

Wie aus „Bio“ Chemie wird

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe wird die Volkswirtschaften in den nächsten Jahren verändern. Gewinnen werden nur die Wirtschaftsräume, die rechtzeitig die Entwicklung von biobasierten industriellen Produkten und Bioraffinerien fördern. Während in den USA Chemie, Biotechnologie und Landwirtschaft vielerorts schon Hand in Hand gehen, fällt in Deutschland das Umdenken noch schwer.

◆ Ein nachhaltiges ökonomisches Wachstum erfordert dauerhafte Rohstoffressourcen für die industrielle Produktion, ein langfristiges Investitions- und Finanzvertrauen in die Wirtschaft, ökologische Sicherheit sowie zuverlässige und langfristige Lebens- und Erwerbsmöglichkeiten der Bevölkerung.

Die fossile Rohstoffbasis mit Erdöl, Erdgas und Kohle ist weder langfristig sicher noch nachhaltig und zum Teil schon heute nicht einmal mehr ökonomisch sinnvoll. Einen zukunftsweisenden Ausweg bietet die schrittweise Umstellung von großen Teilen der Volkswirtschaft zu einer nachhaltigen Biomassewirtschaft mit den tragenden Säulen Bioener-

gie, Biokraftstoffe und biobasierte Produkte (Abbildung 1).

Während sich die Energiewirtschaft auf alternative Quellen wie Wind, Sonne, Erdwärme, Wasser, Biomasse sowie – wenn gesellschaftskonform – auf Kernspaltung und Kernfusion stützen kann, sind stoffwandelnde Industrien wie die chemische Industrie und die industrielle Biotechnologie, aber auch eine nachhaltige und mit Stoffwandlung gekoppelte Kraftstoffproduktion, im Wesentlichen auf die Biomasse als Alternative angewiesen.

Rohstoff Biomasse

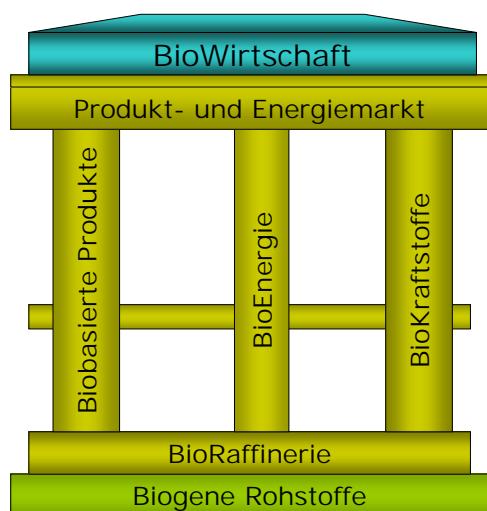
◆ Die Natur ist eine sich ständig erneuernde Fabrikationsstätte für Chemikalien, Kraftstoffe, Kosmetika und Pharmazeutika. Aus der Photosynthese ist dazu ausreichend Biomasse vorhanden. Die industrielle Umwandlung von Rohstoffen aus der Agrar- und Forstwirtschaft sowie der Landschaftspflege steckt dagegen noch in den Anfängen. Die Herstellung werthaltiger Produkte wie Chemikalien, Biopolymere, Kraft- und Schmierstoffe, Werkstoffe und Gebrauchsgüter verlangt grundsätzlich neue Basistechnologien, die weit über die Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen zu Spanplatten und Gartenartikeln hinausgehen.

Damit aus „Bio“ Chemie wird¹⁾ – dazu bedarf es komplexer Technologien, der Bioraffinerien. Je nach Rohstoff und Ziel werden beispielsweise Lignocellulose-Feedstock (LCF)-Bioraffinerie, Ethanol-orientated Biorefinery oder grüne Bioraffinerie unterschieden. Eine LCF-Bioraffinerie richtet z. B. ihre primären Konversionsprozesse auf den Rohstoff Lignocellulose aus. Darunter fallen Holz, Stroh, getrocknete Gräser oder kommunale Abfälle (Abbildung 2).

