

# **Biobasierte Industrielle Produkte und Bioraffinerie-Systeme — Ein Weg in die industrielle Zukunft des 21. Jahrhunderts?**

Birgit Kamm\* und Michael Kamm

## **Einleitung**

Die Erhaltung und Bewirtschaftung der Ressourcen ist ein wesentlicher Politikbereich einer umweltverträglichen, nachhaltigen Entwicklung, der mit der Agenda 21 als Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert von mehr als 170 Staaten im Juni 1992 in Rio de Janeiro verabschiedet wurde.

Dies beinhaltet neue Lösungen zu suchen, um den derzeitigen Prozess des rasanten Verbrauchs an fossilen, nicht erneuerbaren Ressourcen (Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineralien) zu entschleunigen. Wesentlich wird dabei sein, inwieweit es gelingt, die derzeitige auf fossilen Rohstoffen basierende Produktion von Waren und Dienstleistungen schrittweise auf eine auf biologischen Rohstoffen basierende industrielle Produktion von Waren und Dienstleistungen umzustellen.

International einig ist man sich darin, dass von dieser Umstellung die Weiterentwicklung der menschlichen Zivilisation und die Weltökonomie abhängig sein werden. Ein nachhaltiges ökonomisches Wachstum erfordert sichere, nachhaltige Rohstoffressourcen für die industrielle Produktion. Der heutige vorherrschende industrielle Rohstoff Erdöl ist weder nachhaltig, da endlich, noch umweltfreundlich. Die Umstellung ganzer Volkswirtschaften auf biologische Rohstoffe als Wertschöpfungsquelle erfordert jedoch ganz neue Ansätze in Forschung und Entwicklung. Zum einen kommen den Biologischen und Chemischen Wissenschaften eine führende Rolle bei der Formierung der Zukunftsindustrien des 21. Jh. zu. Zum anderen müssen neue Wege des Zusammenwirkens der biologischen, physikalischen, chemischen und technischen Wissenschaften erarbeitet und gefunden werden. Und dies muss im Verbund mit neuen Verkehrstechnologien, Medien- und Informationstechnologien, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften umgesetzt werden.

## **Ausgangssituation**

Die Dimension des potentiellen Einflusses dieser grundlegenden Veränderung der Rohstoffbasis der Industrie auf die Wirtschaft ist riesig. Die fossilen Kohlenstoffträger Erdöl und Erdgas sollen durch einen erneuerbaren, die Biomasse (hauptsächlich die pflanzliche Biomasse), abgelöst werden. Die Produkte aus letzterer werden „biobased products - Biobasierte Produkte und/oder Bioprodukte“ bzw. „bioenergy - Bioenergie“ genannt. Als grundlegende Basistechnologie wird mit der Einführung von „biorefineries- Bioraffinerien“ gerechnet, welche als neue Produktionsstätten die konventionellen erdölbasierten Raffinerien verdrängen sollen. Sogar das Wort „bioeconomy- Biowirtschaft“ wird verwendet.

Während forschungs- und entwicklungsseitig auf dem jungen Arbeitsgebiet der „biorefinery system research“ - Bioraffinerie-Systemforschung, vor allem auch in Europa und Deutschland bereits beträchtliche Entwicklungen und Erfolge zu verzeichnen sind [1-2], haben großindustrielle Entwicklungen erst im Jahre 2000 durch Aktivitäten von Präsident [4] und Kongress [5] der USA einen wesentlichen Schub erfahren [3-5].

In den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) wird bis zum Jahre 2020 erwartet, dass 25% der derzeitigen fossil-basierten organischen Grundstoffe (Basis-Wert 1995) und 10% der Öle und Kraftstoffe auf eine biologische Rohstoffbasis umgestellt und mittels Bioraffinerie-Technologien produziert werden. Voraussichtlich ist damit der nationale Eigenbedarf der USA zu 90% an organischen Grundstoffen und 50% an organischen Ölen und Kraftstoffen gedeckt. Dies bedeutet eine weitestgehende Unabhängigkeit des U.S.-Grundstoffmarktes. Die Ent-



Dieses Paradoxon löst sich auf einer weiteren Ebene auf, wenn

- die gegenwärtige Weltwirtschaftslage auch als eine beginnende Technologie- und Produktionskrise gesehen wird. Geht man davon aus, dass die Produktion materieller Güter und deren Tausch auch weiterhin eine wesentliche Grundlage der menschlichen Zivilisation bilden, wird ersichtlich, dass mit einer alleinigen Forcierung von Informationstechnologien (IT-Industry) und einer Gesundheitsindustrie diese Grundlage nicht abgesichert werden kann. In den USA werden mit der Entwicklung von „Biobased Industrial Products and Bio-refineries“ ein technologischer und produktiver Aufschwung erwartet, vergleichbar mit dem „den Amerika (für das Flugwesen) hatte, als es fliegen lernte“ [10, 11]. So wird diese Technologieentwicklung auch als „A Vision to Enhance U.S. Economic Security“ betrachtet [12, 3]. Folgerichtig ist es Ziel der Vereinigten Staaten, eine Weltführerschaft auf diesem Technologiesektor zu erreichen [3].
- der Erhalt des urbanen, ländlichen Raumes und der Erwerbs- und Lebensfähigkeit der Bewohner (Landwirte, Bauern und deren Familien) auch in den hochentwickelten Industrienationen als unverzichtbar für das zivilisatorische Leben und Gleichgewicht bewertet wird [12, 13]. Die Schaffung von Arbeit und Profit für Farmer durch das Entwicklungsprogramm „Biobased Industrial Products“ wird letztendlich in den Vereinigten Staaten so auch als ein Act zur Wahrung der „Internal Security- Innere Sicherheit“ gesehen [3].

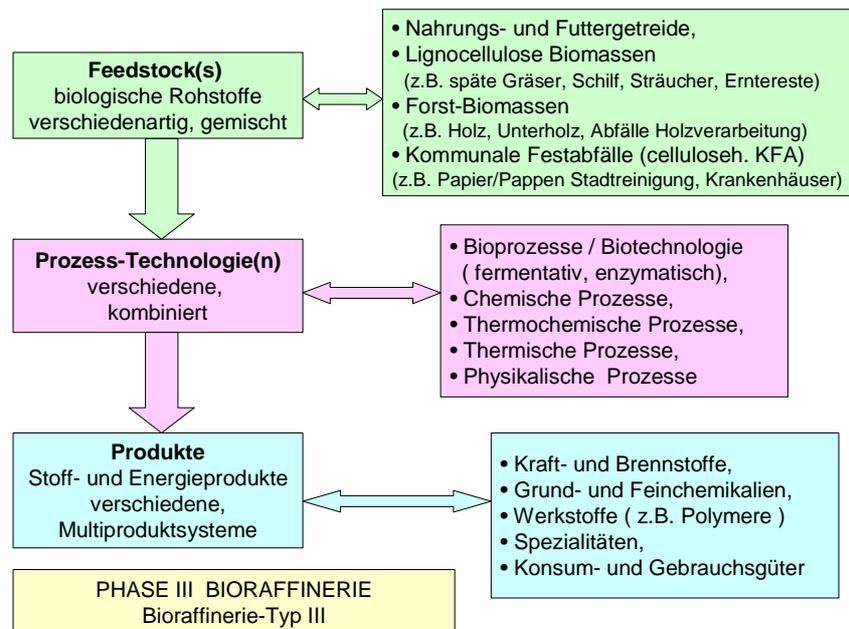


Abb. 2: Grundprinzipien einer Bioraffinerie (Phase III /Typ III-Bioraffinerie)

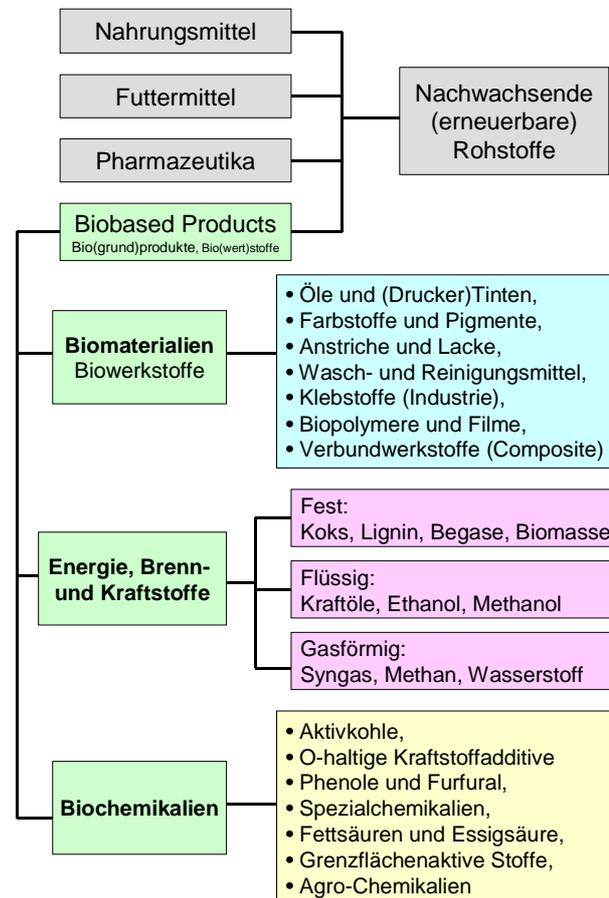
## Ein kurzer Rückblick

Arbeiten an Bioraffinerie-Konzepten, d.h. zunächst die Fraktionierung von Biomasse in Anlehnung an die Physiologie und biologisch-chemische Vielfalt der Inhaltsstoffe und entsprechende Nutzung und Verarbeitung der so erhaltenen Fraktionen, gab es schon lange, bevor der Name Bioraffinerie (biorefinery) etwa ab der Mitte der 80ziger Jahre des 20. Jahrhunderts in der Fachwelt auftauchte.

Weltweit verbreitet ist die Erzeugung cellulose-, stärke-, zucker- und ölreicher Pflanzen. Entsprechende Verarbeitungsprozesse sind in komplexen, dafür angepassten Fabrikationsanlagen etabliert worden, z.B. in den Zellstoffwerken, Stärke- und Zuckerfabriken und Ölmühlen. Ihre Organisationsform ähnelt der einer Raffinerie. Auch haben bestimmte Verarbeitungslinien



Die Mehrzahl der biologischen Rohstoffe werden in der Landwirtschaft, der Waldwirtschaft und durch mikrobielle Systeme produziert. Waldbaupflanzen sind ein hervorragender Rohstoff für die Papier- und Pappenindustrie, die Bauwirtschaft und die chemische Industrie. Ackerfrüchte bilden einen organisch-chemischen Pool, aus welchem Kraft- und Brennstoffe, Chemikalien und Chemieprodukte sowie Biomaterialien (**Abb. 4**, [14]) produziert werden können. Abfallbiomassen sowie Biomassen der Natur- und Landschaftspflege sind wertvolle organische Rohstoffreservoirs und entsprechend ihrer organischen Zusammensetzung zu nutzen. Im Zuge der Entwicklung von Bioaffineriesystemen wird der Begriff Abfallbiomasse mittelfristig veralten.



