertstoffen ermöglichen. Dieser Transformationsprozess könnte auch lokal stattfinden – zum Beispiel direkt bei einem Sägewerk – ohne dass gleich eine Pyrolyseanlage im industriellen Massstab erforderlich ist.

Für den Schweizer Produktionsstandort sind innovative, nachhaltige und effiziente technische Verfahren gefragt. Solche könnten auch dazu dienen, vermehrt Produkte wie pharmazeutische Wirkstoffe auf der Basis von biologischen Ressourcen beziehungsweise den entsprechenden Plattformchemikalien zu produzieren. Ein aktuelles Beispiel ist die Herstellung von 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF), einer vergleichsweise teuren Chemikalie mit vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten (siehe Kasten unten).

¹ GDCh, DEHEMA, DGMK, VCI, Rohstoffbasis im Wandel, Positionspapier (2010)

² IEA Bioenergy, Bio-based Chemicals. Value Added Products from Biorefineries, Task 42 Biorefinery (2012)

³ Wikipedia, Stichwort «Polylaktat» (28.5.2013)

⁴ www.ipe.ethz.ch/laboratories/ltr/education/Studienarbeiten, Verknüpfung «Starke Verflechtung der Komponenten» im Abschnitt «Green Chemistry» (27.1.2015)

⁵ Chun Y et al., Enzymatic transformation of nonfood biomass to starch, PNAS online (2013): April 15

⁶ Hohlfeld S und Honsel G, Starker Pudding: Schon lange schwärmen Wissenschaftler von Nanocellulose als neuem Wunderwerkstoff, Technology Review (2013) Juni 2013: 10–11

⁷ Zah R et al., Future Perspectives of 2nd Generation Biofuels, vdf Hochschulverlag, Zürich (2010)

⁸ Zuckerfabriken Aarberg und Frauenfeld, Statistik (11.2.2015)

⁹ Bundesamt für Statistik (2014): Schweizer Forststatistik 2013

¹⁰ Schweizerischer Nationalfonds, Nationales Forschungsprogramm NFP 66 «Ressource Holz», www.nfp66.ch (9.7.2013)

¹¹ www.satw.ch/projekte/transferkolleg/2014 (27.1.2015)

Die Plattformchemikalie 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF)

Plattformchemikalien sind chemische Substanzen, die zur Herstellung von zahlreichen verschiedenen Produkten geeignet sind und die in grossen Mengen verwendet werden. Dazu zählt 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF). 5-HMF ist eine organische Verbindung, die sich bei der thermischen Zersetzung von Kohlehydraten bildet. Beim Erhitzen von Zucker in einer Pfanne macht sich 5-HMF durch einen karamellartigen Geruch bemerkbar. Die Chemikalie lässt sich aus pflanzlicher Biomasse gewinnen und kann in der chemischen Industrie künftig als Ausgangsstoff für verschiedene innovative Materialien fungieren, vor allem für Polymere mit spezifischen Eigenschaften. Nach Einschätzung des US-amerikanischen Department of Energy ist 5-HMF eine der zehn wichtigsten Plattformchemikalien. Allerdings stellt es eine Herausforderung dar, 5-HMF in industriellem Massstab herzustellen. Dem Karlsruher Institut für Technologie KIT und der Schweizer Firma AVA Biochem BSL AG ist nun aber ein wichtiger wissenschaftlich-technischer Durchbruch gelungen: Anfang 2014 hat die von AVA Biochem in Muttenz bei Basel betriebene Anlage «Biochem-1» den kommerziellen Betrieb zur industriellen Produktion von 5-HMF aufgenommen. Forschende des KIT entwickelten das entsprechende Verfahren.

Quelle: Karlsruher Institut für Technologie KIT, Chemische Produkte auf erneuerbarer Grundlage, Presseinformation Nr. 12 (2014): 3.2.2014



3.2 Kohlendioxid CO₂

Vorkommen

Kohlendioxid CO₂ kommt als Spurengas in der Atmosphäre, in grösseren Mengen gelöst in den Ozeanen und in riesigen Mengen chemisch gebunden in Mineralien wie Calzit und Dolomit vor¹. Das Vorkommen in der Atmosphäre ist das weitaus geringste. Doch die aktuelle Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist eine der Hauptursachen für den bedrohlichen Klimawandel. CO₂ wird von Pflanzen, Algen und gewissen Bakterien aufgenommen und durch Photosynthese in chemische Verbindungen wie Glukose umgewandelt (siehe Kasten auf Seite 11). Kohlendioxid kann aus der Atmosphäre in reiner Form gewonnen, unter Druck verflüssigt und problemlos transportiert und gelagert werden. Eine technische Nutzung des CO₂ in Ergänzung zum CO₂, das durch Pflanzen gebunden wird, wäre auch im Sinne des Klimaschutzes sinnvoll.

Heutige Verwendung

Kohlendioxid wird durch die Nahrungsmittelindustrie als Zusatz (kohlesäurehaltige Getränke) und als Konservierungsmittel (Schutzatmosphäre) verwendet. Es wird technisch eingesetzt als Kälte- und Löschmittel. In der Grosschemie wird es mit Ammoniak zu Harnstoff umgesetzt, welches das weltweit bedeutendste Stickstoff-Düngemittel ist. CO₂ wird auch in der chemischen Synthese eingesetzt, zum Beispiel in der Carbonsäure-Synthese nach Grignard. Die derart umgesetzten Mengen von CO₂ sind allerdings sehr gering.

Überführung in Methan

Kohlendioxid kann mit Wasserstoff in Methan überführt werden (Sabatier-Verfahren, Abbildung 2). Dazu kann CO₂ fossilen Ursprungs aus thermischen Kraftwerken oder Zementfabriken aufgefangen und umgesetzt werden. Ebenso gut kann CO₂ aus der Abluft der Ethanolproduzierenden Bioraffinerien oder das mehrheitlich biogene atmosphärische Kohlendioxid eingesetzt werden. Mit diesen Quellen ergibt sich ein effizienter Zugang zu bio-basiertem Methan.

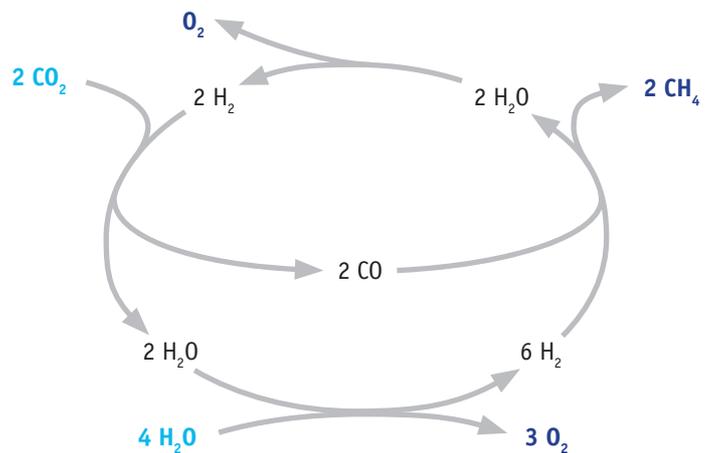


Abbildung 2: Mit dem Sabatier-Verfahren kann aus Kohlendioxid Methan, die Hauptkomponente von Erdgas, gewonnen werden. Für diese sogenannte Methanisierung wird zudem Wasserstoff benötigt. Dieser wird mittels Elektrolyse, die mit Solarstrom betrieben werden kann, aus Wasser gewonnen. So entsteht die Möglichkeit überschüssigen Solarstrom als Methan zu speichern.