Biomasse ist wie Erdöl komplex zusammengesetzt. Ihre primäre Auftrennung in einzelne Hauptgruppen von Stoffen ist zweckmäßig. Deren Verarbeitung wiederum führt zu einer ganzen Palette von Produkten. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass Erdöl, das überwiegend aus Kohlenwasserstoffen besteht, extraktiv aus der Natur gewonnen wird, während Biomasse zumeist Produkt einer landwirtschaftlichen oder forstwirtschaftlichen Stoffwandlung ist und noch die direkte Syntheseleistung der Natur enthält.

Biomasse hat jedoch ein gänzlich anderes C-H-O-N-Verhältnis als Erdöl. So spielen die sauerstoffhaltigen Kohlenhydrate und insbesondere die Zucker – dazu gehören Glucose, Fructose, Xylose, Arabinose und Sucrose – sowie Stärke eine beson-

Abb. 1.
Drei-Säulen-Modell
einer zukünftigen
biobasierten Wirtschaft.



dere Rolle im Konzept der biobasierenden industriellen Produkte. Kohlenhydrate deshalb, weil die Biomasse über ihre Gesamtheit gerechnet zu 75% aus Kohlenhydraten besteht.

Von Bedeutung wird es sein, inwieweit es gelingt, biobasierte Building Blocks (mehrfach funktionalisierte molekulare Bausteine) biotechnisch oder chemisch zu produzieren, die anschließend in eine Vielzahl von hochwertigen Chemikalien und Materialien konvertiert werden können. Ein Beispiel ist die Produktlinie: Cellulose, Lignocellulose oder stärkehaltige Biomasse → Zucker (Plattform) → Milchsäure (Building Block) → Polymilchsäure (Material). Zu den stickstoffhaltigen Building Blocks gehören die Aminosäuren Lysin, Asparaginsäure, Glutaminsäure sowie Threonin.

Weltweit sind aktuell Bemühungen im Gange, u. a. durch Rasterung des Leistungsvermögens (Potential Screening) industriell machbare biobasierte sowie „stammbaumfähige“ Building Blocks, die sich baukastenartig kombinieren lassen, ausfindig zu machen. Solche recht aufwendigen Bewertungen sind vor allem auch vom Wunsch geprägt, bereits im Vorfeld eine chemische Logik sowie energetische und ökonomische Effizienz in den Pool der potentiellen biobasierten Basischemikalien und biobasierten Produktstammbäume einbringen zu können.

Die heutigen, auf fossilen Brennstoffen basierenden (industriellen) Grundchemikalien und weite Teile der Sekundärprodukte folgen nur zum Teil den Kriterien einer idealen Synthese wie Atom- und Energieeffizienz oder Ressourcen- und Umweltfreundlichkeit. Solche historisch bedingten Fehler pflanzen sich dann auch durch alle klassisch-chemischen Stammbäume fort. (Gleichwohl wird oftmals verkannt, dass sich die chemische Industrie große Verdienste als Reststoffverwerter der Energie- und Kraftstoffindustrie erworben hat. Sei es bei der Nutzung der Abfallprodukte der Kohleindustrie wie Steinkohleteer oder heute des Naphtha der Erdölwirtschaft.)