**Abb. 4:** Gegenwärtig hergestellte Produkte bzw. Produktklassen auf Basis biologischer Rohstoffe

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 extraktiv aus der Natur gewonnen wird, während Biomasse bereits ein Produkt, und zwar das eines zumeist landwirtschaftlichen Stoffwandlungsprozesses ist. Biomasse kann also im Verlaufe ihrer Herstellung bereits so modifiziert werden, dass sie dem Zweck der nachfolgenden Verarbeitung angepasst ist, bestimmte gewünschte Hauptprodukte vorgebildet worden sind. Man hat für diese den Begriff "precursors - Präkursoren" übernommen [7].

Pflanzliche Biomassen weisen immer die Grundprodukte Kohlenhydrate, Lignin, Proteine und Fette auf. Daneben diverse Inhaltstoffe wie Vitamine, Farbstoffe, Geschmacks- und Geruchsstoffe der unterschiedlichsten chemischen Struktur. Biomasse-Präkursoren wären beispielsweise: Cellulose, Stärke, Öle, weißes Protein etc. (**Abb. 5**).

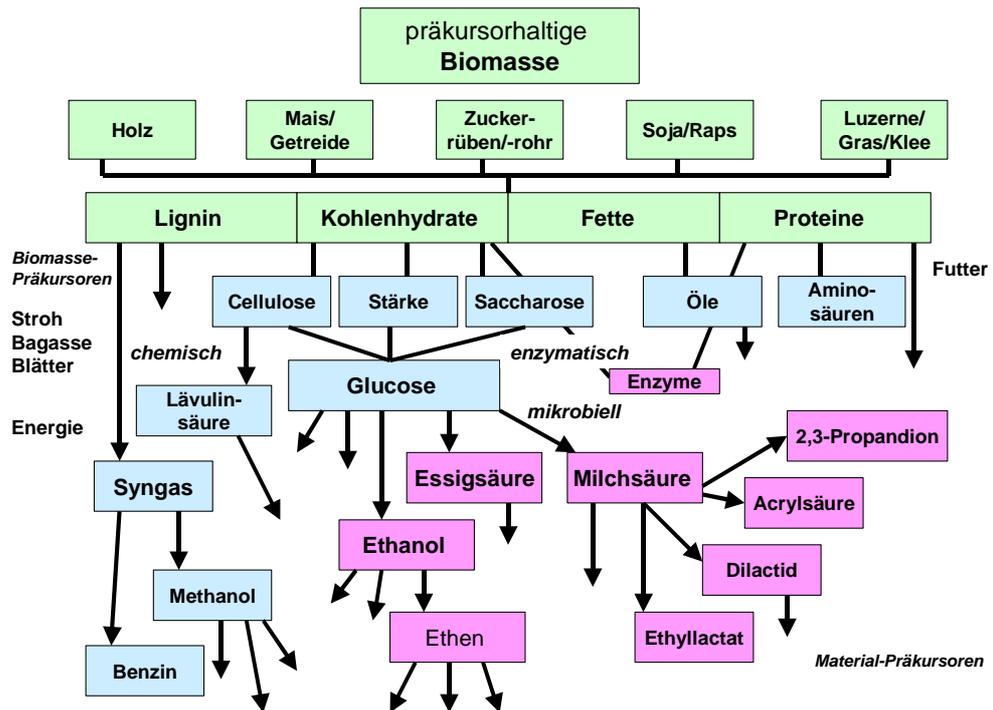
Für einen technisch realisierbaren Trennungsgang, der die separate Nutzung oder Weiterverarbeitung aller dieser Grundprodukte ermöglichen würde, sind bis heute höchstens Ansätze vorhanden. Es gilt aber schon als eine Zielstellung, die Biomasse tiefer aufzutrennen und Wertstoffe unter Beibehaltung ihres Kohlenstoffskeletts zu gewinnen, die nur in geringen Mengen in der Biomasse vorkommen, aber einen hohen Wertzuwachs versprechen wie z.B. Vitamine oder Steroide.

Gegenwärtig werden lediglich 7% der auf Pflanzen basierenden Weltbiomasseproduktion von  $6,9 \times 10^{17}$  kcal/Jahr (1997) verwertet bzw. genutzt. 93% des erneuerbaren Rohstoffreservoirs bleiben ungenutzt. Für die USA heißt dies beispielsweise: 1996 wurden weniger als 1% an produzierter Biomasse energetisch und weniger als 5% stofflich genutzt [13].

Warum ist dies so? Der Marktpreis von biologisch basierenden Industrieprodukten, Konsumgütern und Dienstleistungen hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab:

- (1) von den Kosten der biologischen Rohstoffe, aus denen ein Produkt hergestellt wird und
- (2) von den Kosten der Prozesstechnologie, die benötigt wird, um den Rohstoff in das gewünschte Produkt zu konvertieren.

Auch sind der gegenwärtigen fossil-based Weltökonomie Entwicklungshemmnisse anzulasten [3].



**Abb. 5:** Bioraffinerie-Grobschema für präkursorhaltige Biomasse unter Bevorzugung der Kohlenhydratlinie

## Biobasierte Produkte und Biowertstoffe — Biobased Products

Im Rahmen des o.a. US-Programms wurde der Term „Biobased products“ in der Executive Order 13101 gesetzlich wie folgt definiert [4]: “The term ‘biobased products’ means a commercial or industrial product (other than food or feed) that utilizes biological products or renewable domestic agricultural (plant, animal, and marine) or forestry materials”.

Viele biobasierende Industrieprodukte sind Ergebnisse einer direkten physikalischen oder chemischen Be- oder Verarbeitung von Biomasse: z.B. Cellulose, Stärke, Öle, Proteine, Lignin und Terpene. Andere werden indirekt aus Kohlenhydraten unter Nutzung von biotechnologischen Verfahren, wie mikrobiellen und enzymatischen Prozessen produziert [29-32]. Heute werden bereits eine Vielzahl an Produkten und Produktklassen auf Basis biologischer Rohstoffe produziert (**Abb. 4**).

Einige Beispiele an bekannten und potentiellen Biobasierten- und Bioraffinerieprodukten seien im folgenden aufgeführt:

- (1) Fermentations-Feedstocks [Stärke, Dextrose, Saccharose, Cellulose, Hemicellulose, Melasse, Proteine];

- (2) Food-Produkte [Öle, Stärken, Süßstoffe];
- (3) Nonfood-Industrieprodukte [Füll- und Dämmmaterialien, Papier und Pappenformate, Textilformate, Klebstoffe und Bindemittel];
- (4) Chemische Grund- und Zwischenprodukte [Milchsäure, Essigsäure, Zitronensäure, Bernsteinsäure, Aminosäuren];
- (5) Kraft-/Brennstoffe [Ethanol, Aceton, Butanol];
- (6) Lösungsmittel [Ethanol, Butanol, Aceton, Ester];
- (7) industrielle Enzyme;
- (8) bioabbaubare Polymere [Gummen/Elaste & Plaste].

## Das Bioraffinerie Konzept (BR-Konzept)

Gegenwärtig erzeugen Erdöl-Raffinerien sehr effizient eine Vielzahl von Produkten für nahezu alle Lebensbereiche. Der fossile Rohstoff ist billig, steht jedoch nur begrenzt zur Verfügung. Die Entwicklung von vergleichbaren Bioraffinerien wird notwendig, um viele biologische Produkte konkurrenzfähig zu ihren auf fossilen Rohstoffen basierenden Äquivalentprodukten zu machen. Jede Bioraffinerie raffiniert und konvertiert ihre jeweiligen biologischen Rohstoffe in eine Vielzahl von Wertprodukten. Die Produktpalette einer Bioraffinerie umfasst nicht nur solche Produkte, die in einer Erdölraffinerie hergestellt werden, sondern im besonderen auch solche, die Erdölraffinerien nicht produzieren können (vgl. Abschnitt: Biobasierte Produkte und Biowertstoffe) [14, 3].

Die Gegenüberstellung von Erdöl und Biomasse hat dazu geführt, dass für die künftigen Verarbeitungsanlagen für Biomasse der schon oben genannte Begriff Bioraffinerie geprägt worden ist. In mehrfacher Hinsicht erscheint das als eine glückliche Lösung. Von der Produktseite her gesehen bedeutet eine Umstellung der Rohstoffbasis von Erdöl auf Biomasse auch, dass die Versorgung der Wirtschaft mit bewährten Produkten weiter gesichert werden muss. Raffinerieprodukte kommen damit weiter aus Raffinerien, auch wenn deren Rohstoffbasis verändert wurde. Von der Rohstoffseite her gesehen verlangt Biomasse eine ähnliche Herangehensweise an die auf ihrer Basis betriebenen Produktionen wie an die auf der Basis von Erdöl. Die Organisationsform der Produktion ändert sich nicht grundsätzlich.

So wird z.B. präkursorhaltige Biomasse im ersten Schritt einer Bioraffinerie einer physikalischen Stofftrennung unterworfen. Die Hauptprodukte (H1-Hn) und Nebenprodukte (N1-Nn) werden in Folge mikrobiologischen oder chemischen stoffwandelnden Reaktionen ausgesetzt. Die Folgeprodukte (F1-Fn) der Haupt- und Nebenprodukte können dann weiterkonvertiert oder in einer konventionellen Raffinerie Eingang finden (**Abb. 4**).

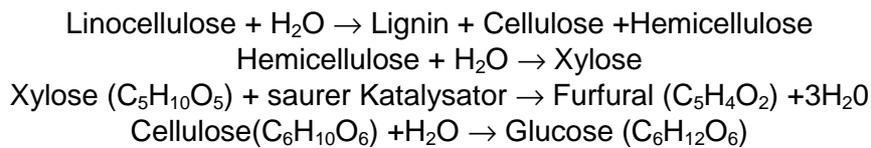
Auf eine möglichst vollständige Verwertung aller eingesetzten bzw. entstandenen Stoffe wird geachtet. Infolge des biogenen Charakters des eingesetzten Rohstoffs ist die stärkere Einbeziehung enzymatischer und mikrobieller Prozesse zur Stoffwandlung sowohl in den Aufschluss- als auch Verarbeitungsprozessen gefragt.

Der Begriff Bioraffinerie gewinnt also eine doppelte Bedeutung, einmal wegen der biologischen Herkunft des zu verarbeitenden Rohstoffs, zum anderen wegen des zunehmend biologischen Charakters der ausgewählten Verarbeitungsmethoden. Damit soll aber nicht gesagt werden, dass die Verarbeitungsprozesse in einer Bioraffinerie nur biologischer Natur sein müssen. Die Beschäftigung mit der Konversion natur-organischer Stoffe ist das ursprüngliche Arbeitsgebiet der Organischen Chemie gewesen, bevor dieses durch Kohle und Öl verdrängt wurde. Letztendlich entscheiden Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit über das anzuwendende Verfahren.