Heute stellt Erdgas beziehungsweise dessen Hauptkomponente Methan die nach Erdöl wichtigste Kohlenstoffquelle für die chemische Industrie dar. Mittels Dampfreformierung wird es in Synthesegas und weiter in die Grundchemikalien Methanol, Ethanol, Dimethylether (DME) sowie Aldehyde/Alkohole und Oxygenate umgewandelt². Die Technik ist etabliert und optimiert. Anstelle von Erdgas kann zukünftig das aus biogenem CO₂ hergestellte Methan oder auch ein Methan-reiches Biogas eingespeist werden. Entscheidend für einen kommerziellen Erfolg für CO₂-basiertes Methan und andere Synthese-Grundstoffe ist eine Quelle für billigen Wasserstoff. Dieser soll in Zukunft aus überschüssigem Photovoltaik- und Windstrom durch Elektrolyse erzeugt werden. Die Verfahrensentwicklung läuft, eingebettet in Projekte zur Energiewende.

Im deutschen Projekt «Power to Gas» wird CO₂ mit elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff in Methan übergeführt und als solches gelagert³. Die Umsetzung ist Teil eines umfassenden Kreislaufes: Strom aus Photovoltaik, Wasserkraft oder Wind wird via Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff eingesetzt. Dieser wird mit CO₂ aus

Fermentationsabluft oder thermischen Kraftwerken zu Methan umgesetzt, das für weitere chemische Synthesen verwendet oder im bestehenden Gasnetz über Wochen bis Monate gelagert werden kann. Bei erhöhtem Bedarf – zum Beispiel im Winter – wird Methan zur Stromproduktion in kombinierte Wärme-Kraft-Anlagen eingespeist. Insgesamt wird aus einem Überschuss an erneuerbarem Strom und Biomasse Methan hergestellt.

Die Methode ist in Deutschland bis zu einer elektrischen Anschlussleistung von 6 MW und einer Methan-Produktion von 4000 m³ pro Tag erprobt. Ab 2017 stehen modulare Anlagen mit bis zu 20 MW Anschlussleistung zur Verfügung⁴.

In der Schweiz ist gemäss «Kraftwerk 2020» des Bundesamtes für Energie vorgesehen, die Emissionen künftiger Gaskraftwerke durch Abscheiden und Speichern von CO₂ zu vermindern⁵. Hier bieten sich Möglichkeiten zur Umwandlung und Nutzung des konzentriert anfallenden Kohlendioxids. Diskussionen dazu werden schon geführt. Eine Mitarbeit im deutschen Projekt und Adaption auf die Situation in der Schweiz ist zu empfehlen.

Neue katalytische Wege zur Aktivierung von Methan und direkten Überführung in Methanol werden derzeit untersucht. Forschende der ETH verwenden dazu Kupfer-Zeolite als Katalysatoren⁶. Auch die direkte Überführung von CO₂ in Methanol wird intensiv bearbeitet, zum Beispiel durch Reduktion von CO₂ unter Einsatz von Organokatalysatoren⁷ oder mittels Sonnenlicht-induzierter Reduktion an Kupferoxid-Nanostäben⁸.

Methan kann auch direkt in Ethan und Ethylen umgewandelt werden. Die Ausbeuten sind bislang gering; es besteht eindeutiger Forschungsbedarf⁹. Ethylen ist ein ausserordentlich wichtiger und vielseitig verwendbarer Baustein der Grosschemie. Mit einer Jahresproduktion von 115 Mio. Tonnen ist es das volumenmässig wichtigste hergestellte chemische Produkt überhaupt.

¹ Übersicht in <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid>

² KIT Karlsruhe Institute of Technology, <http://www.katalyseundmaterialien.de/english/59.php>

³ Grimm N et al., Power to Gas. Eine innovative Systemlösung auf dem Weg zur Marktreife, Deutsche Energie-Agentur GmbH (2013), www.dena.de/publikationen/energiesysteme/fachbroschuere-power-to-gas-eine-innovative-systemloesung-auf-dem-weg-zur-marktreife.html

⁴ ZSW, Fraunhofer, SolarFuel GmbH, Broschüre «Erneuerbares Methan aus Ökostrom» <http://www.google.ch/search?client=safari&rls=en&q=erneuerbares+methan+aus+ökostrom&ie=UTF-8&oe=UTF-8&gferd=cr&ei=R9XIVYnUGInL0wWwxrTQDQ B>

⁵ Bundesamt für Energie (BFE), Konzept für das Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020» (2005) Oktober. Sowie: <http://www.bfe.admin.ch/forschungskraftwerk/02352/index.html?lang=de>

⁶ Alayon EMC, Nachtegaal M, Ranocchiaro M, van Bokhoven JA, Catalytic Conversion of Methane to Methanol Using Cu-Zeolites, *Chimia* (2012) 66: 668–674

⁷ Riduan SN, Zhang Y, Ying JY, Conversion of Carbon Dioxide into Methanol with Silanes over N-Heterocyclic Carbene Catalysts, *Angew Chem Intl Ed Engl* (2009) 48(18): 3322–3325

⁸ Ghadimkhani G, de Tacconi NR, Chanmanee W, Janaky C and Rajeshwar K, Efficient solar photoelectrosynthesis of methanol from carbon dioxide using hybrid CuO–Cu₂O semiconductor nanorod arrays, *Chem Commun* (2013) 49: 1297–1299

⁹ Lunsford JH, *Catalysis Today* (1990) 6(3): 235–259

Fixierung von CO₂ durch Photosynthese

In der Photosynthese verwenden Pflanzen, Algen oder photosynthetische Bakterien die Energie des Sonnenlichts, um Kohlendioxid in chemische Verbindungen wie Glukose zu überführen. Kein anderer Prozess auf der Erde trägt so viel zum Aufbau der Biomasse bei wie die Photosynthese der Pflanzen. Chemisch betrachtet ist die Photosynthese eine Abspaltung von Wasserstoff aus Wasser unter Freisetzung von Sauerstoff. Der Wasserstoff wird auf CO₂ übertragen und dieses als komplexe Kohlenstoffverbindung fixiert.

Bei Pflanzen müssen Ansätze zur Optimierung der Photosynthese immer das biologische System als Ganzes berücksichtigen und werden durch das notwendige Zusammenspiel von Photochemie, Stoffwechsel in den Blättern und Wachstum der Pflanze kompliziert. Die Photosynthese in Bakterien ist besser geeignet zur Optimierung, da die bakteriellen Systeme einfacher kontrollierbar sind und der Wirkungsgrad der Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie höher ist. Das grüne Schwefelbakterium *Chlorobaculum tepidum* zum Beispiel wandelt etwa 10 Prozent der verfügbaren Lichtenergie in chemische Energie um, bei Pflanzen sind es etwa 5 Prozent. Der technische Aufwand zur Nutzung der bakteriellen Photosynthese ist allerdings hoch. Auch die Produktion von Wasserstoff mit Hilfe von Bakterien ist eine interessante Option.

Quellen:

Evans JR, *Improving photosynthesis*, *Plant Physiology* (2013) 162: 1780–1793

Reich PB et al., *From tropics to tundra: global convergence in plant functioning*, *PNAS* (1997) 94(25): 13730–13734

Skillman JB et al., *Photosynthetic productivity: can plants do better?* in *Thermodynamics – Systems in equilibrium and non-equilibrium*,

Moreno-Piraján JC, *InTech* (2011) chapter 3: 35–68

3.3 Biogas

Biogas ist ein brennbares Gas, das aus Biomasse mittels Vergärung hergestellt wird. Als Ausgangsmaterial werden landwirtschaftliche Abfälle, Gartenabfälle, Holzreste und Haushaltabfall verwendet. Das Gas wird meist dezentral in regionalen Biogasanlagen hergestellt. Es kann als Treibstoff, zur Erzeugung von Elektrizität, als Zusatz zu Erdgas oder als Rohstoff für die chemische Synthese verwendet werden.