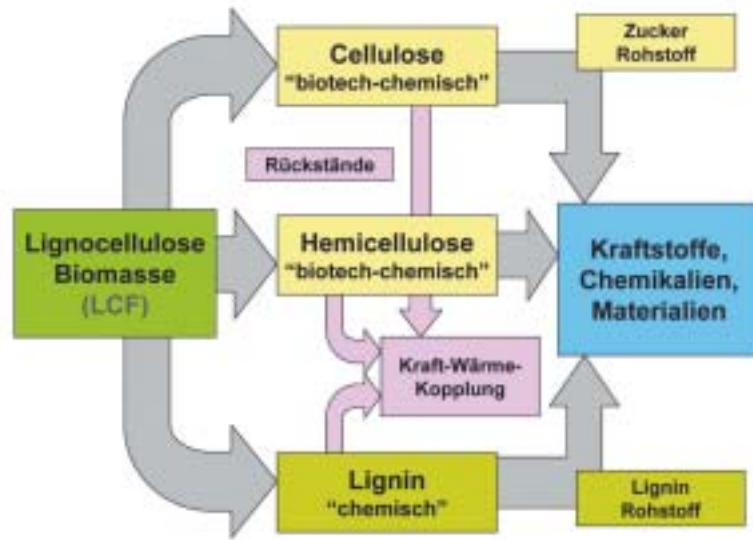


Abb. 2. *Prinzipalskizze einer Bioraffinerie auf Basis von lignocellulosehaltiger Biomasse.²⁾*

Mit dem Konzept der Biowirtschaft hat heute die Chemie (in enger Zusammenarbeit mit der Biologie und Biotechnologie) die einmalige Chance, ihr tatsächliches Wissen einzubringen, um zukünftige Grundprodukte und Produktstammbäume von Beginn an zu gestalten.

Eine Top-Liste potentieller biobasierter Basischemikalien hat kürzlich das US-Department for Energy durch das Pacific Northwest National Laboratory und das National Renewable Energy Laboratory (NREL) vorgelegt.²⁾

Als Matrix der Untersuchung wurden die Biomasse-Hauptbestandteile Kohlenhydrate (Hemicellulose, Cellulose, Stärke), Lignin, Öle und Proteine einer Produktlinie gegenübergestellt, die folgende Stufen umfasst: Biomasse (Hauptbestandteil) →

Plattform (z. B. Zucker oder Syngas) → Building Blocks (Grundprodukte/ Basischemikalien) → sekundäre Chemikalien/Sekundärprodukte → Zwischenprodukte → Produkte/Anwendungen.

Ca. 300 biobasierte Chemikalien aus Industrie und Anwendung, aus der angewandten Forschung und Entwicklung, der Grundlagenforschung sowie der chemischen Logik wurden in die Untersuchungen einbezogen.

Nach Unterteilung der Building Blocks in acht Gruppen (Syngas und C₁-Chemikalien, C₂-, C₃-, C₄-, C₅-, C₆-Chemikalien, Aromaten sowie direkte Polymere und Gummi) bewerteten die Institute nach folgenden Kriterien:

- Rückführung zu welcher Plattform (z. B. Zucker oder Syngas) und Einschätzung der Effizienz,

Abb. 3. *Prinzip einer Bioraffinerie: Bereitstellung von Grundstoffen durch Fraktionierung für die Entwicklung industriell tragfähiger Produktstammbäume.*

