

# Innovationspotentiale der fermentativen Gewinnung von Bioenergieträgern

Positionspapier der ProcessNet-Expertengruppe Bioenergie<sup>(1)</sup> bei der DECHEMA e.V., Frankfurt/Main:

K.-D. Bettien, Schwedt; M. Engelhart, Rossdorf; H. Friedmann, Pfaffenhofen; H. Märkl, Hamburg-Harburg; J. Michels, Frankfurt/M.; L. Popp, Neubrandenburg; W. Ranfft, Graz; H. Richter, Hermsdorf; P. Weiland, Braunschweig; J. Wiesner, Frankfurt/M.

Stand: März 2008

Inhalt	Seite
I. Einleitung .....	1
II. Ressourceneffizienz und ökonomische Anreize.....	2
III. Biogastechnologie .....	4
IV. Bioethanoltechnologie .....	8
V. Biobutanolgewinnung .....	12
VI. Literatur .....	14

## I. Einleitung

Steigende Preise für Benzin, Diesel und Erdgas erhöhen den Anreiz, durch vermehrten Einsatz von Bioenergie einen Teil der fossilen Energieträger zu substituieren und so deren Preisdruck zu mindern. Die Träger dieser Bioenergie sind Biomassen aus der Land- und Forstwirtschaft sowie Reststoffe aus deren Verarbeitung. Biomassen sind organische Verbindungen, die ursprünglich durch Photosynthese und Stickstofffixierung entstanden sind.

Allen Produktionsprozessen von Bioenergieträgern ist gemeinsam, dass sie ohne die Zufuhr von Luft (also anaerob) ablaufen. Die nachwachsenden Rohstoffe werden so zu Stoffwechselendprodukten umgesetzt (Methan, Wasserstoff, Ethanol oder Butanol), die unter anaeroben Bedingungen größtenteils nicht mehr weiterreagieren können, aber noch einen Großteil der Energie der Ausgangsstoffe besitzen. Die vollständige Umsetzung der Stoffwechselendprodukte geschieht erst abseits der Produktionsstätte der Bioenergieträger bei der energetischen Nutzung der Metabolite.

Dieses Positionspapier beleuchtet spezifisch das Innovationspotential der Anaerobtechnik zur Konversion nachwachsender Rohstoffe und zeigt den Forschungsbedarf in der Technologie und bei den Bewertungsmethoden der Bioenergie auf.

---

<sup>(1)</sup>Temporärer Arbeitskreis "ENTWICKLUNGSPOTENTIALE DER ANAEROBTECHNIK ZUR GEWINNUNG VON BIOENERGIE"; Vorsitzender: Dr.-Ing. Hans Friedmann, Pfaffenhofen

## II. Ressourceneffizienz und ökonomische Anreize

Wesentliche Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeit biogener Energieträger sind die verfügbaren Flächen und Flächenerträge, die Kosten der Bereitstellung und die Effizienz, mit der die Biomassen in nutzbare Sekundärenergieträger umgewandelt werden können (Konversion). Die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit unter den Bedingungen eines intensivierten Biomasseanbaus, z.B. durch Etablierung von Nährstoffkreisläufen und standortgemäße Bodenbewirtschaftung, stellt dabei eine wesentliche Forderung für die Zukunft dar.

Einige Denkanstöße für die Bewertung der Ressourceneffizienz wurden bereits in der F&E-Studie "INTEGRIERTE NUTZUNG NACHWACHSENDE ROHSTOFFE" (DECHEMA 2006) aufgezeigt. Diese Studie belegte die engen Grenzen der Biomasse-Ressourcen aus inländischem Anbau, bezogen auf den Energiebedarf unseres Landes. Legt man die von der FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE analysierten Flächenerträge an Kraftstoffäquivalenten zu Grunde, so liegt die Ressourceneffizienz der Bioenergieträger (Biodiesel, BtL-Kraftstoff, Bioethanol, Biomethan) zwischen 1 und 5 Tonnen Kraftstoff pro Hektar und Jahr. Insgesamt wurde die mögliche Substitutionsquote des derzeitigen Primärenergiebedarfs in Deutschland aus heimischen Ressourcen in der genannten Studie auf 11 – 13 % geschätzt. Vom SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN wurde diese kritische Einschätzung im jüngsten Sondergutachten KLIMASCHUTZ DURCH BIOMASSE erhärtet (SRU 2007).