## Einige Aspekte zur Bioraffinerie-Technologie

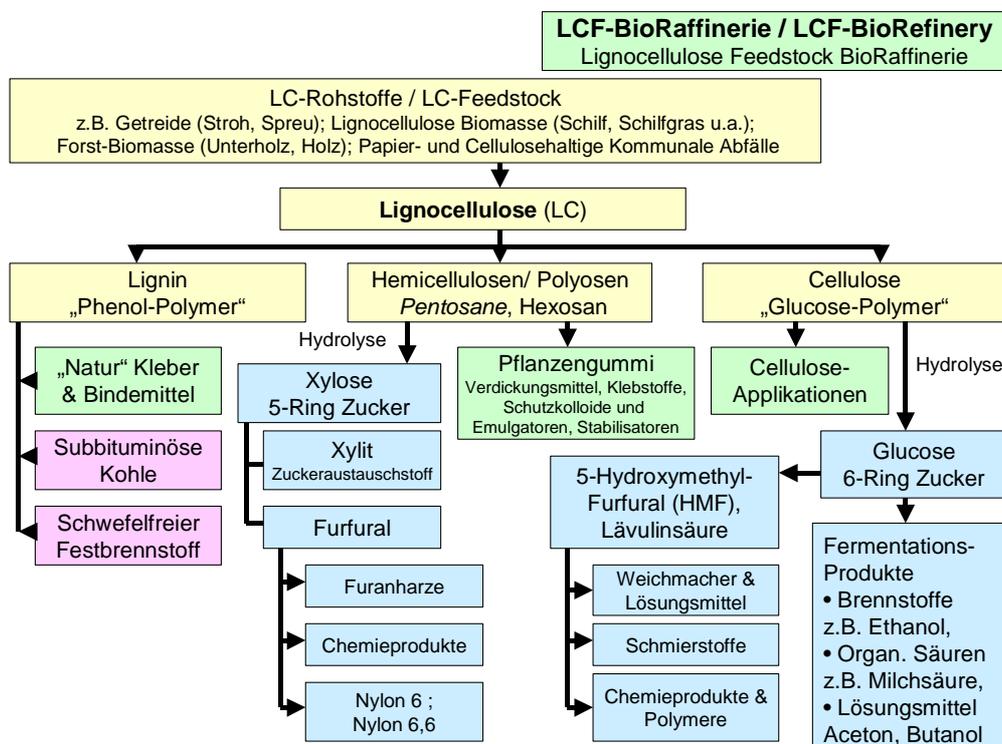
Unter den großtechnischen potentiellen Bioraffinerien wird sich vermutlich die sog. Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerie (LCF-Biorefinery) mit am erfolgreichsten durchsetzen. Zum einen ist hier eine gute Rohstofflage absehbar (Stroh, Schilf, Gras, Holz, Papierabfälle etc.), zum anderen haben die Konversionsprodukte eine gute Position im herkömmlichen fossilbasierten wie auch zukünftigen biobasierten Produktmarkt.

Lignocellulose-Materialien bestehen aus drei primären chemischen Fraktionen oder Präkursoren. Die Hemicellulose/ Polyosen, ein Zuckerpolymer aus vorwiegend Pentosen; die Cellulose ein Glucose-Polymer und das Lignin, ein Polymer des Phenols (**Abb. 6**).



**Abb. 6:** Generalgleichung der Präkursoren-Konversion einer LCF-Bioraffinerie

Eine Übersicht über die möglichen Produkte einer LCF-Bioraffinerie zeigt die **Abb. 7**. Interessant ist hier besonders das Furfural und das Hydroxymethylfurfural. Furfural ist ein Ausgangsstoff für die Herstellung von Nylon 6,6 und Nylon 6. Der Original-Herstellungsprozess von Nylon 6,6 ging von Furfural aus. Erst im Jahre 1961 wurde in den USA auf Grund niedriger Petroleumpreise die letzte Furfural-Nylon 6,6-Fabrik geschlossen. Der Nylon 6 Markt ist riesig.



**Abb.7:** Lignocellulose-Feedstock-Bioraffinerie (LCF-Biorefinery, Phase III)

Im LCF-Konzept gibt es aber auch immer noch als unbefriedigend angesehene Lösungen, wie z.B. die Ligninverwertung als Brennstoff, Kleber oder Füllstoff. Unbefriedigend deshalb, weil sich im Lignin-Grundgerüst in erheblicher Menge Monoaromaten befinden, die, wirtschaftlich isoliert, einen bedeutenden Wertzuwachs für die Primärprozesse ergeben würden. Es soll hier angemerkt werden, dass in der Natur offensichtlich keine Enzyme vorkommen, mit deren Hilfe das von der Natur gebildete polymere Lignin ähnlich leicht in die Grundkörper spaltbar wäre wie die ebenfalls von der Natur gebildeten polymeren Kohlenhydrate oder Proteine [7].

Ein attraktiver Begleitprozess zum Biomasse-Nylon-Prozess ist die Hydrolyse der Cellulose zu Glucose.

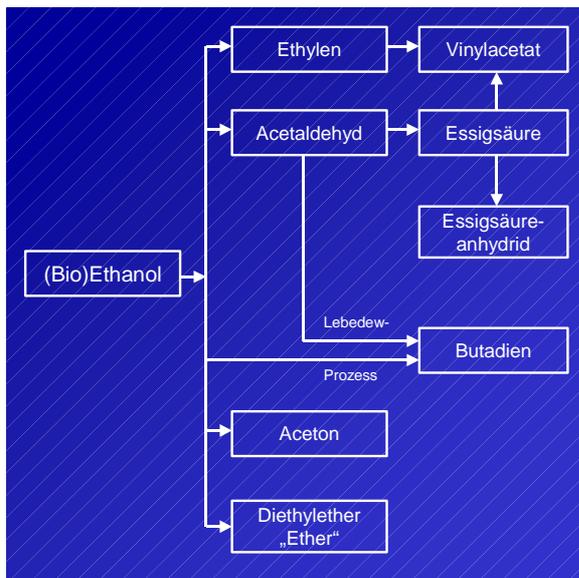
Unter den Bioraffinerie-Hauptprodukten sind die polymeren Kohlenhydrate Cellulose und Stärke hervorzuheben, da sie nur einen Grundkörper, die Glucose, beinhalten, der mittels jeweils einer bestimmten Kombination von Enzymen fast vollständig zugänglich gemacht werden kann. Seine Weiterverarbeitung kann auch enzymatisch erfolgen wie z.B. zur Fructose oder Gluconsäure. Größere Veränderungen der Struktur der Glucose können jedoch nur mikrobiell oder chemisch vollzogen werden.

Das Arsenal für mikrobielle Stoffwandlungen der Glucose ist so groß und die Reaktionen energetisch so vorteilhaft (z.B. kann im Verlaufe anaerober mikrobieller Reaktionen praktisch der gesamte Energieinhalt der Glucose in die Zielmoleküle übertragen werden), dass die Bedeutung der chemischen Stoffwandlungsmöglichkeiten für Glucose weit zurücktritt. Bestimmte Hefen vermitteln bei ihrer Ethanolbildung eine Disproportionierung des Glucosemoleküls, die praktisch ihr gesamtes Reduktionsvermögen in das Ethanol verlagert und letzteres mit 90 %iger Ausbeute gegenüber dem Formelumsatz erhältlich macht [33], **Tab. 1**.

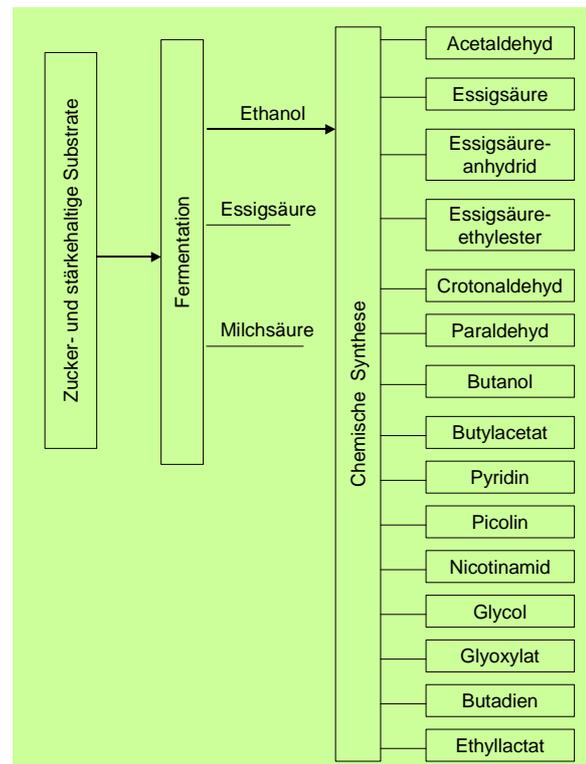
**Tabelle 1:** Massenbilanz der Ethanolgärung

Massenbilanz Ethanolgärung			
1000g C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> + 2g NH <sub>3</sub> →			
→	17 g	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub> N	Biomasse
+	462 g	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol
+	52 g	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	Glycerin
+	14 g	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	Succinat
+	2 g	H <sub>2</sub> O	Wasser
+	453g	CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid

Ethanol lässt sich chemisch in Ethen/Ethylen überführen. Damit liegt ein Anschlussprodukt an eine Erdölraffinerie vor. Vom petrochemisch erzeugten Ethen aus erfolgen heute bekanntlich eine ganze Reihe von großtechnischen chemischen Synthesen für wichtige Gebrauchsgüter: z.B. Polyethylen, PVAc usw. (**Abb. 8**) Weitere petrochemisch erzeugte Stoffe lassen sich auf ähnliche Weise mit mikrobiellen Stoffwandlungen aus Glucose erzeugen, z.B. Wasserstoff, Methan, Propanol, Aceton, Milchsäure, Butanol, Butandiol (**Abb. 9**).



**Abb. 8:** ‚Biomasse-Ethanol‘, angedockt an eine fossil-based Chemieproduktpipeline



**Abb. 9:** Technische Zuckerfermentations- und Folgeprodukte

Auch proteinreiche mikrobielle Biomassen, das sogenannte SCP (single cell protein), lässt sich aus Kohlenhydraten erzeugen und findet wegen der fleischähnlichen Zusammensetzung seiner Proteine wieder erhöhtes Interesse.

Ohne Alternative in der chemischen Industrie ist, dass durch mikrobielle Fermentation auf der Basis von Kohlenhydraten eine Reihe von Enzymen hergestellt werden, die für eine

Vielfalt technischer Prozesse in der Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Textilindustrie Anwendung finden und auch im internen Prozess der Verarbeitung der Biomasse in einer Bioraffinerie wiederum eine Rolle spielen. Bei letzterem bewirken die eingesetzten Enzyme im wesentlichen hydrolytische Vorgänge.