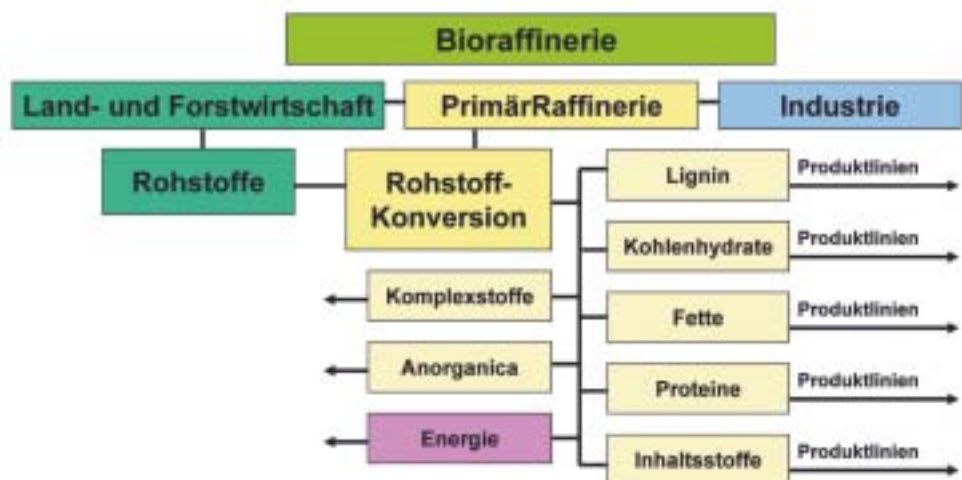


Abb 4.
Teilansicht der Cargill-Dow-Polylactid-Anlage in Blair, Nebraska, USA. (Mit freundlicher Genehmigung von Cargill Dow LLC)



- Bewertung des Eingangs und der Effizienz in die acht Building Blocks; chemische Funktionalität (z.B. einfach oder mehrfach funktionalisiert),
- Zahl und Zugang möglicher chemischer und biotechnischer Folgeprodukte (Stammbaumfähigkeit),
- wenn vorhanden, die gegenwärtige Nutzung und das Potenzial,
- Stand der Forschung und Erfolgsaussichten,
- die Beziehung zur Chemie fossiler Brennstoffe sowie
- Abschätzung des allgemeinen Marktpotenzials als auch des Potenzials als „Super Commodity“ (Basischemikalie mit potenzieller Mehrmillionen-Tonnage).

Die Untersuchung scheint von weitestgehender Objektivität und nachvollziehbarer Systematisierung geprägt zu sein. Eine erste Bewertung zählt 30 Basischemikalien auf. In den Top 12 sind folgende Building Blocks: 1,4-Dicarbonsäuren (Bernsteinsäure, Fumarsäure und Äpfelsäure), 2,5-Furandicarbonsäure, 3-Hydroxypropionsäure, Asparaginsäure, Zuckersäure, Glutaminsäure, Itaconsäure, Lävulinsäure, 3-Hydroxybutyrolacton, Glycerin, Sorbitol, Xylitol/Arabit.

Pflanzliche Biomassen enthalten immer die Grundprodukte Kohlenhydrate, Lignin, Proteine und Fette. Dazu kommen Inhaltsstoffe wie Vitamine, Farbstoffe, Geschmacks-

und Geruchsstoffe der unterschiedlichsten chemischen Struktur. Bio-raffinerien kombinieren die notwendigen Technologien zwischen den biologischen Rohmaterialien und den industriellen Zwischen- und Endprodukten³⁾ (Abbildung 3).

Von der Chemie lernen

◆ Die Petrochemie hat gelernt, aus Erdöl einfach zu handhabende und definierte, chemisch reine Grundstoffe in Raffinerien zu erzeugen. Diese Kenntnisse waren der Schlüssel zum Erfolg, ohne den es weder Kunststoffe noch zigtausend andere Produkte der Chemie gegeben hätte, die unser Lebensumfeld prägen.

Im Hinblick auf die Erhaltung des Lebensstandards unserer wie nachfolgender Generationen wird es eine wichtige Aufgabe sein, das Funktionsprinzip der Erdölraffinerien auf Biomasse verarbeitende Bioraffinerien zu übertragen. Diese nutzen dann in großer Menge verfügbare nachwachsende Rohstoffe sowie Rest- und Abfallstoffe der Agro- und Lebensmittelproduktion. Die biotechnische Stoffwandlung wird hier – neben der chemischen – eine bedeutende Rolle spielen können und müssen.