Die ökonomischen Anreize zur Verwendung von Bioenergie wurden in Deutschland durch das ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ (EEG, 2004) gesetzt. Im Bereich der Bioenergien wird momentan nur die Verstromung von Biogas, Bioethanol oder Biobutanol gefördert. Andere Formen, z.B. die Einspeisung der Bioenergieträger in einen Netzverbund werden nicht berücksichtigt. Für Bioethanol und Biobutanol werden stattdessen Beimischungspflichten zu Ottokraftstoffen auferlegt. Diese Art der Bioenergieförderung hat sich jedoch als weniger erfolgreich herausgestellt, da jetzt teilweise Bioenergieträger – wegen der begrenzten Inlandsressourcen – über große Entfernungen nach Deutschland importiert werden. Eine Novellierung des EEG ist für Ende 2008 geplant, um die Fehlentwicklungen auf dem Bioenergiemarkt zu korrigieren.

Die MARKTANALYSE NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR 2006a) weist für 2006 einen Bestand von ca. 3.500 Biogasanlagen in Deutschland aus mit einer installierten elektrischen Leistung von 1.100 MW. SCHÜTTE (2005) rechnet bis 2010 mit einer Zunahme der Biogasanlagen in Deutschland bis in die Größenordnung von 10.000 Anlagen und prognostiziert dafür einen verstärkten Anbau von Energiepflanzen, entsprechend einem Bedarf von etwa 2 bis 2,5 Mio ha Ackerfläche.

Die Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe lag in 2006 nach der aktuellen Analyse des SRU (SRU 2007) bei insgesamt 1,6 Mio ha, mit einem Anteil von 1,1 Mio ha für den Anbau von Raps (Biodiesel) und von 0,3 Mio ha für Energiepflanzen (Mais etc.). Der Rest von 0,2 Mio ha entfiel auf den Anbau von Pflanzen zur stofflichen Nutzung. Das WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA UMWELT ENERGIE schätzt in einer Studie vom Nov. 2005 (RAMESOHL et al. 2005) das maximale Potential an Biogas für 2030 auf 165,8 Mrd kWh/a (entsprechend 18.900 MW Heiz- und elektrischer Leistung) und das realistische Potential auf 100 Mrd kWh/a (11.400 MW), was einem Anteil von ca. 10,4 % des derzeitigen Erdgasverbrauchs entspräche. Zu Grunde gelegt wurde hier der Anbau von Energiepflanzen auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von 1,6 Mio ha.

**Bioethanol** gewinnt sowohl als Zusatz für Ottokraftstoffe (EU BOKRAFTSTOFFRICHTLINIE, 2003) als auch als potentielle Plattformchemikalie der chemischen Industrie im Nach-Erdölzeitalter an Interesse. Bereits heute handelt es sich bei Bioethanol, der Aussage des europäischen Parlamentes nach, um die weltweit am häufigsten verwendete alternative Energiequelle für Kraftfahrzeuge, was in erster Linie auf die Entscheidung Brasiliens zur

Herstellung von Alkoholkraftstoff aus Zuckerrohr, aber auch auf die Verwendung von Bioethanol als Oktanzahlverbesserer für Benzin in Nordamerika zurückzuführen ist. Kraftstoff-Ethanol-Mischungen finden weltweit in vielen verschiedenen Mischverhältnissen Verwendung:

Wasserhaltiger Ethanol (Alcool/ Brasilien)	95,5 Vol.- % Ethanol
E85 (Nordamerika, Schweden)	85,0 Vol.- % Ethanol
Gasoline (Brasilien)	24,0 Vol.- % Ethanol
E10 (Gasohol, Nordamerika)	10,0 Vol.- % Ethanol
Oxygenated fuel (USA)	7,6 Vol.- % Ethanol
Reformulated gasoline (USA)	5,7 Vol.- % Ethanol
Biodiesel (Schweden)	15,0 Vol.- % Ethanol