Hydrolytische Prozesse können alternativ auch chemisch durchgeführt werden. In der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts war die auf der Holzhydrolyse aufgebaute Industrie kein unwesentlicher Produktionszweig, vor allem in Mittel- und Osteuropa. Dadurch wurden auch Produkte wie Furfural (**Abb. 7**) oder Lävulinsäure zugänglich, für die sich bis jetzt keine mikrobiellen Synthesewege bieten. Der Lävulinsäure wird u.a. eine große Zukunft bei Biopolymeren und Kraftstoffadditiven vorausgesagt [34].

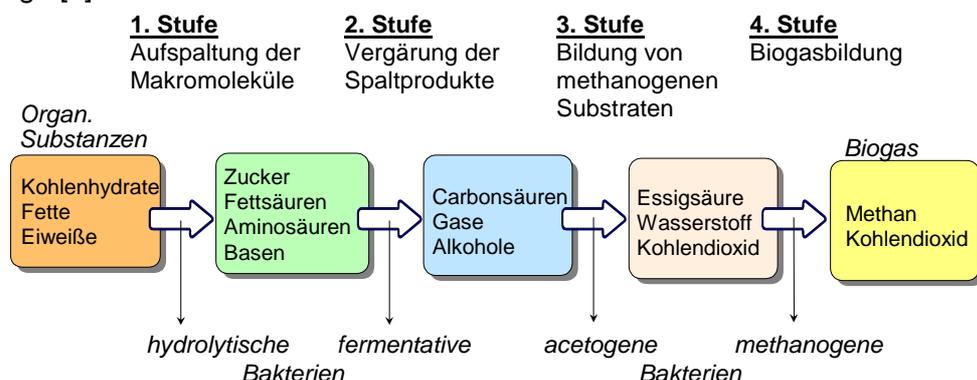
Für Stärke (**Abb. 5**) scheint der Vorteil der enzymatischen Hydrolyse über die chemische gesichert. Für Cellulose ist das noch nicht der Fall. Cellulose-hydrolysierende Enzyme zeigen nur Wirkung, wenn Vorbehandlungen zur Auflockerung der recht festen Lignin/ Cellulose / Hemi-cellulose-Verbunde erfolgen. Sie werden meist noch thermisch, thermisch /mechanisch oder thermisch/chemisch vorgenommen und sind nicht ohne beträchtlichen Einsatz von Energien erfolgreich. Einmal in diesem Zustand, kann die saure Hydrolyse auch bis zu Ende gebracht werden, obwohl das mit deutlich schlechteren Ausbeuten an Glucose erfolgt als beim Einsatz von Enzymkombinationen. Es stellt sich hier die Frage, ob die neuerlich aufgefundenen "Expansine" [35] einen Durchbruch im Hinblick auf einen energiesparenden Aufschluss widerstandsfähiger Verbunde erbringen können.

Chemische Reaktionen, die ohne Bezug auf die jeweils im Ausgangsstoff vorhandenen Moleküle eine Vereinheitlichung der Produkte erbringen können, liegen in den Vergasungs- oder Pyrolysereaktionen vor. Häufigstes Produkt sind Wasserstoff/Kohlenmonoxid-Gemische (Synthesegas). Syngas ist ebenfalls ein Anschlussprodukt an eine Erdö Raffinerie. Mit ihm lassen sich ebenfalls eine Reihe wichtiger Gebrauchsgüter wie Methanol oder Benzin (Fischer/Tropsch - Synthese) erzeugen [36]. In den 80er Jahren hat die Europäische Gemeinschaft einschlägige Entwicklungen von Verfahren und Apparaten gefördert, so dass eine Reihe von Erfahrungen vorliegen [37]. Wiederverfügbar gemacht werden kann auch der große Erfahrungsschatz aus den Arbeiten der 20er bis 50er Jahre zur Produktion von Treibstoffen aus Holz und Braunkohle in Deutschland [36].

Um vom Synthesegas zum Wasserstoff zu kommen, sind auch biologische Reaktionen mit extremophilen Mikroorganismen bekannt geworden. Trotz ihrer hohen Effektivitäten und Geschwindigkeiten reichen sie jedoch nicht an die der chemisch-katalysierten Wassergas-Shiftreaktionen heran (12).

Eine ähnliche vereinheitlichende Reaktion wie die zu Synthesegas ist auch auf mikrobiellem Gebiet bekannt. Es handelt sich um die Synthese von Methan durch Disproportionierung von Zuckern, Fetten, Eiweißen und weiteren biologisch abbaubaren organischen Stoffen. Als Biogas-Reaktion [Methan (60 bis 75%) und Kohlendioxid (25 bis 40%)] hat sie einen großen Bekanntheitsgrad und bewährt sich als Methode zur Verwertung von Reststoffen [39, 40].

Das Methan ist jedoch - außer seine Verbrennung mit Gewinnung von thermischer und Elektroenergie bzw. seiner mikrobiellen Verstoffwechslung zu Biomasse- chemisch und biochemisch träge [7].



**Abb. 10:** Vereinfachte Darstellung eines biotechnisch-mikrobiellen Biomasse-Abbauregimes [40]

Der Vorteil biotechnologischer Verfahren in Bioraffinerie-Systemen liegt u.a. darin, dass sich aus einem organischen Rohstoff die verschiedensten Wertstoffe unter Beibehaltung der Basistechnologie und dem Equipment produzieren lassen. Ein solches Regime ist etwas vereinfacht in **Abb. 10** dargestellt. Gleichwohl ist anzumerken, dass für eine tatsächliche produktionsreife Vereinheitlichung und Steuerung der Teilprozesse und gezielte Abnahme der einzelnen Produktstufen eines solchen Abbauregimes noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

## Definitionen des Begriffes Bioraffinerie und Grüne Bioraffinerie

Das noch junge Arbeitsgebiet „Biorefinery Systems“ in Verbindung mit „Biobased Industrial products“ ist in vieler Hinsicht ein noch sehr offenes Wissensgebiet. Dies drückt sich auch in der Suche nach einer Beschreibung aus, deren Inhalte zum Teil kontrovers diskutiert werden. Eine Auswahl ist im folgenden aufgeführt.

- Der Term Grüne Bioraffinerie-Green Biorefinery wurde 1997 wie folgt definiert:  
**Grüne Bioraffinerien** sind komplexe ( bis voll integrierte) Systeme nachhaltiger, umwelt- und ressourcenschonender Technologien zur umfassenden *stofflichen und energetischen* Nutzung bzw. Verwertung von biologischen Rohstoffen in Form von Grünen und Rest-biomassen aus einer im Ziel nachhaltigen (regionalen) Landnutzung. [AG Grüne Bioraffinerie, Uni-Potsdam (1997) [24]].
- In der Section ‘Industry and Environmental’ der ‘Biotechnology Industry Organization’ (BIO) wird folgende Definition diskutiert [7]:  
**Biorefineries** are fully integrated manufacturing plants which use physical, chemical, enzymatical and/or microbial methods to break biogenic raw materials down into their constituents and convert them into a bunch of consumer and utility goods in such a way that the environment is polluted only as minimal as possible.

Das ursprünglich von deutscher Seite verwendete „komplexe Anlagen und Systeme“ wurde durch voll integrierte ersetzt. Auch wird Wert darauf gelegt, dass die der Bioraffinerie zugrundeliegende Technologie zur Biotechnologie zählt, unbeschadet davon, dass einzelne, oft auch wesentliche Prozesse auf chemischer Basis ablaufen [7].

- Das U.S. Department of Energy (DOE) verwendet in ihrem ‘Energy, Environmental, and Economics (E<sup>3</sup>) Handbook’ folgende Definition [41]:  
**Biorefinery.** A biorefinery is an overall concept of a processing plant where biomass feedstocks are converted and extracted into a spectrum of valuable products. Based on the petrochemical refinery.

Mehr oder weniger einig ist man sich über eine Zielstellung, die sich in aller Kürze so darstellt. Entwickelte Bioraffinerien, die sog. Phase III-Bioraffinerien (**Abb. 2**), [13] produzieren aus einem Biomasse-Feedstock-Mix mittels eines Verfahrens-Mix eine Vielzahl der verschiedensten Produkte (Produkt-Mix).

## Feedstock-Mix + Prozess-Mix → Produkt-Mix

### Bioraffinerie-Design

Um solche o.a. Produktziele zu erreichen, ist es notwendig, dass zum einen neue Bioraffinerie-Basistechnologien entwickelt und zum anderen die heute bekannten Technologien kombinatorisch eingesetzt werden.

Viele Bioraffinerie-Endprodukte werden erst durch eine sinnvolle nachhaltige und ökonomische Kombination verschiedener Prozesse und Methoden (z.B. thermische, mechanische, chemische und biologische Verfahren und Technologien ) herstellbar. Das Entwickeln von tragfähigen Bioraffinerien erfordert ein hochgradig interdisziplinäres Zusammenspiel der verschiedensten Fachdisziplinen in Forschung und Entwicklung. Eine wesentliche Aufgabe wird

in nächster Zeit die Entwicklung und Etablierung von Demonstrationsanlagen sein. In den USA wurde ein RD&D-program (Research, Development and Demonstration) formuliert [4].

Es erscheint hier zulässig von *Bioraffinerie-Design* zu sprechen. Bioraffinerie-Design heißt: auf fundierter, seriöser wissenschaftlicher und technologischer Basis, praxisnah und anwendungsorientiert Technologien, Prozesse, Produkte und Produktlinien zu Bioraffinerien zusammenzuführen.

Design-Konzepte werden zukünftig unter anderem aufbauen auf:

- (1) die Lignocellulose-Feedstock-Konversion [LCF-Bioraffinerie, LCF-Vorbehandlung, effektive Trennung der LCF in Lignin, Cellulose und Hemicellulose (**Abb. 7**)];
- (2) die Weiterentwicklung von thermischen, chemischen und mechanischen Prozessen [z.B. neue Aufschlussmethoden, Vergasung (Synthesegas) und Verflüssigung von Biomasse];
- (3) die Weiterentwicklung biologischer Prozesse [Biosynthese, Stärke- und Celluloseabbauende Bakterien u.a.];
- (4) die Kombination von Stoffwandlungen [z.B. biotechnologischer und chemischer];
- (5) Grüne Bioraffinerie-Konzepte;
- (6) die Forcierung von F&E auf Phase III/Typ III-Bioraffinerien [Feedstock-Mix + Prozess-Mix → Produkt-Mix, (**Abb. 2**)].