Die Abfälle durchlaufen in der Biogasanlage mehrere Fermentationsstufen bis zur anaeroben Bildung von Methan. Das resultierende brennbare Gas enthält je nach eingesetztem Rohstoff zwischen 50 und 75 Prozent Methan, 19 bis 38 Prozent CO₂ und 6 Prozent Wasserdampf.

Abfälle der verarbeitenden Agroindustrie ergeben das reinste Material. Gas aus landwirtschaftlichen Abfällen kann bis zu 10 g/m³ giftigen Schwefelwasserstoff enthalten. Biogas aus Haushaltabfällen weist oft Spuren chlorierter organischer Verbindungen auf¹.

Für Heizzwecke und zur Erzeugung von Elektrizität sind bloss Trocknung und Entschwefelung notwendig. Für eine Verwendung als Biotreibstoff müssen CO₂, Wasserdampf, Schwefelwasserstoff und, wo vorhanden, organochlorierte Verbindungen entfernt werden. Die Aufreinigung wurde in Schweden industriell getestet.

Die Organisation «Biomasse Schweiz»² fördert die Nutzung von Biomasse und der daraus zugänglichen Produkte.

¹ The Biogas. http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html

² Biomasse Schweiz, <http://www.biomasseschweiz.ch/index.php/de/>



4 Veredelung der Rohstoffe

4.1 Chemische Verfahren

Biomaterialien als Ausgangsmaterialien sind mittelfristig aus der Zusammenarbeit mit der Nahrungs- und Futtermittelindustrie zu erwarten, indem kostengünstige Nebenprodukte für die chemische Umwandlung abgezweigt werden¹. Auch auf Treibstoffe ausgerichtete Bioraffinerien werden interessante Nebenprodukte liefern.

Wichtig für das Formulieren von Zukunftsinvestitionen ist die Nachhaltigkeit. Dazu gehören Gewinnung der Rohstoffe, Abfallentsorgung beziehungsweise Recycling sowie die Endlichkeit gewisser Elemente. Es hilft weder der Industrie noch der Umwelt, wenn ein chemischer Prozess in Wasser funktioniert, der Katalysator aber ein kostbares, seltenes Metall wie Rhodium oder Ruthenium ist, das sehr energieaufwändig gewonnen werden muss und am Ende nicht zu 100 Prozent zurückgewonnen werden kann.

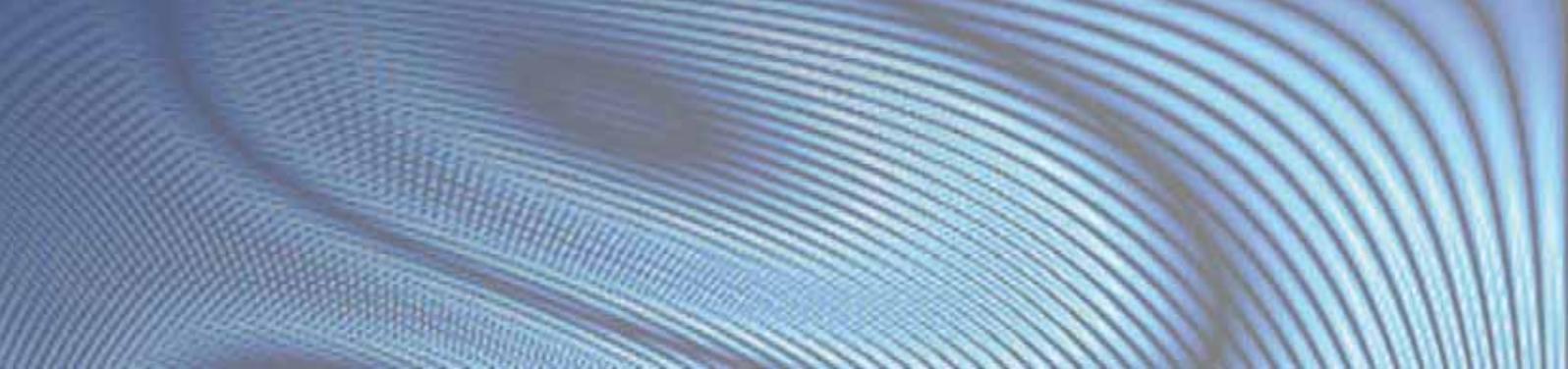
Längerfristig sollte eine integrierte Aufarbeitung von pflanzlichen Abfallstoffen verfolgt werden, die Energie, Biogas, Treibstoffe und Chemikalien liefert. Dazu brauchen wir eine neue Chemie, die auf Biomasse basiert, aber nicht den Umweg über die petrochemische Route – sprich Synthesegas, C1- bis C3-Bausteine – geht, sondern versucht, möglichst wenig an der Struktur der Biomassebestandteile zu ändern. Da das Ausgangsmaterial sehr wechselhaft beschaffen sein kann, ist eine äusserst flexible Verfahrenstechnik gefragt, die eine hohe Energie- und Ressourceneffizienz erreichen muss. Das gilt auch für die technische Mikrobiologie, in der die Isolierung und Reinigung der Produkte sehr hohe Anforderungen stellt. Daher sollten die Bioprozesswissenschaften in öffentlichen Institutionen und in der Industrie gefördert werden.

Lösungsmittel Wasser

Chemische Reaktionen werden in der Regel in Lösungsmitteln durchgeführt. Das Substrat wird dabei meist in der fünf- bis zehnfachen Menge eines Lösungsmittels wie Hexan, Aceton, Isopropanol oder auch halogenhaltige (zum Beispiel chlorierte) Verbindungen aufgelöst. Geschlossene Systeme sorgen dafür, dass die meist leichtflüchtigen Lösungsmittel nicht durch Verdampfung verloren gehen und die Umwelt direkt belasten. In der Grosschemie werden die organischen Lösungsmittel unter beträchtlichem Energieaufwand zurückgeführt; in kleineren Produktionen werden sie aufgefangen und verbrannt. Für umweltverträgliche Verfahren muss die Lösungsmittel-Situation optimiert werden. Es ist nicht einfach, diese durch andere Lösungsmittel zu ersetzen; hier besteht eindeutiger Forschungsbedarf.

Wasser ist das Lösungsmittel für alle Lebewesen. Auch für chemische Synthesereaktionen ist Wasser oft geeignet. In einer umfassenden Übersicht aus dem Jahre 2006 wird gezeigt, dass sich die meisten der zum Fundus des Synthetikers gehörenden Methoden wie Aldol-Kondensation, Wittig-Olefinsynthese und Diels-Alder-Reaktionen vorteilhaft in Wasser durchführen lassen². Für alle Enzym-katalysierten Reaktionen ist Wasser ohnehin das ideale Lösungsmittel und Metall-katalysierte Prozesse lassen sich oft auf Wasser als Lösungsmittel adaptieren. Für künftige Umsetzungen mit Biomaterialien sollte Wasser stets berücksichtigt werden, insbesondere auch mit Blick auf gemischte (enzymatische und chemische) Synthesewege.

Bei der Synthese in Wasser stellen sich aber auch neue Herausforderungen wie der enorme Aufwand, Wasser wieder zu reinigen. Prozesswasser muss durch die Abwasserreinigungsanlage entsorgt werden und die gestellten Anforderungen sind insbesondere betreffend Metalle sehr hoch. Hier besteht Bedarf nach Forschung, die parallel zur Prozessforschung betrieben werden muss.



Die technische Entwicklung der Synthese in Wasser ist wichtig. Ebenso wichtig aber ist die Entwicklung anderer Konzepte wie der lösungsmittelfreien Synthesen. Hier werden neue Techniken wie «Solid Handling» und «Milling» benötigt, die Herausforderungen sowohl auf der chemischen als auch auf der apparatetechnischen Seite bieten.