In Deutschland wird Bioethanol im Kraftstoffsektor (Absatzmarkt 2006: ca. 100.000 m<sup>3</sup>) bislang weit überwiegend in Form von ETBE anstelle von MTBE (durch Umsetzung von Ethanol mit petrochemisch produzierten Iso-Buten) eingesetzt (FNR 2006a). Alle MTBE-Anlagen in Deutschland sind mittlerweile auf ETBE umgestellt. Entsprechend den gültigen Normen sind bis zu 15 % ETBE-Beimischung im Vergaserkraftstoff möglich (FNR 2006b). Dominiert wird die weltweite Bioethanolproduktion von Brasilien und der USA, die im Jahr 2005 ca. 44,9 Mrd Liter Bioethanol herstellten. Die Herstellkosten für brasilianischen Alkohol sind durch den Einsatz des Rohstoffes Zuckerrohr auf einem so niedrigen Niveau, dass nach Addition der Importzölle und der Kosten für den Transport dieser Ethanol für unter 40 Cent/L auf den europäischen Markt gelangt. Deshalb steht die Ethanolindustrie vor der Herausforderung, in die Verbesserung des Herstellungsprozess zu investieren, während sie durch die Dumpingpreise der Brasilianischen Ethanolexporte gleichzeitig unter Druck steht.

**Biobutanol** ist – ebenso wie Bioethanol – für die stoffliche Nutzung als Plattformchemikalie in der chemischen Industrie von Interesse. Darüber hinaus weist Biobutanol als Kraftstoff hervorragende Eigenschaften auf und eignet sich für den Einsatz in vorhandenen Motoren und Verteilungssystemen. Für die fermentative Gewinnung von Biobutanol aus Kohlenhydraten zeichnet sich in jüngster Zeit ein zunehmendes internationales Interesse der Industrie zur Weiterentwicklung der bereits Anfang des letzten Jahrhunderts großtechnisch betriebenen ABE-Fermentation (Aceton, Butanol Ethanol) ab. Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die Produktpalette der konventionellen ABE-Fermentation weitestgehend auf die Seite des Butanols zu verschieben (DÜRRE, 2007). Eine aktuelle Wirtschaftlichkeitsuntersuchung hat ergeben, dass die Produktion von Biobutanol auf der Basis nachwachsender Rohstoffe in Europa beim derzeitigen Rohölpreis, auch unter Einbezug der Besteuerung, bereits in Kürze wettbewerbsfähig sein sollte (FESTEL CAPITAL, unveröffentlicht). Die Planung von neuen Anlagen in China, Großbritannien und den USA ist bekannt.

Die Entwicklung der Weltmarktpreise für Agrarprodukte in 2007 hat deutlich gemacht, dass die eingangs erwähnte Hoffnung auf eine günstigere Entwicklung der Agrarpreise im Vergleich zum Rohöl wegen der konkurrierenden Nachfrage um Nahrungs- und Futtermitteln auf dem Weltmarkt widerlegt worden ist. Dies verstärkt das Interesse an technologischen Entwicklungen zur Steigerung der Nutzungs- bzw. Energieeffizienz beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe und an solchen Roh- und Reststoffen, die eine Entkopplung dieses Zielkonflikts ermöglichen.

## III. Biogastechnologie

### III.1 Motivation, Stand der Technik

Vor dem Hintergrund der Forderung nach der verstärkten Nutzung regenerativer Energien zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Energieträgern hat in den vergangenen Jahren die landwirtschaftliche Biogasgewinnung immer mehr zugenommen. Biogasanlagen sind aus energiepolitischer und ökonomischer Sicht sinnvoll. Sie ermöglichen die Verwertung der verschiedenartigsten landwirtschaftlichen Roh- und Reststoffe und tragen über die Nutzung der Gärrückstände als organischer Dünger gleichzeitig zu einer Ressourcen schonenden Kreislaufwirtschaft bei.

Die Prozesskette nach dem Stand der Technik umfasst generell die Stufen:

1. Substratvorbehandlung und Lagerung (z.B. Zerkleinerung, Homogenisierung, Silierung etc.)
2. Vergärung der Substrate in Fermentern und deren vollständige Umsetzung zu biologisch inerten Gärresten
3. Biogasaufbereitung und -Verwertung (Aufreinigen des Methans und Einspeisung ins Erdgasnetz oder thermische Verwertung in Brennern oder BHKW)
4. Gärrestlagerung und Gärrestaufbereitung (wässrige und feste Phase) mit dem Ziel einer weitgehenden Rückführung der Nährstoffe

Die umfangreichste Erfahrung besteht auf dem Gebiet der Anaerobbehandlung biologisch gut abbaubarer Abläufe und Reststoffe der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie mit gelösten und leicht hydrolysierbaren Inhaltsstoffen. Hier geht die Entwicklung zu immer leistungsfähigeren Reaktoren mit stabiler Prozessführung, effizienter Schlammrückhaltung und Gasabführung sowie Ausdehnung des Anwendungsbereichs.