Motor USA

◆ Die USA treiben momentan die Umstellung auf eine Biomassewirtschaft massiv voran. Bis zum Jahre

2030 sollen 25 % der derzeit auf fossilen Rohstoffen basierenden organischen Grundstoffe (Basiswert 1994) und 10 % der Öle und Kraftstoffe auf eine biologische Rohstoffbasis umgestellt und vorrangig mit Bioraffinerie-Technologien produziert werden. Eine Biobasis für 25 % des gesamten Chemiestocks ist eine riesige Aufgabe, das wirtschaftliche Potenzial gigantisch: Die chemische Industrie ist, global betrachtet, ein Unternehmen mit 1,5-Billionen US-\$ Umsatz und weit über 70 000 Produkten.

Auch die Potenziale in Deutschland sind enorm. So liegt Deutschlands chemische Industrie mit einem Umsatz von mehr als 136 Mrd. Euro und rund 464 000 Beschäftigten (Daten 2003, ohne ausländische Töchter⁴⁾) auf Platz drei hinter den USA und Japan, noch vor der Volksrepublik China, und ist in Europa unangefochten die Nummer eins.

Legislative und Exekutive arbeiten in den USA bereits eng mit Landwirtschaft, Industrie und Wissenschaft zusammen. Nach dem Regierungsprogramm „Biobased Industrial Products“ aus dem Jahre 2000 haben mehr als 40 Bundesstaaten eigene Programme aufgenommen. Ziele und Förderaufgaben sind benannt und bereits in Umsetzung. Verbände von Chemie und Biotechnologie wie die American Chemical Society (ACS) bzw. die Biotechnological Industrial Organisation (BIO)

◆ Initiativen zur Förderung einer biobasierten Stoffwirtschaft

BioVision 2030: In Deutschland hat sich eine Initiativgruppe „Bio-basierte industrielle Produkte“ aus Industrie, kleinen und mittelständischen Unternehmen sowie von Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen zusammengefunden (BioVision2030-Group mit Dow Deutschland, Rheinmünster, Dow Europe, Horgen, Schweiz; biorefinery.de, Potsdam; FraunhoferICT Pfinztal, biopos, Teltow-Seehof) und ein Strategiepapier „BioVison 2030“ entwickelt (www.biorefinica.de/bibliothek). Das Strategiepapier wird derzeit der Öffentlichkeit präsentiert und ist auch Vorlage für die Diskussionen der Regierungsparteien im Deutschen Bundestag für den Parlamentsantrag: „Rahmenbedingungen für die industrielle stoffliche Nutzung von Nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland schaffen“.

Biorefinica 2004: Ende Oktober 2004 fand in der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück, die Biorefinica 2004 statt. Das Symposium zur nachhaltigen industriellen und industrienahen stofflichen Nutzung biogener Rohstoffe in Bioraffinerien stand unter der Federführung von DBU, GDCh, Dechema sowie biopos; Sponsoren waren BASF und Degussa. Neben einer Bestandsaufnahme

deutscher Aktivitäten zu biobasierten Produkten und Bioraffinerien suchte das Symposium in einer Podiumsdiskussion auch den Dialog mit Wissenschaft, Politik und Wirtschaft über Chancen und Erfordernisse einer nachhaltigen biobasierten Stoffwirtschaft im europäischen Raum (www.biorefinica.de, dort auch CD mit Unterlagen und Vorträgen zur Tagung (ISBN 3-00-015166-4).

Advisor Committee „Biorefinery“: Im Nachgang zur Biorefinica 2004 wurde beschlossen, eine Strategiegruppe „Biobasierte industrielle Produkte, Prozesse und Bioraffinerien“ zu installieren. Bereitschaft zur Mitarbeit haben signalisiert: die chemische Industrie (BASF, Degussa, Dow Deutschland), Organisationsen wie die GDCh, die Dechema, die DBU, der Deutsche Bauernverband, die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, die Interessensgemeinschaft Biologisch abbaubare Werkstoffe, der VCI, Forschungs- und Entwicklungsinstitute wie biopos, Fraunhofer-ICT, Universitäten und Fachhochschulen, sowie Vertreter der Politik und Bundesministerien. Eine zentrale Aufgabe soll die Erarbeitung einer „Roadmap“ für Deutschland sein.