Neue Katalysatoren

Katalyse wird weiterhin eine Schlüsselrolle spielen, insbesondere bei Kohlenstoff-Kohlenstoff-Knüpfungsprozessen unter Abfallverringerung: Ziel sind neue Methoden der Aktivierung der Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindung, sodass keine problematischen Komponenten wie Halogene verwendet werden müssen.

Sehr wichtig sind neue Katalysatorsysteme, die ohne Edelmetalle auskommen und stattdessen mit gut verfügbaren Elementen wie Eisen und Nickel arbeiten. Heterogene Katalyse ist eine wichtige Technik, die eine Abtrennung von Katalysatoren vom Reaktionsgemisch erleichtert und somit das Recycling von Lösungsmitteln und nicht verbrauchtem Ausgangsmaterial ermöglicht.

In einem aktuellen Positionspapier für die niederländische Regierung wird auf die Schlüsselrolle der Kataly-

se im Streben nach vermehrter Nutzung von Biorohstoffen für die Chemie hingewiesen³.

Biotechnologie und Chemie kombinieren

Die Kombination von Biotechnologie und Chemie wird in der effizienten Nutzung von Biomaterialien sicher eine Schlüsselrolle spielen in der Art, dass zwei Prozess-Schritte, ein biotechnischer und ein chemischer im Eintopfverfahren, das heisst ohne Abtrennung von Katalysator und Lösungsmittel und ohne Zwischenaufreinigung, kombiniert werden können. Hierbei spielen Immobilisierung von Enzymen und heterogene Katalyse Schlüsselrollen. Wasser als Lösungsmittel eröffnet die Möglichkeit, eine Vielzahl von Enzymen einzusetzen⁴.

In der technischen Umsetzung der Chemie von Biomaterialien sollten neue Anlagenkonzepte wie Flow-Chemistry, Mikroreaktoren und modulare Anlagen eine wichtige Rolle spielen.

Eine gesamtheitliche Betrachtung setzt eine enge, multidisziplinäre Zusammenarbeit voraus. Erfolgsfaktoren sind weniger technischer oder wissenschaftlicher Natur, sondern kommunikativer. Multidisziplinäre Projekte wie etwa das Nationale Forschungsprogramm Holz⁵ können eine Vorreiterrolle spielen.

¹ Rohstoffbasis im Wandel. Positionspapier DECHEMA. Frankfurt, Januar 2010

² Chao-Jun Li and Liang Chen, Organic Chemistry in Water, Chem. Soc. Rev., 2006, 35, 68–82

³ Catalysis – Key to a Sustainable Future. The Dutch Ministry of Economic Affairs. The Hague, January 2015

⁴ Harald Gröger und Werner Hummel, Current Opinion in Chemical Biology 2014, 19:171–179

⁵ NFP Ressource Holz. <http://www.nfp66.ch/E/Pages/home.aspx>



4.2 Mikrobielle Verfahren und Säugetierzellen

Mikrobielle Methoden – oft als Fermentation bezeichnet – dienen seit Jahrtausenden der Herstellung von Lebensmitteln wie Wein, Bier, Essig, Sauerkraut oder Joghurt. Die Vergärung ermöglicht eine Stabilisierung und Konservierung von frischen oder verderblichen Lebensmitteln. Dabei werden energiereiche Inhaltsstoffe wie Zucker verbraucht und teilweise in die stabilisierenden Substanzen Ethanol (Wein, Bier), Essigsäure (Essig) und Milchsäure (Sauerkraut, Joghurt) umgewandelt.

In den letzten 100 Jahren haben wir gelernt, aus Naturprodukten oder daraus isolierten Reinsubstanzen wie Stärke, Saccharose und Glukose mittels Fermentation eine breite Palette von Produkten für die Human- und Tierernährung sowie für technische Applikationen herzustellen.

In der Fermentation nehmen **Substanzen des Primärstoffwechsels** eine besondere Stellung ein, weil für deren Produktion schon alles im Organismus vorhanden ist. Gewisse Organismen sind auch auf die Überproduktion einer bestimmten Substanz ausgerichtet. Aus den Wildtypen lassen sich zudem durch klassische Mutation und Selektion verbesserte Stämme für die technische Produktion entwickeln. Schliesslich können mit den Methoden der Gentechnik gezielte Strategien zur Erzeugung eines stabilen überproduzierenden Stammes verfolgt werden. Das Ziel – Plattformchemikalien unabhängig von Erdöl mikrobiell herzustellen, um daraus die gewünschten Produkte zu synthetisieren – kann also durch gezielte Optimierung des bestehenden mikrobiellen Grundstoffwechsels erreicht werden.

Kleine organische Moleküle wie Antibiotika und gewisse Vitamine werden häufig halbsynthetisch hergestellt; ein Anteil des Kohlenstoffgerüsts wird aus der Natur oder Fermentation bezogen und mittels Chemie oder Einsatz von Enzymen weiter verarbeitet.

Primärmetaboliten

Durch die fortschreitende Industrialisierung der Mikrobiologie und Biotechnologie wurden bedeutende Produktgruppen zugänglich¹. So insbesondere die in den Genen programmierten Biosynthesen zu den Primärmetaboliten: Aminosäuren, Nucleotide, Vitamine, organische Säuren und Alkohole.

Mikrobielle Verfahren sind zur Herstellung kommerzieller Produkte im grossen Massstab bis zu mehreren Millionen Jahrestonnen etabliert. Ein wichtiges Beispiel sind **Aminosäuren für Lebens- und Futtermittel** wie Glutaminsäure (1,6 Mio. Tonnen pro Jahr) oder L-Lysin (850'000 Tonnen pro Jahr). Der Marktwert der beiden Aminosäuren liegt je bei 1,5 Mrd. USD.

Interessante Primärmetaboliten sind auch die **Vitamine**. Als essentielle Nährstoffe werden sie in der menschlichen und tierischen Ernährung eingesetzt. Der Markt wächst und sollte im Jahre 2017 etwa 3,2 Milliarden USD erreichen². Vitamine werden durch chemische Synthese, Fermentation oder Extraktion hergestellt. Durch chemische Synthese werden die Vitamine A, D, B1, B3 (Niacin), B5 (Panthotensäure), B6, B7 (Biotin), B9 (Folsäure), E und K gewonnen. Durch Fermentation produziert werden die Vitamine B2 und B12. In der Vitamin-C-Produktion kommen fermentative und chemische Schritte zum Einsatz.



Im Gebiet der Primärmetaboliten der **Nucleotid-Klasse** sind zwei Substanzen, Guanylsäure und Inosinsäure, als Geschmacksverstärker etabliert. Sie haben je einen Marktwert von 350 Mio. USD. Beide werden schon jetzt mikrobiell hergestellt.

Organische Säuren zählen zu den grosstechnischen Produkten unter den Primärmetaboliten: Zitronensäure, Essigsäure, Milchsäure, Gluconsäure und Itaconsäure werden aus Melasse oder Glucose fermentiert und in der Nahrungsmittelindustrie, der Pharmaindustrie und im Technikbereich eingesetzt. Chemisch hergestellt werden Apfelsäure, Weinsäure, Brenztraubensäure und Bernsteinsäure. Diese letzteren organischen Säuren sind somit interessante Kandidaten für Fermentationsprozesse.