Bei der Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Biomassen wird in Zukunft der Einsatz von Energiepflanzen steigende Bedeutung erlangen (Maissilage, Hohertragsagarpflanzen), aber auch der Einsatz von Mischsubstraten aus Energiepflanzen und biogenen Reststoffen. Generell werden bei der zunehmenden Nutzung nachwachsender Rohstoffe auch vermehrt organische Rest- und Nebenprodukte anfallen, die für eine weitere Verwertung oder die Biogasgewinnung zur Verfügung stehen. Eine optimale wirtschaftliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist nur dann gegeben, wenn eine möglichst vollständige Nutzung des energetischen und stofflichen Potentials der eingesetzten Rohstoffe erreicht wird. Für diese integrierte Nutzung stellt die Biogasgewinnung eine wichtige Option dar.

Trotz langjähriger Erfahrungen mit der Anaerobtechnik im Abwasserbereich hat sich allerdings gezeigt, dass sie für eine optimale Nutzung nachwachsender Rohstoffe noch Entwicklungsdefizite aufweist, die wegen des großen Marktpotentials so rasch wie möglich behoben werden sollten.

### III.2 Innovationspotentiale und F&E-Bedarf

Moderne Biogasanlagen können ohne erhöhte Einspeisevergütungen noch nicht wirtschaftlich arbeiten. Langfristiges Ziel muss es sein, Biogasanlagen auch ohne Subventionen wirtschaftlich zu machen. Hierfür können eine Reihe von Ansätzen verfolgt werden.

**Forschungsziele:**

- Erhöhung der Prozessstabilität von Biogasreaktoren
- Entwicklungen zur Anlagensteuerung (Mess- und Sensortechnik)
- Optimierung der Prozessführung bei hohen Feststoffgehalten im Fermenter
- Nährstoffrecycling, ökologisch/ökonomisch optimale Reststoffverwertung
- Hochleistungsbiogasreaktoren für weitgehend feststofffreie Substrate
- Sicherstellung einer klima- und umweltfreundlichen Prozessführung und Anlagentechnik
- Innovative Ansätze zur Nutzung von Biogas

### III.2.1 Optimierung der Anlagen

Konventionelle Biogasanlagen werden auf  $\text{oTS}^{(2)}$ -Raumbelastungen von  $3,5 \text{ kg}_{\text{oTS}}/(\text{m}^3 \times \text{d})$  ausgelegt. Diese Grenze ist auch für die Erlangung des Technologiebonus nach dem EEG erforderlich. Der aktuelle Stand der Technik bei Neuanlagen liegt bei  $10 \text{ kg}_{\text{oTS}}/(\text{m}^3 \times \text{d})$ . Ziel der kommenden Forschungsaktivitäten muss es sein, diesen Wert noch weiter zu steigern. Bestehende Anlagen können so gegebenenfalls mehr Strom und Wärme erzeugen; Neuanlagen werden kleiner – die Investitionskosten sinken.

Um die Betriebskosten zu senken, müssen die Umsetzungsgrade und damit die Gaserträge weiter erhöht werden. Die Erhöhung der Gaserträge reduziert gleichzeitig auch noch das Nachgärpotential und vermeidet so spätere Methan-Emissionen aus dem Gärrückstand.

Speziell im Bereich der technisch anspruchsvolleren Trockenfermentationen, bei der das feste, stapelbare Substrat nicht mit Wasser angemaischt wird, ist eine weitere Entwicklung der Rührertechnik notwendig, um eine kontrollierte Umsetzung im Reaktor bei den erhöhten Feststoffkonzentrationen zu gewährleisten.

### III.2.2 Optimierung des Fermentationsprozesses

Das größte Optimierungspotential besteht sicherlich in der Entwicklung einer billigen und robusten Mess- und Kontrolltechnik für Biogasanlagen. Die Technik muss im landwirtschaftlichen Alltag praxistauglich und in der Lage sein eventuelle Störungen in der Mikrobiologie zu erkennen, bevor der Reaktor versäuert und damit der Biogasprozess oft irreversibel zum Erliegen kommt.