Schlüsseltechnologien sowie Forschungs- und Entwicklungsfelder werden dabei nach [3] sein (Auswahl):

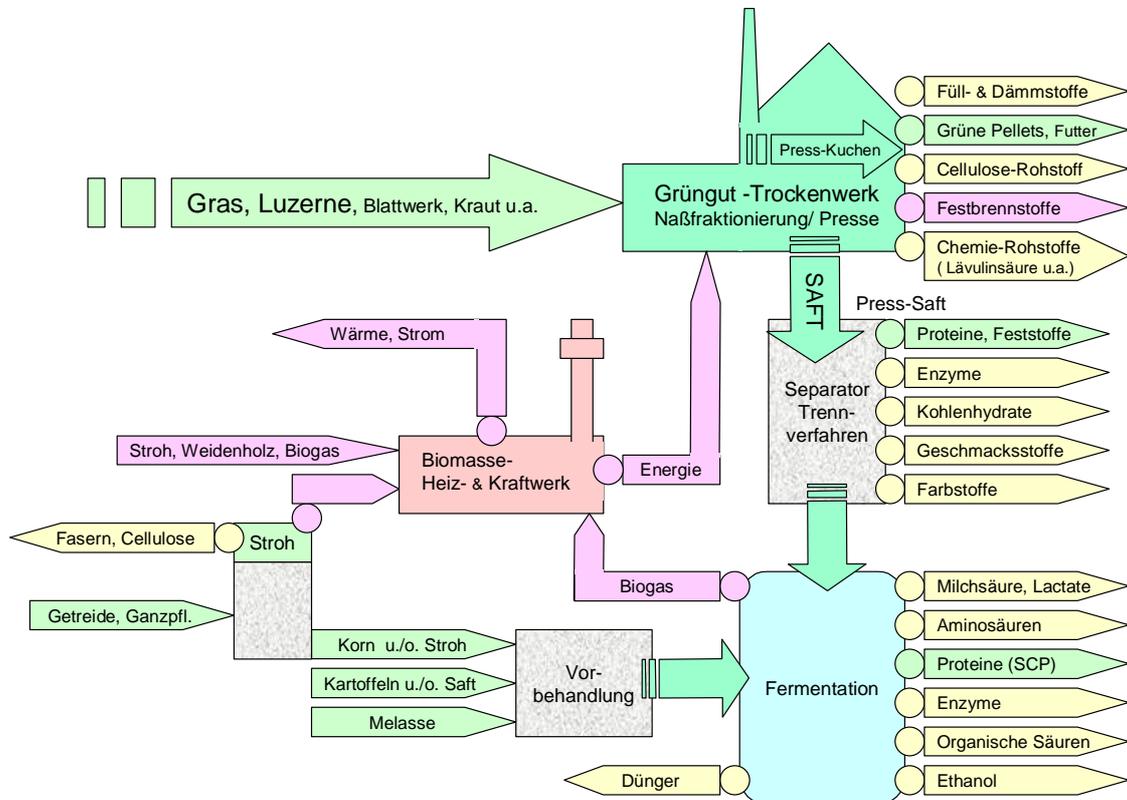
- (a) Up-Stream-Prozesse: Industrielle enzymatische Hydrolyse von Cellulose & Hemicellulose;
- (b) Bioprozesse: Monitoring biologischer Prozesse, Bioreaktoren für Wärme-, Schwingungs- und viskose Reaktionen, Fest-Flüssig-Fermentation, Prozesskontrolle (Komponentenanalyse), Kombination biologischer, physikalischer und chemischer Operationen;
- (c) Mikrobielle Systeme: Identifikation von Mikroorganismen, Studium der fundamentalen Prinzipien mikrobieller Physiologie und Wechselwirkungen (Umwelt, Metabolismus und Physiologie);
- (d) Enzyme: Entwicklung preisgünstiger industrieller Enzyme, Neue Enzyme für biologische Produkte;
- (e) Down-Stream-Prozesse: Extraktion mittels superkritischer Lösungsmittel (z.B. CO<sub>2</sub>), selektive permeable Membranen, Kombination und Integration verschiedener Trennmethode (z.B. Flüssigextraktion und Membrantechnologie);
- (f) Technologien zur Verknüpfung von biotechnologischer und chemischer Stoffwandlung (biotechnisch-chemische Eintopf-Synthesen).

Eine Prioritätenliste des ‚Biobased Products Coordination Council‘ (USDA-BPCC) [42] wiederum verzeichnet folgende zu forcierende Entwicklungs- und Produktkategorien (C1-C13) auf Basis von Biomasse:

- C1 : Absorbents/Adsorbents;
- C2 : Adhesives/Inks/Coatings;
- C3 : Alternative Fuels and Fuel;
- C4 : Constructions materials/Composites
- C5 : Lubricants/Functional fluids
- C6 : Renewable alternative fiber papers/Packaging
- C7 : Solvents/Cleaners/Surfactants
- C8 : Plant based plastics/Degradable polymers/films
- C9 : Landscaping products
- C10: Biocontrol/Bioremediation media;
- C11: New fibers/Filler/Yarn/Insulation;
- C12: Enzymes/Intermediate Chemicals;
- C13: Other (Cosmetics, Pharmaceuticals, Nutraceuticals).

## Das Grüne Bioraffinerie Konzept (GBR-Konzept)

Als Grüne Bioraffinerie werden komplexe (bis voll integrierte) Systeme nachhaltiger, umwelt- und ressourcenschonender Technologien zur umfassenden **stofflichen und energetischen** Nutzung bzw. Verwertung von nachwachsenden (biologischen) Rohstoffen in Form von Grünen und organischen Abfallbiomassen aus einer im Ziel nachhaltigen regionalen Landnutzung bezeichnet [24].



**Abb. 11.** Ein System Grüne Bioraffinerie, Integrierter Prozess zur Produktion von Food und Non-Food-Produkten sowie Energie auf Basis grüner Biomasse [15]

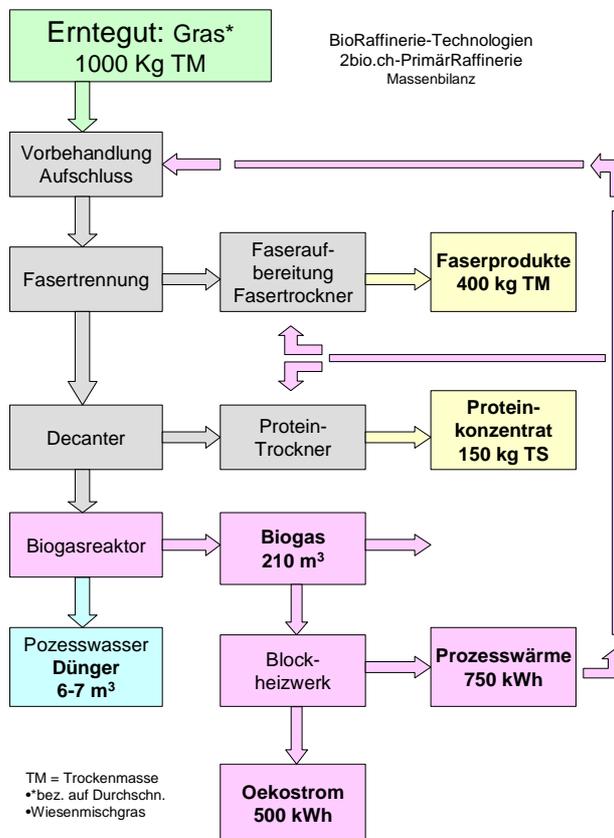
Grüne Bioraffinerien (GBR) sind ebenso wie Bioraffinerien Multiprodukt-Systeme und richten sich in ihren Raffinerie-Schnitten, -Fraktionen und -Produkten nach der Physiologie des Pflanzenmaterials, das heißt an Erhalt und Nutzung der Vielfalt der durch die Natur erbrachten Syntheseverleistungen.

In Erweiterung des Bioraffinerie-Konzepts orientieren sich Grüne BioRaffinerien sehr stark an den Nachhaltigkeitsprinzipien (Nachhaltige Landnutzung, Nachhaltige Rohstoffe, Schonende Technologien, Autarke Energieversorgung, etc.) bzw. beziehen diese mit ein. Steht bei Bioraffinerien *derzeit* die Ökonomie im Vordergrund, ist man mit Grünen Bioraffinerie-Konzepten schon konzeptionell um eine Gleichgewichtung zwischen Ökonomie und Ökologie bemüht.

Übersichten zu GBR-Konzepten, Inhalten und Zielen sind zu finden unter den Literaturzitate [1, 14, 15, 24, 25, 43-46]. In Europa konzentrieren sich derzeit die Grünen Bioraffinerie-Aktivitäten auf Deutschland [1,14, 15, 43], Dänemark [45, 46], Österreich [44] und die Schweiz [47].

Grüne Biomassen sind beispielsweise Gras aus einer Bewirtschaftung von Dauergrünland, Stilllegungsflächen, Naturschutzflächen oder grüne Feldfrüchte, wie Luzerne, Klee, unreifes Getreide aus einer extensiven Landwirtschaft. Grüne Pflanzen sind eine natürliche Chemie- und Lebensmittelfabrik. Um ihre wertvollen Inhaltsstoffe in einer weitestgehenden Naturbelassenheit zu isolieren, verwendet man in der ersten Stufe (Primärraffination) die schonende Technologie der Nass- oder Trockenfraktionierung. Bei der Nass-Fraktionierung wird das grüne Erntegut oder das feuchte organische Anfallgut in einen faserreichen Presskuchen (PK) und in einen nährstoffreichen Saft (Green Juice, GJ; Presssaft, PS) getrennt. Der Presskuchen enthält neben Cellulose und Stärke auch wertvolle Farbstoffe, Arzneistoffe

und andere Organika. Green Juice enthält Kohlenhydrate, Proteine, freie Aminosäuren, organische Säuren, Farbstoffe, Enzyme, Hormone, Arzneistoffe, weitere organische Substanzen und Mineralien. Diese primären und sekundären Pflanzeninhaltsstoffe werden nach den bereits beschriebenen BR-Technologien in einer GBR fraktioniert, isoliert und zu Produkten konvertiert (**Abb. 10 und 11**). Rohstoffe wie Gras haben auch physiologische Vorteile. Sie enthalten wertvolle Inhaltsstoffe, die in den artverwandten Kulturpflanzen Getreide bereits herausgezüchtet worden sind [15].



**Abb. 11:** Produktschema einer Grünen Bio Raffinerie nach 2B AG (Schweiz) [47], im Bau befindend.

## Grüne Bio Raffinerie – Der Havelland-Typ (GBR-HVL-Typ)

Der Charakter einer Bio Raffinerie wird letztendlich durch das Umfeld des potentiellen Bio Raffinerie-Standortes bestimmt. Der regionale Bezug ergibt sich schon daraus, dass sich die i.A. festen Biomassen sinnvoll nicht wie Erdöl oder Gas transportieren lassen. Zu den Standort-Parametern zählen weiterhin Rohstoffe (Art und Verfügbarkeit), Infrastruktur (Landwirtschaft, Industrie, Handel, Verkehr, Wissenschaft und Bildung), Humankapital, Produktlinien, Produktinnovationen, regionaler Markt.