Alkohole sind die Primärmetaboliten schlechthin für den Ersatz von Erdöl. Der Zusatz von Ethanol zu Treibstoffen ist in den USA Pflicht. Seine Herstellung beansprucht beträchtliche Getreidemengen. Die Verwendung als Treibstoff wird teilweise staatlich gefördert, damit der Preis im Vergleich zu fossilen Treibstoffen überhaupt konkurrenzfähig ist. Aktuell werden grosse Anstrengungen unternommen, um Benzin-Ersatzstoffe aus den nicht als Nahrungsmittel verwendbaren Rohmaterialien Stroh, Maisstroh und Spindeln sowie Bagasse (faserige Überreste aus der Zuckerproduktion) herzustellen. Bei der fermentativen Gewinnung von Ethanol und höheren Alkoholen werden weitere interessante Primärmetaboliten anfallen, die für neue Zwecke verfügbar sein werden. Die Tonnagen von Nebenprodukten sollten trotz der erreichten hohen (95%) Selektivität für Ethanol beträchtlich sein. So kann bei der fermentativen Herstellung von Ethanol zum Beispiel eine Ko-Produktion von Milchsäure einen ökonomischen Vorteil bringen. Butanol hat ein interessantes Potential als Ersatz von Benzin und Kerosin, da sein Energiegehalt um ein Drittel

höher ist als der des Ethanols und es sich mit Verbrennungsmotoren sehr gut verträgt. Im Falle einer grosstechnischen Herstellung sind auch hier interessante Begleit-Produkte der Fermentation zu erwarten.

Polysaccharide stellen eine weitere Klasse von primären Metaboliten mit bedeutendem kommerziellem Potential dar. Xanthan, das als Verdickungsmittel in der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie verwendet wird, erreicht mit einer Produktion von 30'000 Tonnen pro Jahr heute einen Marktwert von über 400 Mio. USD.

Mikrobielle Herstellung von therapeutischen Proteinen

Die Bedeutung der biologischen Produkte unter den Pharmazeutika hat enorm zugenommen und den führenden Firmen entsprechend hohes Wachstum und ausgezeichnete Profitabilität gebracht. Während für die Herstellung gewisser Proteine am Anfang auch Tiere wichtig waren, erfolgt sie heute durch Fermentation und Zellkulturen. Zwei der global führenden Firmen, Roche und Novartis, haben ihren Hauptsitz in der Schweiz und betreiben dort und im benachbarten Ausland auch die Produktion. Mit den veredelten Produkten, den Arzneimitteln, werden Jahresumsätze erzielt, die in die Milliarden Schweizer Franken gehen.

Wegen der geringen Mengen an benötigter Substanz sind diese Produkte zwar kein zentraler Faktor bei der Ressourcen-Problematik. Aber sie sind Fermentationsprodukte und als solche aus erneuerbaren Materialien hergestellt, und dieses Prinzip lässt sich womöglich für die Herstellung weiterer Produkte verwenden. Bedeutender ist wohl der Standort-Entscheid, mit dem ein grosses Vertrauen ins Umfeld demonstriert wird. Wissen, Technik und Praxis gehören dazu und diese finden sich an Universitäten und in Unternehmen.

Neue mikrobielle Verfahren

Es gibt zahlreiche Forschungsmeldungen über neue Produkte, Polymere, Proteine sowie über alternative Verfahren: Scheper und Wagemann³ sehen eine vermehrte Anwendung von metabolischem Engineering und Synthetischer Biologie zur Herstellung wertvoller Substanzen. Sameera bietet einen Überblick über neue biotechnische Methoden zur Herstellung von Enzymen, Polysacchariden und organischen Säuren⁴. Erickson, Nelson und Winters stellen neue biotechnische und bio-

katalytische Verfahren vor und zeigen eine Liste von Materialien, die demnächst industriell verfügbar sein sollen (Isopren, Isobutanol, Bernsteinsäure, 1,4-Butandiol, Essigsäure)⁵. Jang et al. beschreiben die fermentative Herstellung von Butanol aus Biomasse mit transformierten Clostridium-Stämmen⁶. Thakker et al. berichten über die fermentative Herstellung von Bernsteinsäure aus Biomasse mit transformierten E.-coli-Stämmen⁷. Neu im Interesse steht das in Bakterien produzierte Isobuten, das für vielfältige Synthesen eingesetzt werden kann.

¹ Demain AL, The Business of Biotechnology, *Industrial Biotechnology* (2007) 3(3): 269–283

² Global Industry Analysts (GIA), *Global Vitamins Market* (2011) November 22

³ Scheper T, Wagemann K, *Bio-Technologien ebnen den Weg zur Bioökonomie* (2012). http://www.dechema.de/biotech_publicationen/_/transkript_spezial.pdf

⁴ Sameera V, *Novel Techniques in the Production of Industrially Imperative Products*, *J Microbial Biochem Technology* (2011) R 1:003

⁵ Erickson B, Nelson JE and Winters P, *Perspective on Opportunities in Industrial Biotechnology in Renewable Chemicals*, *Biotechnol J* (2012) 7: 176–185

⁶ Jang YS et al, *Biotechnology J* (2012) 7: 186–198

⁷ Thakker C et al, *Biotechnology J* (2012) 7: 213–224



4.3 Pflanzen und Pflanzenzellkulturen

Pflanzen werden seit Jahrhunderten nicht nur als Lebens- und Futtermittel eingesetzt, sondern auch als Lieferanten verschiedenster Chemikalien und Heilmittel verwendet. Neuerdings werden pharmazeutische Wirkstoffe in Pflanzen hergestellt, die durch molekularbiologische oder konventionelle Methoden gezüchtet worden sind. Die Mengen sind allerdings gering, dafür ist eine hohe Wertschöpfung möglich. Pflanzengenetik, gleichgültig ob mit molekularen oder traditionellen Methoden durchgeführt, kann beigezogen werden, um bestimmte Pflanzen für die Synthese gewisser Stoffe geeigneter zu machen. So konnte beispielsweise in Pappeln das Verhältnis von Zellulose zu Lignin erhöht werden. Diese Verschiebung ist für die Papierindustrie vorteilhaft, weil Zellulose das Zielprodukt darstellt und Lignin überwiegend als Abfall gilt¹.

Fasern wie Baumwolle, Sisal oder Flachs werden aus landwirtschaftlichen Nutzpflanzen gewonnen und können synthetische Kunststofffasern wie Nylon allenfalls ersetzen. Beim Anbau dieser Pflanzen sollten aber immer auch die Fragen gestellt werden, wie nachhaltig der Anbau ist und ob die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion nicht zu gross ist.

Die meiste weltweit produzierte Baumwolle wird heute aus transgenen Baumwollpflanzen gewonnen, die gegen Schadinsekten eine weitgehende Resistenz aufweisen. Konventionelle Baumwolle erfordert häufige, etwa wöchentliche Insektizid-Behandlungen. Der Anbau von transgener Baumwolle vermindert den Aufwand der Bauern und erlaubt es, den Einsatz von Insektiziden und den Treibstoffverbrauch bei der Feldarbeit zu vermindern, wodurch fossile Ressourcen eingespart werden. Der Erfolg wurde von Agrarökonomen der Universität Göttingen in

Indien überprüft. Diese Studie hat gezeigt, dass der Gewinn der Landwirte mit solchen Pflanzen im Durchschnitt über 60 Prozent höher ausfällt.

Synthetische Süsstoffe wie Aspartam können durch Glykoside der Pflanze *Stevia ribaudiana* ersetzt werden. Extrakte aus *Stevia* sind in mehreren Ländern als Süsstoffe für Getränke zugelassen. Einzelne Komponenten von *Stevia* können in Bioreaktoren mikrobiell hergestellt werden. Süsstoffe (ohne Zucker) haben einen Marktwert von rund 4 Mia. USD.