In den letzten Jahren war eine Entkopplung zwischen dem Wissens- und Methodenzuwachs der Mikrobiologie (z.B. im Bereich der Pharmazie) auf der einen Seite und dem Wissens- und Methodenzuwachs im Bereich der Mikrobiologie des Biogasprozesses auf der anderen Seite zu beobachten. Neueste mikrobiologische und numerische Technologien, die in der industriellen Biotechnologie Eingang gefunden haben, werden bisher nicht für den Biogasprozess angewandt. Prozessmodelle, die eine Voraussage einer Systemreaktion ermöglichen, basieren häufig auf Methoden und Daten, die älter als 20 Jahre sind. Es gibt zur Zeit keine Biogasprozessmodelle, die auf die Methoden der Genomics, Metabolomics, Prote-

---

<sup>(2)</sup> oTS - organische Trockensubstanz

omics, der Bioinformatics zurückgreifen oder das *Quorum sensing*<sup>(3)</sup> berücksichtigen. Es wäre wünschenswert, diese Lücke in der Grundlagenforschung in Deutschland zumindest im wissenschaftlichen Bereich zu schließen.

### III.2.3 Reststoffverwertung und Nährstoffrecycling

Die anaerobe Konversion von Biomassen führt zu einer weitgehenden Mineralisierung des organisch gebundenen Stickstoffs, jedoch bleibt der Gesamtstickstoffgehalt der Gülle nahezu unverändert. Die Mineralisierung des organisch gebundenen Stickstoffs führt dazu, dass eine pflanzenbedarfsgerechte Düngung durchgeführt werden kann, da der mineralische Stickstoff unmittelbar pflanzenverfügbar ist. Gleichzeitig besteht hierdurch jedoch die Gefahr, dass bei unsachgemäßer Ausbringung (z. B. bei Sonnenschein, keiner bodennahen Ausbringung und Einarbeitung) erhöhte Ammoniakemissionen entstehen, die klimaschädigend sind und sauren Regen verursachen können. Auf der anderen Seite bietet die Umwandlung des organisch gebundenen Stickstoffs in  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$  die Möglichkeit, durch Luft- bzw. Dampfstrippung den Stickstoff abzutrennen, um daraus einen handelsfähigen Flüssigstickstoffdünger zu produzieren.

Gülle stellt grundsätzlich eine wertvolle Nährstoffressource dar, die auch unter dem Gesichtspunkt der hohen Energieaufwendungen für die Herstellung von mineralischen Düngern unbedingt nutzbringend eingesetzt werden muss. Das Problem der Nährstoffverfrachtung in Grund- und Oberflächenwasser steht ursächlich mit einer unsachgemäßen Anwendung im Zusammenhang.

Der Gärrest aus der Biogasanlage enthält neben mineralischem Stickstoff auch sämtliche Phosphor- und Spurenelementverbindungen des Substrates. Dazu kommen je nach Prozessführung gegebenenfalls noch die Schwefelverbindungen aus dem Substrat. Der Gärrest stellt daher einen hochwertigen und natürlichen Dünger dar. Entwicklungspotentiale liegen hier bei der Entwässerungs- und Aufkonzentrierungstechnik des Düngers, um die Ausbring- und Transportkosten des Düngers auf das Feld zu reduzieren. Diese Kosten sind ebenfalls ein großer Teil der Betriebskosten einer Biogasanlage.

Akademische Forschung ist in diesem Bereich nötig, um die Bedürfnisse des Bodens an den Dünger herauszuarbeiten und gegebenenfalls den Biogasprozess so anzupassen, dass eine optimale Versorgung des Bodens mit allen beteiligten Stoffen gewährleistet ist. Die Vermeidung von Nährstoffanreicherung im Boden ist dabei ebenso ein wichtiges Ziel wie der Erhalt des Humusgehalts (SRU 2007).

Weiterhin hohes Interesse besteht in einer fundierten und nicht durch wirtschaftliche oder sonstige Interessen verzerrten Darstellung von Ökobilanzen für Biogasanlagen im Rahmen einer langfristigen akademischen Studie. Mithilfe dieser Studie können zum Beispiel sinnvolle Größen für Biogasanlagen ermittelt werden. Nachhaltigkeit und ökonomisches Interesse führen so gemeinsam zum gleichen Ziel.