Arbeiten an Bio Raffinerie-Systemen sind innovativ und immer hochgradig interdisziplinär. Die grundlegenden fachspezifischen Arbeiten finden somit örtlich verteilt in den Universitäten, Instituten und Forschungsunternehmen statt. So auch in Brandenburg. Um diese Arbeiten praxisrelevant zu bündeln, wurde im Jahre 1999 der Forschungs-, Entwicklungs- und Praxisverbund „Grüne Bio Raffinerie Brandenburg“ gegründet. Als potentielle Region wurde das Havelland (Region und Gebietskörperschaft im Land Brandenburg, westlich von Berlin) gewählt. Die Region/der Landkreis Havelland (59% der Fläche landwirtschaftlich genutzt, 61.000 ha als Ackerland, 31.000 ha als Grünfläche) bietet mit dem Havelländischen Luch, mit der zentralen Agro-Einheit Futtermittelwerk Selbelang (Verarbeitungskapazität 6 bis 8 x10<sup>3</sup> t Trockengutpellet/Jahr), dem ehemaligen Chemiefaserwerk Premnitz (heute Chemiepark), dem hohen Wissensstand der Agroindustriellen Forschungs- und Bildungseinrichtungen u.a. ideale Standortbedingungen. Die Forschungs- und Entwicklungskonzeption wurde

Grüne BioRaffinerie „Havelland-Typ“ genannt [14, 43]. Eine regionale Übertragbarkeit der Konzeption ist dieser innewohnend.

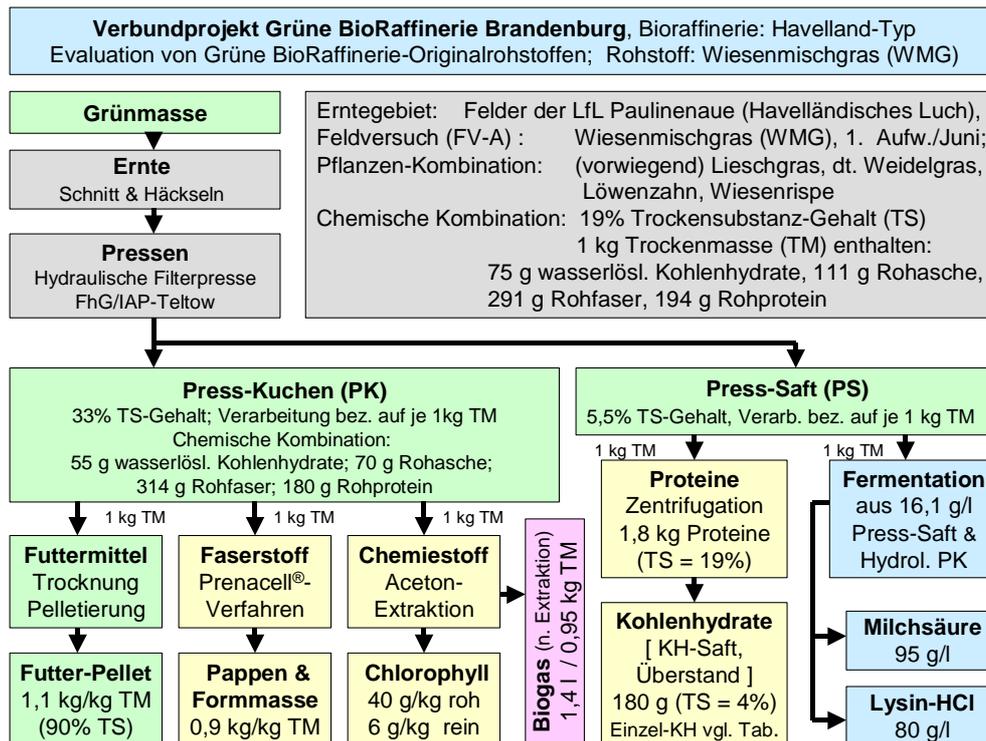


Abb. 12. Evaluierung der Potentiale einer Primärraffinerie und einiger BioRaffinerie-Produktlinien

## Evaluierung der Potentiale einer BioRaffinerie des Havelland-Typs

Um das komplizierte Zusammenspiel der verschiedenen Technologien und Produktlinien praxisnah vorzubereiten, wurde im Technikum- und Kleintechnikummaßstab ein potentielles Regime mit dem Originalrohstoff Wiesenmischgras (WMG) gefahren. Die experimentelle Evaluierung betraf Primärraffinerie-Stufen (Grasernte, Häckseln, Transport, Fraktionierung in Press-Kuchen und Press-Saft, Lagerung) und die Sekundärraffineriestufen bzw. Produktlinien: Proteinabtrennung, Kohlenhydratisolierung, Saftfermentation zu Milchsäure und der Aminosäure L-Lysin (Press-Saftlinie) sowie die Blattfarbstoffextraktion, Herstellung von Futtermittelpellets, Faserstoffgewinnung sowie die Reststoffverwertung zu Biogas (Press-Kuchenlinie). Erste Ergebnisse sind in der **Abb. 12 und 14** zusammengefasst.

Um eine weitestgehende Vergleichbarkeit zu gewähren, wurden die Ergebnisse der einzelnen Verfahrensstufen auf jeweils 1 kg Trockenmasse (TM) umgerechnet (**Abb. 12**).

In der 2. Evaluierungsstufe wurden die Verfahren und Produktlinien in die Struktur eines Landwirtschaftlichen Betriebes eingearbeitet. Das Ergebnis ist in **Abb. 14** dargestellt. Dabei ging es nicht um eine Produktmaximierung, sondern um eine Evaluierung des Modellprojektes „Landwirtschaftlicher Betrieb als Erzeuger von Non-Food-Produkten“. In einer ersten Bewertung konnte gezeigt werden, dass Wiesenmischgras sich zu einem durchaus effizienten Grüne-BioRaffinerie-Rohstoff entwickeln kann. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass das Implementieren von BioRaffinerien in Agrarbetriebe mittlerer Größe ökonomisch und ökologisch vorteilhaft sein kann. Eine ausführliche Beschreibung der Evaluierung sowie verschiedener BioRaffineriesysteme befindet sich in Vorbereitung. Forschungs- und Entwicklungsbedarf hat sich dabei aufgezeigt.

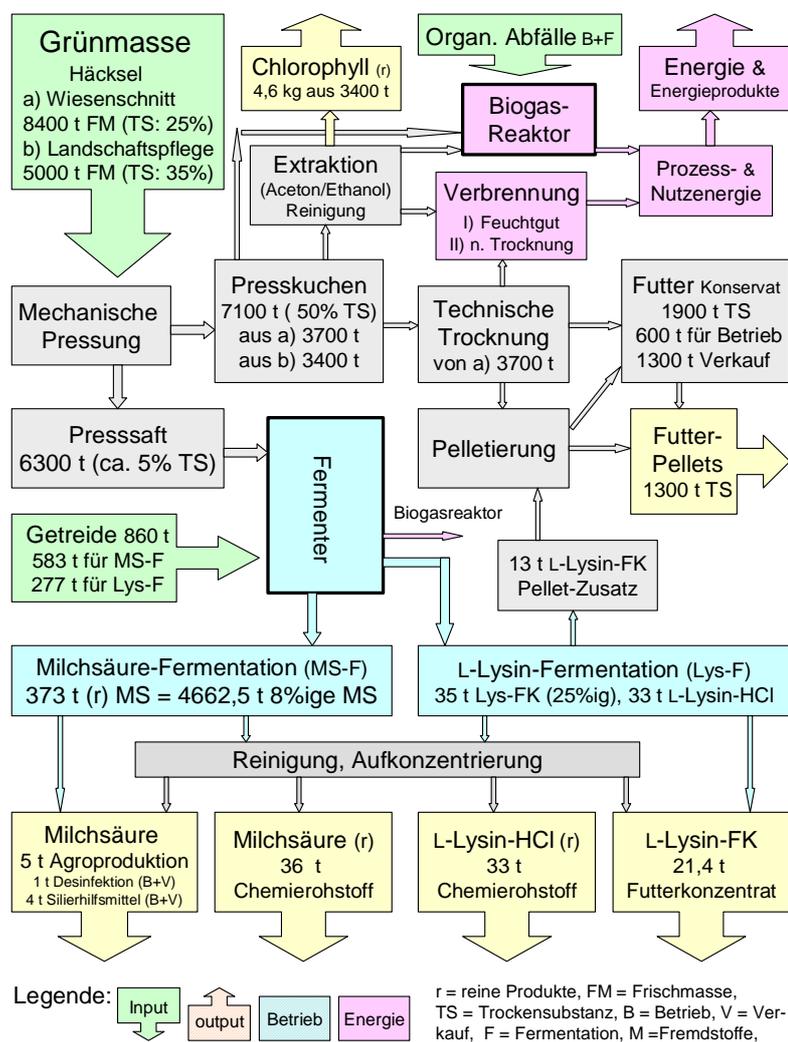
Unabhängig noch vorhandener Defizite wird derzeit am Standort Futtermittelwerk-Selbelang (Havelland, Land Brandenburg) der Bau eines Grüne BioRaffinerie-Prototypes, d.h. die ersten Verarbeitungsstufen einer sog. Primärraffinerie vorbereitet. Durch das externe Andocken gewünschter Produktlinien an ein existierendes Grüngut-Trockenwerk (Kapazität im Saisonbetrieb: 8.000 t TM/a) ist es möglich, Entwicklungsarbeit zu leisten ohne den Produktionsprozess wesentlich zu beeinträchtigen. Vorteilhaft sind im besonderen die Nutzung der vor-

handenen Rohstoffinfrastruktur, die Nutzung der Trockenwerkbasis sowie das jederzeit mögliche Umschalten auf das traditionelle Trockenwerkregime (**Abb. 13**).

Vorhaben: Bau eines Prototyps „PrimärBioRaffinerie Selbelang“  
 Anlagenkapazität:  
 1. Stufe: 8.000 t TM (8 M/J), (Basis T-Werk)  
 Rohstoffe: Grüngut/ Luzerne, WM-Gras  
 PrimärRaffineriestufen:  
 Pellets, Chlorophyll, Prenacell®-Faser,  
 Milchsäure (Andocklinie), Proteine, Biogas-  
 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung;  
 Baukosten: DM 10 Mio (+Einfahren)



**Abb. 13:** Die Basis-Parameter der ersten Baustufe eines Grüne Bioraffinerie-Prototyps (PrimärBioRaffinerie Selbelang)



Die stoffliche Bilanz der **Abb. 14** beruht auf folgenden Annahmen:

**Landwirtschaftlicher Betrieb:**

1200 ha Landw. Nutzfläche (LN)  
 550 ha Grünland (GL)  
 davon  
 8400 t Frischmasse für GBR  
 Tierbestand:  
 460 Milchkühe, 60 Mastbullen,  
 300 Jungrinder, 260 Kälber,  
 100 Schweine

**Abb. 14:** Einordnung einer GBR-Press-Saftlinie in einen landwirtschaftlichen Betrieb

**Bioraffinerie und Biowirtschaft**

Es steht außer Zweifel, dass energische und zielgerichtete Maßnahmen notwendig sind, um diese neue Art der biotechnologisch-chemischen Produktion im Wettbewerb zu den bestehenden zu etablieren.