Der Aromastoff Vanillin ist ein pflanzliches Produkt mit hoher Wertschöpfung. Natürliches Vanillin besteht aus mehreren Komponenten und wird durch Extraktion aus der Orchidee *Vanilla planifolia* gewonnen. Das meiste für Lebensmittel hergestellte Vanillin wird nach einem alten Verfahren chemisch-synthetisch aus Erdölderivaten und Lignin produziert. Der globale Umsatz beider Arten von Vanillin beläuft sich auf rund 600 Mio. USD. Eine biosynthetische Herstellung von Vanillin in Bioreaktoren mit pflanzlichen Zellkulturen ist gelungen, das Produkt ist aber noch zu teuer, um rentabel zu sein. Schon lange werden aus Pflanzen diverse Wirkstoffe und Pharmazeutika isoliert und chemisch angereichert. Neuerdings dienen auch transgene Pflanzen der Herstellung von Wirkstoffen: Anfang 2012 ist in den USA das erste Medikament aus transgenen pflanzlichen Zellkulturen für die klinische Anwendung zugelassen worden. Es ist ein Enzym zur Behandlung der seltenen Stoffwechselkrankheit Morbus Gaucher. Pflanzliche Zellkulturen beherbergen und übertragen keine menschlichen Viren, ein wesentlicher Vorteil gegenüber tierischen oder menschlichen Zellkulturen. Weitere Wirkstoffe sind zurzeit in der klinischen Erprobung: Insulin aus transgener Färberdistel und eine spezifische Lipase aus transgenem Mais².

¹ SATW, Nutzpflanzen: Quelle für erneuerbare Rohstoffe, SATW-Broschüre (2010)

² Hoffmann-Sommergruber K und Dorsch-Häsler K, Medical issues related to genetically modified plants of relevance to Switzerland, Hochschulverlag ETHZ, NFP59 (2012): 9



4.4 Algenkulturen

Algen sind in der Natur weit verbreitet, werden technisch aber kaum genutzt. Da sie wie Landpflanzen CO_2 aus der Atmosphäre fixieren, sind Algenkulturen attraktiv, um Kohlenstoff aus der Atmosphäre in die Lebenskreisläufe zurückzubringen. Doch es gilt noch grosse Probleme zu lösen. Zum Beispiel Stickstoff und Phosphor: Die beiden für das Wachstum wichtigen Elemente sind nach der Wachstumsphase mehrheitlich im Innern der Zellen gebunden und müssen herausgelöst werden, damit sie wieder als Dünger zur Verfügung stehen können. Weltweit wird viel in Forschung und Entwicklung von so genannten Mikroalgen investiert, vor allem in einzellige Algen, um damit Energieträger und Chemikalien zu produzieren. Manche Algenarten produzieren ausgehend von CO_2 direkt grosse Mengen Öle und Fette.

Typen von Algenkulturen

Tausende Arten von Mikroalgen sind bekannt, einige wenige werden intensiv studiert, etwa Chlorella, Chlamydomonas oder Spirulina. Im Labor lassen sich diese Algen ähnlich wie Bakterien züchten, das heisst in Nährlösungen und auf Nährböden, meist bei intensiver Beleuchtung. Unter idealen Wachstumsbedingungen besteht etwa die Hälfte der Trockenmasse aus diversen Ölen und Fetten.

Die meisten grosstechnischen Algenkulturen werden nicht in geschlossenen Photobioreaktoren gehalten, sondern in offenen «Rennbahnen» (raceway ponds), da der Unterhalt weniger aufwändig ist. Die geschlossenen Bioreaktoren sind wie Fermenter komplexe, kostspielige Anlagen mit Regulation der Belichtung, Temperatur, Begasung, Flüssigkeitszusammensetzung, Zellenwachstum und vielem mehr, während die Rennbahnen einfache mit Folien abgedeckte Gräben mit einer 20–40 Zentimeter tiefen Algensuspension und Rührwerken sind.

Mit der Grünalge Chlorella soll eine geschätzte Jahresmenge an Öl von 100'000 Liter pro Hektare Rennbahnfläche erreichbar sein, während Ölpflanzen im Feld zwischen 1000 und 3000 Liter pro Hektare im Jahr hergeben sollen¹.

Mikroalgen in der Schweiz

Die Fachstelle Bioprozesstechnologie an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW strebt eine breite Palette von Produkten und Verfahren mit Mikroalgen an. So werden diese als Produktionssysteme für zahlreiche hochwertige Produkte diskutiert, zum Beispiel für ungesättigte Fettsäuren, Pigmente, Antioxidantien oder Vitamine. Die Ölbildung erfordert in vielen Algen eine hohe Konzentration von CO_2 . Dieses könnte aus Kehrlichtverbrennungsanlagen, Gaskraftwerken, Zementfabriken oder anderen Anlagen stammen.

Wirtschaftliche Faktoren

Die Herstellungskosten von Öl aus Biomasse von Algen werden höher sein als jene für Öl aus Pflanzen². Das bedeutet, dass Algen vorerst nur für die Herstellung besonders teurer Substanzen in Frage kommen, für welche die Produktion mit Algen einen neuen und auch günstigeren Weg bieten kann. Pro Jahr werden mehrere 10'000 Tonnen getrocknete Algenprodukte gehandelt: Lebensmittel und Lebensmittelzusätze, Futtermittel, Kosmetika oder Futter für Aquakulturen wie Aquarienfische. In diesen Bereichen sind die Mengen gering und die Preise hoch³.

Die synthetische Biologie könnte eine Optimierung der Algen ermöglichen. Die Arbeitsgruppe um den US-amerikanischen Forscher Craig Venter sieht in der synthetischen Biologie gar das wichtigste zukünftige Arbeitsinstrument für die Entwicklung der Algen Genetik⁴. Sein Projekt zum Studium der Ölproduktion in Algen wird von der Firma Exxon mit mehreren hundert Millionen USD unterstützt.

¹ <http://openwetware.org/images/f/fe/CuelloIBE08b.pdf>

² Rathledge C, Are algal oils realistic options for biofuels? *European Journal of Lipid Science and Technology* (2011): 113: 135–136

³ Bächtle C, Mikroalgen können mehr als Sprit produzieren, *Chemie Extra* (2013) 4: 14–15

⁴ Craig Venter, Vortrag bei Novartis in Basel vom 29.1.2013



Polylaktat-Fabrik der Firma «NatureWorks» in Blair, Nebraska, USA (Bild zur Verfügung gestellt durch NatureWorks LLC)

5 Bioraffinerien

Raffinerien sind umfangreiche technische Anlagen, die einen Rohstoff in verschiedene Komponenten auftrennen und weiterverarbeiten. So trennen Erdölraffinerien Erdöl in verschiedene Fraktionen auf, die anschliessend zu Benzin, Diesel, Heizöl und einer grossen Zahl von organischen Verbindungen weiterverarbeitet werden. Daraus wiederum werden Plastik, waschaktive Substanzen, Farben, Lacke, Medikamente und vieles mehr hergestellt.

Bioraffinerien verwenden verschiedene organische Biomaterialien als Rohstoff. Als Ausgangsmaterialien kommen alle pflanzlichen Ressourcen in Frage, die Kohlenstoff enthalten, zum Beispiel in Form von Zucker, Stärke, Zellulose, Ölen und Fetten. Rohstoffe der ersten Generation umfassen vor allem essbare oder als Futtermittel verwendbare Pflanzenteile wie Maiskörner. Zu den Rohstoffen der zweiten Generation gehören auch Zellulose enthaltende Pflanzenteile wie Holzabfälle, Gras, landwirtschaftliche Nebenprodukte und Nahrungsmittelreste. Die Verfahren zur Verwertung der biogenen Rohstoffe der zweiten Generation müssen aber noch optimiert werden, damit sie industriell genutzt werden können.

Demonstrationsanlagen von Bioraffinerien

Relativ einfache Demonstrationsanlagen von Bioraffinerien befinden sich an verschiedenen Orten der Welt in der Entwicklung. Fermentieranlagen wie Brauereien oder Käseereien können als spezialisierte Bioraffinerien angesehen werden. In allen zukunftsorientierten Bioraffinerien stehen Holz und landwirtschaftliche Nebenprodukte, die nicht der Ernährung dienen, im Zentrum des Interesses. Je nach regionaler Land- und Forstwirtschaft kommen noch weitere Produkte als Ausgangsmaterialien in Frage. Die komplexen Biomaterialien werden in ihre Bausteine zerlegt und als kleinmolekulare Verbindungen weiterverarbeitet.