### III.2.4 Hochleistungsbiogasanlagen für industrielle Anwendungen

Hierbei geht es um Prozesswasserströme aus der organischen Synthesechemie, bei der nachwachsende Rohstoffe als Ausgangsstoffe Verwendung finden. Stand der Technik auf diesem Gebiet sind Hochbau-Reaktoren für hoch belastete Prozesswasserströme mit sehr

---

<sup>(3)</sup> *Quorum sensing*: Koordiniertes Verhalten von Mikroorganismen als Reaktion auf eine Änderung von Umweltbedingungen

geringen Feststoffkonzentrationen und einem sehr spezifischen Substratspektrum. Die Reaktoren werden sehr schnell durchströmt, so dass sich Aufenthaltszeiten einstellen, die unter der Generationszeit der verwendeten Mikroorganismen liegen. Aus diesem Grund besitzen alle Hochlastreaktoren eine Biomasserückhaltung (MÄRKL und FRIEDMANN 2005).

Neue biotechnologische Prozesse auf der Basis nachwachsender Rohstoffe stellen neue Anforderungen an Anaerobreaktoren zur energetischen Nutzung der anfallenden Prozesswasserströme. Ziel der Vergärung muss die Nutzung des ganzen stofflichen und energetischen Potentials der Ausgangsstoffe und damit der Reduktion von Umweltbelastungen sein. Große Potentiale liegen im Bereich der Prozessentwicklung. Hier sind die Vermeidung von Sekundärproduktströmen und die Reduktion des Einsatzes von Hilfsstoffen, Säuren, Laugen oder Flockungshilfsmitteln zu nennen. Insbesondere die engere Verflechtung des Hochleistungsbiogasreaktors in der Abwasserstrecke mit dem eigentlichen Produktionsprozess stellt ein großes Prozessoptimierungspotential dar.

Auf der Forschungsseite wäre das Entwickeln neuerer Hochleistungsanlagen mit volumenspezifischen Raumbelastungen größer als  $30 \text{ kg}_{\text{CSB}} / (\text{m}^3 \times \text{d})$  interessant.

### **III.2.5 Sicherstellung einer nachhaltig klima- und umweltfreundlichen Anlagentechnik**

Da bereits ein Verlust von 5 % des gebildeten Methans den Klimavorteil der Anaerobtechnik gegenüber der Verbrennung einer entsprechenden Menge an fossilem Kohlenstoff wettmacht, kommt der Vermeidung von Methanverlusten bei der Biogasgewinnung – angesichts der stark zunehmenden Zahl von Biogasanlagen in der Landwirtschaft – eine große Bedeutung zu. Auch ökonomisch stellen Methanverluste eine Verschlechterung der Ressourceneffizienz dar.

Ammoniakemissionen sind nicht nur aus Gründen der Geruchsbelästigung zu vermeiden, sondern sind auch eine wesentliche Quelle für die Bildung sekundärer Feinpartikel (als Sulfat oder Nitrat).

Als potentielle Emissionsquellen kommen vor allem offene Gärrestlager in Betracht, aber auch andere Anlagenbereiche, z.B. die Substratlagerung und -aufbereitung, Undichtigkeiten im Gärbehälter, an Leitungen und im Gasspeicher. Zur Erkennung und Minimierung potentieller Emissionen an klima- und umweltrelevanten Gasen sollten daher praxisorientierte Forschungsarbeiten durchgeführt werden:

- Entwicklung einer einfach zu handhabenden Sensorik zur Erkennung von Methanverlusten,
- Monitoring von Praxisanlagen,
- Untersuchung und Standzeitprüfung von Abdeckmaterialien,
- Untersuchung des Methanausgasungspotentials des Gärrests in Praxisanlagen,
- Bilanzierung der Gasemissionen des Gesamtprozesses,
- Ableitung technischer Maßnahmen zur Minimierung der Verluste.

Auch bei der Ausbringung von Gärresten auf landwirtschaftliche Flächen können klimawirksame Emissionen (Methan, Lachgas) entstehen.

Die unzureichende Datenlage für die ökologische Bewertung von Biogasanlagen und der daraus resultierende Forschungsbedarf werden auch in der von der FAL (jetzt: vTI), Braunschweig, durchgeführten Studie "Ergebnisse des Biogasmessprogramms" (FNR 2005) hervorgehoben.