Anders als bei der Einführung biotechnologisch hergestellter neuer Arzneimittel geht es hier nicht nur darum, neue Wirkungen mit neuen Stoffen hervorzubringen, als vielmehr bewährte Stoffe mit bekannten Eigenschaften auf neue Weise zu erzeugen sowie die sog. ‚sleeping chemicals‘ zum Leben zu erwecken. Letzteres betrifft vor allem die große Palette der wissenschaftlich domestizierten Natur- und biochemischen Stoffe, die jedoch über das Laborstadium nie hinausgekommen sind.

Innovationen werden hier weniger auf dem Gebiet der Produktfindung und -anwendung als vielmehr auf dem Gebiet der Produktherstellung und Produktionsmethodik zu finden und einzusetzen sein. In Folge von Bioraffinerie-Entwicklungen wird sich jedoch ein Produktfindungsprozess zwangsläufig verstärkt anschließen.

Während auf dem Gebiet der Bio-Arzneimittel eine ‚bottom-up‘ Entwicklung sichtbar geworden ist (viele Entrepreneure, viele kleine Firmen, viele stofflich orientierte Zielstellungen, viele parallel verlaufende Innovationen, wenig Integration und Logistik) deutet sich für die Entwicklung der Bioproduktion und einer darauf aufbauenden Biowirtschaft eher ein ‚top-down‘ Vorgang ab. Das liegt einfach an dem komplexen Charakter dieser Produktion und der dafür notwendigen Verzahnung von großen Komplexen wie Landschaft, Landwirtschaft, Industrie, Umwelt und Verbraucher. In den USA wird das bemerkbar durch Erlasse des Präsidenten, Gesetze zur Förderung des Gebiets und Einrichtung von Führungsgremien zur Realisierung praktischer Schritte. In diesem Rahmen findet eine rege Beteiligung von Industrie, akademischen Institutionen und kleinen Firmen statt, in denen Entwürfe strategischer Planungen, "visions" und "technological roadmaps" erarbeitet werden. Ersichtlich wird das auch aus dem strategischen Plan von USDA und DOE [10, 41,42]), der sieben Zielstellungen vorsieht, die die innovative und logistische Tätigkeit von Industrie und akademischen Einrichtungen an der Einführung von Bioprodukten und Bioenergien in die Wirtschaft gleichermaßen herausfordert [7]:

- (1) Kosten für Bioprodukte und Bioenergien um das Zwei- bis Zehnfache senken,
- (2) Demonstration entscheidender integrierter Produktionssysteme für die Erzeugung von Brennstoffen, Wärme, Kraft, Chemikalien und Materialien,
- (3) Monitoring und Einschätzung der Umwelteinflüsse von Bioprodukt- und Bioenergie-Produktionssystemen,
- (4) Förderung von Innovationen zu Biomasse, Bioprodukten und Bioenergie,
- (5) Erhöhung der Marktgängigkeit und Bedarfsweckung für Bioprodukte und Bioenergie,
- (6) Erhöhung des Anteils der Regierungseinkäufe von Bioprodukten und Bioenergie,
- (7) Gewährleistung einer Verdreifachung der Erzeugung und Nutzung von Bioprodukten und Bioenergie bis 2010 in Übereinstimmung mit der Politik zur Ressourcen- und Umweltschonung.

In welchen Dimensionen in den USA entwickelt wird, soll nachfolgendes Beispiel aufzeigen. In Anlehnung an eine LCF-Bioraffinerie (**Abb. 7**) wurde folgende Anlage konzipiert [13]:

Rohstoffe:	Lignocellulosehaltige Biomasse ( Rohstoffmix)
Eingang:	4.300 t/day Trockenmasse*
Ausgang:	47.5 Mio gallons/y Ethanol (\$ 1,25 /gallons)
Hauptprodukte:	323 T t/y Furfural (\$ 0.32/pound)
Arbeitsplätze:	6.095 (ohne Bau)
Baukosten:	\$ 455 Mio
Betrieb (Jahr):	Einkünfte: \$ 281 Mio
	Kosten: \$ 173 Mio
	Netto-Profit: \$ 108 Mio

\* höchstprofitables Maximum. Erwarteter Eingangsdurchschnitt: 2.000 bis 2.500 t/day [13].

## Biowirtschaft in Deutschland

Es erscheint sicher, dass isolierte Schritte einzelner Länder, auch solcher mit großem Potential, keinen überragenden Einfluss auf die Biosphäre, das Klima oder einen globalen Ressourcenschutz bringen werden. Das wird nur geschehen, wenn wirklich global gehandelt

wird. Wenn Ziel und Weg akzeptiert werden, steht die Frage der Mitarbeit an solchen Technologien und ihrer Einführung auch für Deutschland an.

Gemessen am Stand in den USA tritt die auf Industrie und Umwelt ausgerichtete Biotechnologie, die BiotechChemie bzw. Chemie (biobased Chemistry) in Deutschland zur Zeit kaum hervor. Gerade ist hier die biopharmazeutisch geprägte Phase der Biotechnologieentwicklung in die Gänge gekommen. Von einer Biowirtschaft als Zielstellung spricht noch niemand. Entsprechend fehlen zur Zeit die Standpunkte der Landwirtschaft, der Auto- und Erdölindustrie sowie der Landschafts- und Klimaschutzgremien.

Sicher müssen für deren Ausarbeitung noch Erhebungen zu Energie- und Stoffbilanzen, zur Realität der Einflussnahme auf das Klima sowie Vergleiche zur Wirtschaftlichkeit der neuen Verfahren gegenüber den etablierten durchgeführt werden. Könnte es sein, dass in absehbarer Zeit der Wunsch nach Aufnahme der Einführung einer Biowirtschaft in die Lösungsvorschläge zum globalen Klimaschutz geäußert wird? Dann würden solche Standpunkte dringlich [7].

Auch sind die U.S.-amerikanischen Argumente wie, innere Sicherheit (langfristige industrielle und landwirtschaftliche Arbeitsplätze), ökonomische Sicherheit (langfristige Produktions- und Gewinnsicherheit), äußere Sicherheit (problematischer Zugang zu den globalen fossilen Rohstoffressourcen) sowie der Wunsch nach einer Technologieführerschaft [3] auch für Deutschland und Europa nicht so ohne weiteres von der Hand zu weisen.

Ansatzpunkte für eine ‚Biowirtschaft‘ finden sich zur Zeit in Deutschland am ehesten auf der Länder- oder regionalen Ebene. Infolge der Rolle der Landwirtschaft in einer auf Biorohstoffe und Bioprodukte orientierten Wirtschaft sind von hier aus Sachbeiträge leistbar, die zusammengekommen, zur Aufstellung bzw. Qualifizierung eben jener Standpunkte beitragen können.

Ganz praktisch zeigt das amerikanische Vorgehen auch für Deutschland Wege des Eintritts in die neue Phase der Bioraffinerie-Technologie. Solche wären z.B.:

- die Erhöhung der Produktion von Stoffen auf der Basis biogener Rohstoffe in den laufenden Anlagen, der Zellstoff-, Stärke-, Zucker- und Pflanzenölerzeugung,
- die Einführung und der Betrieb von Bioraffinerie-Demonstrationsanlagen auf der Basis regionaler landwirtschaftlicher Überschussprodukte,
- Maßnahmen des Bundes und der Länder zur Förderung der Marktgängigkeit von Bioprodukten,
- die Schaffung innovations- und investitionsfreundlicher Bedingungen für die Einführung und Nutzung der neuen Technologien.

Auch sind die riesigen Chancen, die die Chemie in diesen neuen Technologiefeldern hat, u.E. noch zuwenig erkannt. Dies ist um so bedauerlicher, da sich die Chemie, im besonderen die Organische Chemie eigentlich auf ihrem ureigensten Arbeitsgebiet befinden sollte.

Teltow • Potsdam im Juli 2001

## Literaturverzeichnis

- [ 1] KAMM, B.; KAMM, M.; SOYEZ, K. (eds.); Die Grüne Bioraffinerie/The Green Biorefinery. Technologiekonzept. 1<sup>st</sup> International Symposium Green Biorefinery/Grüne Bioraffinerie, Oct. 1997, Neuruppin, Germany. Proceedings [Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5]
- [ 2] NARODOSLAWSKY, M. (ed.); Green Biorefinery. 2<sup>nd</sup> International Symposium Green Biorefinery, October, 13-14, 1999, Feldbach, Austria. Proceedings [SUSTAIN, Verein zur Koordination von Forschung über Nachhaltigkeit, Graz TU , Austria, **1999** ]
- [ 3] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC, USA); Biobased Industrial Products: Priorities for Research and Commercialization [National Academic Press, Washington D.C., **2000**, ISBN 0-309-05392-7]
- [ 4] US-PRESIDENT; Developing and Promoting Biobased Products and Bioenergy. **Executive Order 13101/13134**, [ William J. Clinton, The White House, August 12, 1999 ] [www.newuse.org/EG/EG-20/20BioText.html](http://www.newuse.org/EG/EG-20/20BioText.html)
- [ 5] US-CONGRESS; Biomass Research and Development. **Act of 2000**, Jun, 2000
- [ 6] GRIFFITHS, M.; WALD, S.; Biotechnology for Industrial Sustainability. OECD, STI, Review No.25, **1999**
- [ 7] RINGPFEIL, M.; Biobased Industrial Products and Biorefinery Systems – Industrielle Zukunft des 21. Jahrhunderts? *Brandenburgische Umwelt Berichte*, BUB **10** (2001) ISSN 1434-2375 im Druck, [Vorabdruck unter download [www.biopract.de](http://www.biopract.de) ]
- [ 8] CAMPBELL, C.J. (Amoco, American Oil Company); Peak Oil. Lecture at the Technical University of Clausthal. [Clausthal, **2000**, [www.geologie.tu-clausthal.de/](http://www.geologie.tu-clausthal.de/) Campbell/index.html]
- [ 9] SCHINDLER, J.; ZITTEL, W.; Weltweite Entwicklung der Energienachfrage und der Ressourcenverfügbarkeit. Öffentliche Anhörung von Sachverständigen durch die Enquête Kommission des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ Schriftliche Stellungnahme. [OttoBrunn, Oct. **2000**, [www.energiekrise.de](http://www.energiekrise.de) ]
- [10] BIOMASS RESEARCH AND DEVELOPMENT BOARD (USA); Fostering the Bioeconomic Revolution in Biobased Products and Bioenergy - an Environmental Approach" Final Draft of an Interagency Strategic Plan, Dec. **2000**
- [11] DOERING, CH.; (Reuters Environment News Service); US looks to biobased products to help farmers. [ [www.Planetark.org/dailynewsstory.cfm?newsid=9911](http://www.Planetark.org/dailynewsstory.cfm?newsid=9911) , 26 Feb. **2001** ]
- [12] NATIONAL CORN GROWERS ASSOCIATION (NCGA, USA); Plant/Crop-based Renewable Resources 2020: A Vision to Enhance U.S.-Economic Security through Renewable Plant/Crop-based Resources Use [NCGA-paper DOE/GO-10097-385, **1998**] 25 pp.
- [13] VAN DYNE, D.L.;BLASÉ, M.G.; CLEMENTS, L.D.; A Strategy for returning agriculture and rural America to long-term full employment using biomass refineries. In: Perspectives on new crops and new uses. [J. Janeck (ed.). ASHS Press, Alexandria, VA, USA, **1999**] p. 114-123
- [14] KAMM, B.; KAMM, M.; RICHTER, K.; LINKE, B.; STARKE, I.; M. NARODOSLAWSKY, M.; SCHWENKE, K.-D.; S. KROMUS, S.; FILLER, G.; M. KUHN, M.; LANGE, B.; LUBAHN, U.; SEGERT, A.; ZIERKE, S.; Grüne BioRaffinerie Brandenburg - Beiträge zur Produkt- und Technologieentwicklung sowie Bewertung. *Brandenburgische Umwelt Berichte*, BUB **8** (2000) 260-69, ISSN 1434-2375