In Zentraleuropa sind Buchen und Pappeln als Lieferanten von Holzschnitzeln von zentralem Interesse. Buchen sind weit verbreitet und Pappeln sind schnellwüchsig. Zudem ist ihre Biologie gut erforscht, etwa im Bereich der pflanzlichen Molekularbiologie, der Züchtung und der Genetik. Aus den Bausteinen des Holzes und anderer Biomaterialien und aus Nahrungsmittelabfällen kann in Bioraffinerien eine grosse Palette von Kohlenstoff enthaltenden Materialien mit sehr verschiedenartigen Zweckbestimmungen hergestellt werden. Für die meisten Anlagen ist zu erwarten, dass sie in weit überwiegender Menge Energieträger synthetisieren werden, so zum Beispiel die Treibstoffe Ethanol und Diesel. Jedoch sind heutige Bioraffinerien für Biotreibstoffe noch selten wirtschaftlich erfolgreich.

Der vorliegende Text soll jedoch nicht weiter auf die Energieträger eingehen, sondern ausschliesslich die stoffliche Nutzung von abgeleiteten, nachwachsenden Stoffen behandeln. Durch den enzymatischen Abbau von Holz entstehen verschiedene Zucker und andere kleine organische Moleküle, die ihrerseits als Ausgangsmaterialien (Plattformchemikalien) für diverse stoff-

Erneuerbare Rohstoffe

- Holzabfälle
- Gras
- Landwirtschaftliche Nebenprodukte
- Nahrungsmittelreste

Bioraffinerien

Energie, Chemikalien

Fossile Rohstoffe

- Erdöl

Erdölraffinerien

Energie, Chemikalien

Abbildung 3: Vergleich zwischen künftigen Bioraffinerien und existierenden Erdölraffinerien: Beide stellen Energie und Chemikalien bereit, jedoch aus unterschiedlichen Rohstoffen.

liche Synthesen dienen können. Neben dem enzymatischen Abbau sind auch andere Abbauarten möglich, insbesondere solche, die zu C1-Verbindungen führen, also Molekülen mit nur einem Kohlenstoffatom. Durch Pyrolyse, Torrefizierung und andere aus der Kohlechemie bekannte Verfahren wie BtL (Biomass to Liquid) werden Methanol und Methan gebildet, die wie Synthesegas und Biogas als Ausgangsmaterialien für stoffliche Synthesen dienen können.

Zahlreiche Anlagen in Bau

Im Sommer 2012 berichtete die US-amerikanische Biotechnology Industry Organization BIO von rund 20 im Bau befindlichen Produktionsanlagen in den USA, von denen die meisten allerdings dereinst nur Energieträger, insbesondere Ethanol, herstellen werden¹. Andere Anlagen sind auf Kunststoffe und Plattformchemikalien ausgerichtet. Bioraffinerien könnten laut dem US-amerikanischen Department of Energy folgende Chemikalien herstellen: Bernsteinsäure, Fumarsäure, Apfelsäure, Lävulinsäure, 2-5 Dicarboxylfuran und Sorbitol². Schon seit mehreren Jahren produziert die US-Firma NatureWorks aus Agrarprodukten, insbesondere Mais, den Kunststoff Polylaktat (siehe Kasten unten). Aus dem Polymer werden biologisch abbaubare Gebrauchsgegenstände wie Löffel, Becher etc. hergestellt.

In Frankreich entsteht in der Nähe von Reims, in Pomacle-Bazancourt, ein agro-industrieller Komplex, in dem Energieträger und Chemikalien aus Landwirtschaftsprodukten hergestellt werden sollen³. Die französische Regierung und die EU Kommission haben mehrere hundert Mio. Euro in dieses Projekt investiert. Hier werden jährlich 2 Mio. Tonnen Zuckerrüben und 1 Mio. Tonnen Getreide verarbeitet.

Über die Situation in Deutschland gibt die «Roadmap Bioraffinerien», die im Jahre 2012 von der Bundesregierung publiziert wurde, einen breiten Überblick⁴. Die grösste und wichtigste Anlage entsteht in Leuna (Sachsen-Anhalt) und heisst Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP. Das CBP wird als ein Katalysator auf dem Wege zu einer biobasierten Wirtschaft in Deutschland gesehen. An verschiedenen Orten sollen insgesamt sieben Bioraffinerien entstehen, die zusammen 2,7 Mio. Tonnen Biomasse pro Jahr verarbeiten⁵.

In Österreich (Utzenaich) wird eine experimentelle Anlage betrieben, die auf Grünsilage basiert und pro Stunde etwa 100 Kilogramm Milchsäure und etwas mehr als 100 Kilogramm Rohprotein produziert. In der Schweiz wird dem Thema Bioraffinerien noch kaum Beachtung geschenkt.

¹ www.bio.org/articles/visible-progress-biorefinery-commercialization

² Leopoldina, Bioenergy, chances and limits (2012): 51

³ <http://bourse.lefigaro.fr/devises-matieres-premieres/actu-conseils/la-france-veut-devenir-championne-de-la-bioraffinerie-293854>

⁴ BMELV Deutschland, Roadmap Bioraffinerien (2012)

⁵ Chemie Extra (2012) 1–2

Polylaktat ist der weltweit am meisten eingesetzte Biokunststoff

- 2 Mio. Tonnen Polylaktat pro Jahr werden produziert.
- Der grösste Produzent von Polylaktat ist die US-amerikanische Firma «NatureWorks». Sie produziert 150'000 Tonnen Polylaktat pro Jahr, verwendet vor allem Maiskörner als Rohstoffe und gehört zu den internationalen Konzernen Cargill (Lebens- und Futtermittel, USA) und PTT Global Chemical (Petrochemie, Thailand).
- Die Firma PURAC (Niederlande) plant zusammen mit Sulzer (Schweiz) in Thailand eine Fabrik mit einer Kapazität von 75'000 Tonnen Polylaktat pro Jahr.



6 Feststellungen

Der aktuelle Ölpreis macht den Ersatz von fossilen durch erneuerbare Ausgangsstoffe nicht dringlich, aber aufgrund der Endlichkeit der Ressource wird der Ersatz irgendwann zwingend sein. Wie schnell dies der Fall sein wird, hängt vor allem von der Entwicklung des Weltenergieverbrauchs ab, da fossile Rohstoffe vor allem als Energieträger genutzt werden. Sich jetzt schon mit erneuerbaren Rohstoffen zu befassen und Forschung und Entwicklung zu starten und zu intensivieren, bietet eine grosse Chance für den Standort Schweiz. Dank der Hochschulen, bereits bestehender Infrastruktur und der angesiedelten Industrie ist die Ausgangslage trotz harten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gut.

Für die Industrie in der Schweiz sind diejenigen Produkte attraktiv, die eine hohe Wertschöpfung erlauben oder nur schwer mit anderen Methoden hergestellt werden können. Attraktiv sind auch neue Produkte mit einzigartigen Eigenschaften oder der Ersatz von fossil-basierten Produkten, deren Herstellung ein hohes Optimierungspotential aufweist. Zudem können Verfahren problemlos auch an anderen Standorten verwendet werden. Deshalb sollten wir nicht nur auf die schweizerische Rohstoffbasis, sondern auch auf den Forschungsstandort Schweiz fokussieren.

Ausgangsmaterialien

Für die Schweiz sind Holz und Pflanzenreste die am besten geeignete Bioressource. Bioraffinerien sollten auf diese Ressource ausgerichtet werden. Neue Schnittstellen sind erforderlich, damit biogene Rohstoffe beziehungsweise daraus gewonnene Zwischenprodukte in etablierte grosstechnische Prozesse eingeschleust werden können.