Kontakt: Maximilian Hempel, DBU, m.hempel@dbu.de, oder Birgit Kamm, biopos, kamm@biopos.de

Brandenburger Innovationsnetzwerk „Bioraffinerien und Biobasierte Industrielle Produkte“: Das Forschungsinstitut biopos plant gemeinsam mit der Zukunftsagentur Brandenburg, der biorefinery.de, der Industrie- und Handelskammer Potsdam, der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus und dem Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim ein Innovationsforum unter Beteiligung der chemischen Industrie, um die Region und darüber hinaus insbesondere die ostdeutschen Regionen für einen Wachstumskern „Bioraffinerien“ zu qualifizieren.

Biorefineries – Biorefinery, Biobased Industrial Processes and Products: Wiley-VCH verlegt 2005 das erste Buch einer Serie zu biobasierten industriellen Prozessen und Produkten. Der erste Band *Status Quo and Future Directions* widmet sich mit Originalbeiträgen aus Industrie sowie Forschung und Entwicklung einer Bestandsaufnahme der internationalen Bioraffinerie-Aktivitäten und den Potentialen einer biobasierten Industrie (ISBN 3-527-31027-4; www.wiley-vch.de/home/pass)



Auf dem Biorefinica-Podium, v. l.: Thomas Hirth (Fraunhofer-ICT), Birgit Kamm (biopos), Maximilian Hempel (DBU), Jöran Reske (IBAW, Interseroh), Rainer Busch (Dow), Wolfgang Leuchtenberger (Degussa).

arbeiten eng zusammen. An der New Yorker Börse haben Diskussionen zum Handel begonnen. Die Zeitschrift *Economist* setzt sich regelmäßig mit dieser Entwicklung auseinander. Zunehmend werden US-Unternehmen an den Aktienmärkten auch auf der Basis ihrer Performance im Sektor Nachhaltigkeit bewertet (Dow Jones Global Sustainability Index). Nicht zuletzt hat sich die US-Großindustrie, u. a. mit Dow Chemical, E. I. du Pont de Nemours und Genencor International im Oktober 2002 mit einer eigenen Vision⁵⁾ und entsprechender Roadmap⁶⁾ positiv zur Biomasse-Industrie positioniert.

Chemie, Biotechnologie und Landwirtschaft – miteinander

◆ Ein industrieller Leuchtturm der jungen „Biobased Industry“ ist das amerikanische Unternehmen Cargill Dow LLC. Seit zwei Jahren stellt das Joint Venture aus dem amerikanischen Chemieunternehmen Dow Chemical und dem Agro- und Lebensmittelkonzern Cargill aus Mais Biokunststoffe her, die sich zu Plastikverpackungen, Folien und sogar T-Shirts verarbeiten lassen. Rund 140 000 Tonnen Biokunststoff kann die Anlage in Blair, Nebraska, und Teil einer geplanten komplexen Bioraffinerie jährlich herstellen. Dazu wird die Maisstärke biotechnisch zu Glucose abgebaut, fermentativ in Milchsäure verwandelt und anschließend chemisch zu Polymilchsäure (PLA, Polylactid Acid; Abbildung 4) verarbeitet, einem Polymer, das thermoplastisch und spinnbar ist. Für atmungsaktive Kleidung aus PLA wurde vor allem in Südostasien der Markt geöffnet. In Deutschland ist seit kurzer Zeit Bettwäsche aus PLA-Fasern auf dem Markt.

Wo bleibt Deutschland?