- [15] KAMM, B.; KAMM, M.; The Green Biorefinery – Principles, Technologies and Products, In: Green Biorefinery, 2<sup>nd</sup> International Symposium Green Biorefinery, October, 13-14, 1999 [SUSTAIN, Verein zur Koordination von Forschung über Nachhaltigkeit (Hrsg.), Feldbach, Austria, **1999** ] S. 46-69
- [16] SLADE, R.E.; BIRKINSHAW, J.H. (ICI ); Improvement in or related to the utilization of grass and other green crops. *Brit. Pat.* **BP 511,525** (1939)
- [17] PIRIE, N.W.; *Chem. Ind.*, **61** (1942) 45 und *Nature*, **149** (1942) 251
- [18] PIRIE, N.W.; Leaf protein: a beneficiary of tribulation. *Nature*, **253** (1975) 239-241
- [19] SCHWENKE, K.-D.; Eiweißquellen der Zukunft [Aulis-Verlag Deubner, Köln, **1985**, ISBN 3-7614-0858-7] pp. 82
- [20] KNUCKLES, B.E.; BICKOFF, E.M.; KOHLER, G.O.; *J. Agri. Food Chem.*, **20** (1972) 1055
- [21] SHEN, S.; Biological Technologies for a Sustainable Production of Biomass. In: Biodiversity [E.O. Wilson (ed.), National Academy Press, Washington, D.C, **1988**] 404 ff.
- [22] HEIER, W.; *Grundlagen der Landtechnik* **33** (1983) 45-55
- [23] CARLSSON, R.; Trends for future applications green crops. In: Forage Protein Conservation and Utilization. [Proceedings of EFC Conf., Dublin, Ireland ,**1982**] 57-81
- [24] KAMM, B.; KAMM, M.; SOYEZ, K.; Die Grüne Bioraffinerie-Ein ökologisches Technologiekonzept. In: Die Grüne Bioraffinerie, Proc. 1. Symp. Grüne Bioraffinerie, 1997, Neuruppin [Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5] 4-17
- [25] CARLSSON, R.; Green Biomass of Native Plants and new Cultivated Crops for Multiple Use: Food, Fodder, Fuel, Fibre for Industry, Photochemical Products and Medicine. In: New Crops for Food and Industry [Wickens et al. (ed.), Chapman and Hall, London, **1989**].
- [26] KAMM, M.; KAMM, B.; Pflanzliche Aminosäuren als Chemierohstoff. In: Die Grüne Bioraffinerie. Proc. 1. Symp. Grüne Bioraffinerie, 1997, Neuruppin [ Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5] 150-184
- [27] HACKING, A.J.; The American wet milling industry. In: Economic Aspects of Biotechnology [Cambridge University Press, New York, **1986** ] 214-221
- [28] MORRIS, D.J.; AHMED, I.; The Carbohydrate Economy: Making Chemicals and Industrial Materials from Plant Matter. [Biotechnology Institute of Local Self Reliance, Washington D.C. **1992** ]
- [29] SZMANT, H.H.; Industrial Utilization of Renewable Resources. [Technomic Publishing, Lancaster, Pa.; **1987** ]
- [30] RICHTER, K.; KAMM, B.; KAMM, M.; Biotechnologische Erzeugung von Milchsäure und Aminiumlactaten aus Getreidestärke In: Biokonversion Nachwachsender Rohstoffe Bd. 10 [Landwirtschaftsverlag Münster, **1997**, ISBN 3-7843-2926-8] 293-315
- [31] DANNER, H.; BROWN, R.; Biotechnology for the production of commodity chemicals from biomass. *Chemical Society Reviews*, **6** (1999)
- [32] SINSKEY, A.J.; Organic Chemicals from Biomass: An Overview In: Organic Chemicals from Biomass [ D.L. Wise (ed.), Benjamin Publishing Comp., Inc., London, **1983**] 1-66
- [33] FRITSCHKE, W.; Alkoholgärung In: Biochemische Grundlagen der Industriellen Mikrobiologie. [Gustav Fischer Verlag, Jena, **1978** ] S. 80-84

- [34] KUSTER, B.F.M.; 5-Hydroxymethylfurfural (HMF). A Review Focussing on its Manufacture. *starch/stärke*, **42** (1990) 314-321
- [35] COSGROVE, D.J.; Loosening of plant cell walls by expansins. *Nature* **407** (2000) 321-326
- [36] OSTEROTH, D.; Von der Kohle zur Biomasse. Chemierohstoffe und Energieträger im Wandel der Zeit. [Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, **1989**, ISBN 3-540-50712-4 ]
- [37] GRASSI, G.; et al (Eds.); Biomass for Energy and Industry. 4th E.C. Conference. [Elsevier Applied Science, London and New York, **1987**]
- [38] GERHARDT, M.; et al; Bacterial CO utilization with H<sub>2</sub> production by the strictly anaerobic lithoautotrophic thermophilic bacterium *Carboxydotherrmus hydrogenus* DSM 6008 isolated from a hot swamp. *FEMS Microbiology Letters*, **83** (1991), 267-272
- [39] SAHM, H.; Biologie der Methan- Bildung. *Chem. -Ing. Tech.*, **53** (1981) 854-858
- [40] LINKE, B.; Anaerober Abbau von Biomasse- Grundlagen, Verfahren und Ergebnisse *Brandenburgische Umwelt Berichte*, BUB **10** (2001) ISSN 1434-2375 im Druck
- [41] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Energy, Environmental, and Economics (E<sup>3</sup>) Handbook -A Resource Tool to Aid the Office of Industrial Technologies First Edition – **1997-2001** [ <http://www.oit.doe.gov/E3handbook> ]
- [42] U.S. DEPARTMENT AGRICULTURE (USDA); Biobased Products Coordination Council (BPCC). List of biobased products. [<http://www.usda.gov/energyandenvironment> ], **2000**]
- [43] ARGE Grüne BioRaffinerie Brandenburg (Hrsg.); Die Grüne BioRaffinerie- Entwicklung und Etablierung eines Systems „Grüne BioRaffinerie“ in der Region Havelland. BMBF-Vorlage [Teltow-Selbelang, **1999**] 30 Seiten, (zu beziehen über B. Kamm, 03328-46531, Teltow)
- [44] KROMUS, S.; A Concept of a Decentralised Green Biorefinery for the Austrian Region of Feldbach. In: Green Biorefinery. 2<sup>nd</sup> International Symposium Green Biorefinery, October, 13-14, 1999, [SUSTAIN, Verein zur Koordination von Forschung über Nachhaltigkeit (Hrsg.), Feldbach, Austria, **1999** ] S. 32-45
- [45] KIEL, P.; The Green Biorefinery in Denmark - Utilisation of green and brown juice as fermentation media. -Ibid-
- [46] KIEL, P.; Technology-development of the Green Biorefinery. In: Die Grüne Bioraffinerie. Proc. 1. Symp. Grüne Bioraffinerie, 1997, Neuruppin [Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5] 101-107
- [47] GRASS, S.; HANSEN, G.; SIEBER, M.; MÜLLER, P.H.; Production of Ethanol, Protein Concentrate and Technical Fibers from Clover/Grass. In: Die Grüne Bioraffinerie. Proc. 1. Symp. Grüne Bioraffinerie, 1997, Neuruppin [Berlin, **1998**, ISBN 3-929672-06-5] 116-119

## Anmerkungen

- Anmerkung 1** **Ölproduktion:** Seit Mitte der 60ziger Jahre wird tendenziell immer weniger Öl gefunden. Seit etwa 20 Jahren können die Funde den Verbrauch nicht mehr ausgleichen. Der Übergang von tendenziell zunehmender zu tendenziell abnehmender Produktion ist der Zeitpunkt, an dem die Endlichkeit der Ressourcen sich auch auf den Märkten spiegelt (Veränderung des Investitionsverhaltens). Das Erreichen des weltweiten Fördermaximums ist der richtige Indikator für kommende Strukturbrüche und nicht die Reichweite von Ölreserven. Das Maximum der Ölproduktion außerhalb der heutigen OPEC-Staaten wird um das Jahr 2000 erfolgen und wurde möglicherweise schon überschritten. Vermutlich zwischen 2005-2010 (vielleicht auch früher) werden auch die OPEC-Staaten ihr Fördermaximum erreichen. (Auszüge aus [9])
- Anmerkung 2** **Old growth timber:** The term 'old growth timber' means timber of a forest from the late successional stage of forest development. The forest contains live and dead trees of various sizes, species, composition, and age class structure. The age and structure of old growth varies significantly by forest type and from one biogeoclimatic zone to another [4].

## Anschrift der Autoren

**Dr. Birgit Kamm** (\*correspond.)  
Universität Potsdam, Institut für Organische Chemie und  
Strukturanalytik,  
(Leiterin der FG BioOrganische Synthesechemie) und  
Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e.V. (biopos)  
(Mitglied des Vorstandes biopos e.V.)  
Forschungsstandort Teltow-Seehof  
Kantstraße 55, D-14513 Teltow  
Fon: 03328-46531, Fax: 03328-46524  
e-mail: [kamm@rz.uni-potsdam.de](mailto:kamm@rz.uni-potsdam.de), [office@biopos.de](mailto:office@biopos.de)  
url: <http://www.biopos.de>

**Dipl.-Chem. Michael Kamm**  
BioRefinery.de GmbH, Potsdam-Teltow (wiss.-techn. GF)  
Stiftstraße 2, D-14471 Potsdam  
Fon: 0331-96 82-0 oder 03328-309 561  
Fax: 0331-972 525  
e-mail: [office@biorefinery.de](mailto:office@biorefinery.de)  
url: <http://www.biorefinery.de>