Idealerweise wird die Biomasse so genutzt, wie sie ist, oder möglichst direkt in die gewünschten Produkte umgewandelt. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Holz als Baumaterial. Auch für die chemische Nutzung ist es sinnvoll, nicht um jeden Preis die Erdölchemie mit Bioressourcen nachahmen zu wollen. Prozesse, die auf dem kürzesten Weg zum gewünschten Produkt führen, sind zu bevorzugen. Dieses Vorgehen wird aber nicht für alle Anwendungen möglich und sinnvoll sein. Auch der Weg über Plattformchemikalien ist deshalb weiterzufolgen.

Verfahren

Mit neuen technischen Verfahren sollen die biogenen Ressourcen stofflich und energetisch möglichst effizient aufgearbeitet werden. Dies bedingt entsprechende Techniken (Fermentationstechnik, Gentechnik, synthetische Biologie, homogene und heterogene Katalyse). Wir sollten diese Techniken in der Schweiz entwickeln und entweder die Produktion in preislich günstigen Ländern etablieren (allenfalls durch Lizenzvergabe) oder hochwertige Produkte in der Schweiz herstellen oder importierte Biostoffe in der Schweiz veredeln.

Multifunktionale industrielle Bioraffinerien sind weltweit noch nirgends operativ, werden aber in verschiedenen Ländern geplant und pilotiert. In der Schweiz werden erst Konzepte entwickelt. Als Outputs von Bioraffinerien kommen diverse Plattformchemikalien in Betracht, die für weiterführende Synthesen gebraucht werden können. Statt Massenchemikalien sollten bevorzugt solche mit hoher Wertschöpfung hergestellt werden.



Besondere Chancen für biobasierte Produkte in der Schweiz sind

- Nebenprodukte aus Bioraffinerien oder der Bioenergiegewinnung, die veredelt werden können,
- Produkte mit grosser Wertschöpfung, zum Beispiel Biologika oder Vorstufen für die Pharma- und Kosmetikindustrie,
- Biologisch abbaubare Pflanzenschutzmittel, Schmierstoffe oder Polymere.

Herausforderungen

Die Wirtschaftlichkeit von in langjähriger Erfahrung und im Grossmassstab etablierten petrochemischen Verfahren ist nur schwer zu übertreffen. Der aktuelle Preis von fossilen Rohstoffen erlaubt nach wie vor ein tiefes Preisniveau der fossil basierten Produkte.

Oft benötigen chemische oder biochemische Prozesse, die auf nachwachsenden Rohstoffen aufbauen, mehr Energie als konventionelle Prozesse. Daher sollte vor Einführung der neuen Verfahren stets zur Abschätzung der Umweltlasten ein Life Cycle Assessment (LCA) durchgeführt werden.

Potenzielle Ängste der Konsumenten, zum Beispiel wegen allfällig schlechter Qualität von Produkten, die aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten produziert wurden, oder weil die Produkte aus gentechnisch veränderten Pflanzen als unnatürlich und daher riskant wahrgenommen werden, müssen ernst genommen werden.

Fazit

In der Schweiz fallen drei biogene Rohstoffe an, nämlich Biomasse, Abfälle und Kohlendioxid, die als Basis für die Herstellung von Produkten dienen können. Die Frage ist, welche Voraussetzungen erfüllt sein oder geschaffen werden müssen, damit sich biogene Rohstoffe im Sinne einer Kreislaufwirtschaft in die Wertschöpfungsketten einer Wirtschaft einbinden lassen, die zunehmend von High- und Medium-High-Tech-Branchen geprägt ist und Produkte mit hoher Wertschöpfung herstellt.

Neue Erkenntnisse und Praktiken aus den folgenden Forschungsgebieten können einen Brückenschlag katalysieren:

- Herstellung von vielseitig verwendbaren Plattformchemikalien aus erneuerbaren Rohstoffen
- Bioraffinerien, die biogene Rohstoffe in biotechnischen Prozessen verwenden, können biogen erzeugte Substanzen in etablierte (chemische) grosstechnische Prozesse einbringen («Neue Schnittstellen», Drop-in)
- Optimierung von Fermentationsreaktionen und -prozessen. Biotechnische Reaktionen und Prozesse, die einzelne Prozessstufen konventioneller, chemischer Prozesse ersetzen (zum Beispiel für Aroma- und Riechstoffe, Agrochemikalien)
- Biobasierte, gut abbaubare Produkte wie Verpackungsmaterialien
- Entwicklung robuster Prozesse für die Aufarbeitung der biogenen Ressourcen (zum Beispiel Holz), die deren Nutzung trotz variabler Qualität und inhomogener Zusammensetzung ermöglichen. Forschung und Entwicklung zu Methoden der Aufarbeitung und Isolierung der biogenen Materialien
- Genetische und physiologische Pflanzenforschung, um die genetische Vielfalt zu evaluieren und wichtige Merkmale für die Züchtung zu identifizieren («Pre-breeding»). Integration phänotypischer, physiologischer und genetischer Informationen zur Züchtung von Pflanzensorten, die als Bioressourcen geeignet sind.

SATW Geschäftsstelle

Gerbergasse 5

CH-8001 Zürich

Telefon +41 (0)44 226 50 11

info@satw.ch

www.satw.ch

Autoren: Richard Braun, Kaspar Eigenmann, Daniel Gygax, Ulla Létinois, Adrian Rüeegg, Christian Suter

Redaktion: Beatrice Huber, Serge Kocher

Chefredaktor: Andreas Zuberbühler

Bilder: Fotolia, Eva Decker (via Wikipedia, Seite 16), JanB46 (via Wikipedia, Seite 19), NatureWorks LLC (Seite 20)

1. Auflage, November 2015

Empfehlungen

1. Um erneuerbare Biomaterialien effizient zu nutzen, sind Bioraffinerien DIE Verbundinstrumente. **Es ist deshalb für die Schweiz erstrebenswert, sich mit dem Thema Bioraffinerien auseinanderzusetzen und Forschung und Industrie auf diesem Gebiet zu aktivieren.** Im europäischen Ausland sind Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Bioraffinerien bereits weit fortgeschritten. **Die internationale Zusammenarbeit auf diesem Gebiet muss gefördert werden.**
2. Um die Nutzung der Biomasse für die Chemie attraktiv zu machen, ist die **Entwicklung einer auf Wasser als Lösungsmittel basierten Chemie zu initiieren.** Die Durchführung von chemischen Reaktionen in wässrigen Medien muss als Erweiterung zu den bestehenden Synthese-Optionen verstanden werden. Diese Chemie bringt eine Reihe von Vorteilen bezüglich Kosten, Sicherheit und Umwelt. Die Integration von Chemie und Biotechnologie wird dadurch einfacher (Chemo-enzymatische Reaktionen).
3. Kohlendioxid wird fast ausschliesslich als Schadstoff beziehungsweise Abfall wahrgenommen. In einer Kreislaufwirtschaft hat das Kohlendioxid aber auch die Rolle eines Rohstoffs. Die wohl erprobteste Assimilation des Kohlendioxids erfolgt durch die Photosynthese in Pflanzen, Algen und Mikroorganismen. Das Erarbeiten von Wissen und Praktiken zur **Effizienzsteigerung dieser biologischen Assimilation von Kohlendioxid, aber auch zur Etablierung neuer Verfahren für die Bindung von Kohlendioxid soll gefördert werden.**
4. Für die Schweiz stellt der Verkauf von wissenschaftlich-technischem Know-how (Patente, Lizenzen) eine grosse Chance dar. Aus diesem Grund ist der Forschung dringend nahezulegen, nicht nur auf Produkte und Prozesse zu fokussieren, die mit der Rohstoffbasis und den Kosten in der Schweiz attraktiv sind, sondern auch **generell geistiges Eigentum zu entwickeln.**

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences



Mitglied der
Akademien der Wissenschaften Schweiz