◆ Trotz Einzelprogrammen von Bundesregierung und Europäischer Union zur Forcierung der Nutzung nicht fossiler Rohstoffquellen werden nachwachsende Rohstoffe in

Deutschland noch nicht in dem Umfang genutzt, wie es ihrem riesigen Potenzial angemessen wäre. Damit sind ganze Industriezweige wie die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie sowie die klein- und mittelständischen Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes zugunsten einer reinen Energie- und Kraftstoffwirtschaft zurückgestellt. Um nicht weiter ins Hintertreffen zu geraten und die nachhaltige Produktion materieller Güter zu fördern, sind eine ganze Reihe von Initiativen mit Aktivitäten auf allen Ebenen ins Leben gerufen worden (siehe Kasten auf S. 133). Bleibt zu hoffen, dass die guten Potenziale der deutschen chemischen und biotechnischen Industrie sowie der Forschungslandschaft genutzt werden, um diese Entwicklungen in Europa und weltweit mit zu bestimmen.

*Rainer Busch, Dow Deutschland,
Rheinmünster*

*Thomas Hirth, Fraunhofer-ICT,
Pfinztal*

*Birgit Kamm, biopos, Teltow-Seehof
Michael Kamm, biorefinery.de,
Potsdam*

*Johan Thoen, Dow Europe,
Horgen, Schweiz
kamm@biopos.de*

- 1) Titel der GDCh-Pressemitteilung 56/04 zur Biorefinica 2004, Symposium über biobasierte Produkte und Bioraffinerien, 12. 10. 2004.
- 2) Top Value Added Chemicals from Biomass (Hrsg.: T. Werpy, G. Petersen), U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, DOE/GO-102004-1992, August 2004, www.osti.gov/bridge.
- 3) „Principles of Biorefineries.“ B. Kamm, M. Kamm, Appl. Microbiol. Biotechnol. 2004, 64, 137–145.
- 4) Jahresbericht Verband der Chemischen Industrie, Frankfurt 2004, www.vci.de.
- 5) Biomass R&D, Technical Advisory Committee, Vision for Bioenergy & Biobased Products in the United States, Oct. 2002, Washington D.C., www.bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/BioVision_03_Web.pdf.
- 6) Biomass R&D, Technical Advisory Committee, Roadmap for Biomass Technologies in the United States, Dec. 2002, Washington D.C., www.bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/FinalBiomassRoadmap.pdf.



Rainer Busch, Jahrgang 1952, promovierte 1984 in organischer Chemie in Saarbrücken. Seit 1985 ist er bei Dow Chemical beschäftigt. Heute ist er bei Dow Deutschland im Forschungsbereich External Technology Europe für den deutschsprachigen Teil Europas verantwortlich.



Thomas Hirth studierte Chemie in Karlsruhe. Nach der Promotion 1992 nahm er eine Tätigkeit bei der Fraunhofer-Gesellschaft auf. Seit 1995 leitet er den Produktbereich Umwelt-Engineering am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie. Seit 1994 ist er Lehrbeauftragter, seit 2003 Honorarprofessor.



Birgit Kamm, Jahrgang 1962, promovierte 1991 in organischer Chemie in Merseburg. Ihr Habilitationsverfahren wurde 2004 eröffnet. Seit 2001 ist sie wissenschaftliche Direktorin des Forschungsinstitutes biopos. Arbeitsgebiete: Bioraffinerien, bioaktive Substanzen und bioabbaubare Materialien.



Michael Kamm, Jahrgang 1961, studierte organische Chemie in Merseburg. Nach wissenschaftlicher Aspirantur in Halle-Wittenberg wechselte er zur Universität Potsdam, gründete biopos mit und beschäftigt sich seitdem mit der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Seit Gründung der biorefinery.de (2001) ist er deren Geschäftsführer.



Johan Thoen erhielt den M. Sc. in Organischer Chemie und den Ph. D. in Polymerchemie an der Universität Leuven in Belgien (1975). Er trat im Jahr 1976 in die Dow Chemical Company ein. Derzeit ist er Senior Scientist in Dow Europe mit der Hauptverantwortung bei den Grundlagen der Katalysatorforschung und der Technologie der Materialentwicklung.