## IV. Bioethanoltechnologie

### IV.1 Motivation, Stand der Technik

Bioethanolanlagen in unseren Breitengraden werden vor allem mit Getreide, bevorzugt mit Weizen, Mais und Gerste betrieben. In geringem Umfang kommen auch Roggen und Triticale, stärkehaltige Wurzeln, z.B. Kartoffeln, sowie direkt fermentierbare zuckerhaltige Substrate, z.B. Rüben- und Zuckerrohrmelasse oder Dicksäfte aus der Zuckerherstellung, zum Einsatz. Nach Vorbereitung des Rohstoffes (Lagerung/Reinigung, Vermahlung, Anmaischung, Jet-Kocher) folgen der enzymatische Aufschluss und Abbau der Kohlenhydrate zu vergärbaren Mono-, Di- und Trisacchariden, die nachfolgend durch Fermentation zu Alkohol umgesetzt werden. Um einen hohen Umsatz zu gewährleisten, müssen die Aufschlussbedingungen der Rohstoffzusammensetzung angepasst werden.

Im Downstream-Teil des Prozesses wird der Alkohol aus der ca. 11 %-igen Maische abgetrennt (Destillation/Rektifikation) und aus dem anfallenden Azeotrop durch "Entwässerung" auf über 99,5 % "absolutiert". Der Reststoff aus der Destillation, die Schlempe, andererseits kann entweder entsorgt oder auf unterschiedlichen Arten weiter aufgearbeitet werden.

Für den Fermentationsprozess von Bedeutung sind, neben dem Stärkeanteil, der Gehalt an Proteinen sowie die Anteile an so genannten Gummistoffen (Pentosane, Glucane), welche hauptsächlich beim Stärkeaufschluss als Verursacher hoher Produktviskositäten eine Rolle spielen.

Um eine einseitige Importabhängigkeit bei Bioethanol zu vermeiden, sollten die umfangreichen, in Deutschland vorhandenen Erfahrungen auf dem Gebiet der fermentativen Alkoholgewinnung genutzt und auf die Möglichkeiten der Prozessintensivierung – unter Einbeziehung der gesamten Stoff- und Energieströme – geprüft werden.

Die erste Aufreinigungsstufe besteht aus dem Beer-Stripping, in dem die Feststoffe aus der Fermentation zusammen mit einem Teil des Prozesswassers am Sumpf abgetrennt werden. Über Kopf des Beer-Strippers wird ein Ethanol/Wasser-Gemisch mit einer Ethanolkonzentration von 40 – 45 wt.-%<sup>(4)</sup> abgezogen und einer Rektifikation zugeführt, in der das Ethanol maximal auf die azeotrope Konzentration (95,6 wt.-% bei Normaldruck) des Stoffsystems Ethanol/Wasser entwässert werden kann.

Die weitere Aufreinigung auf Produktspezifikationen von 99,6 – 99,95 wt.-% erfordert dagegen aufwendige thermische Sonderverfahren. Standardmäßig verwendet man für das Stoffsystem Ethanol/Wasser in der Azeotrop-Rektifikation Benzol, Cyclohexan, Pentan oder Toluol als Zusatzkomponenten. Alternativ wird zunehmend in der Absolutierungsstufe nach der Rektifikation die Druckwechsel-Adsorption (PSA) an Molekularsieben eingesetzt. Dagegen kommen Membranverfahren zur Entwässerung mittels Pervaporation/Dampfpermeation international erst in Einzelfällen zur großtechnischen Anwendung (MITSUI-Anlage in Litauen).

Eine weitere Möglichkeit der Aufreinigung ist die Extraktion des Ethanols mit überkritischem CO<sub>2</sub> aus der wässrigen Lösung.

---

<sup>(4)</sup> wt.-% - Gewichtsprozent

Der Energieverbrauch verteilt sich in etwa hälftig auf beide Stufen der Alkoholseparation. Durch Verschaltung der einzelnen Prozessgruppen lässt sich der Energieeintrag erheblich minimieren, z.B. durch Nutzung der Trocknerbrüden als Heizmedium für die Eindampfung.

Einen wissenschaftlichen Überblick über Stand und Perspektiven der Ethanolfermentation, die einsetzbaren Biomasseressourcen, Mikroorganismen und Verfahren geben LIN und TANAKA (2006).

## IV.2 Innovationspotentiale und F&E-Bedarf

### Forschungsziele:

- Verbesserung der Verfahrenseffizienz im *Downstream Processing*: Membranverfahren zur Aufkonzentrierung und Absolutierung des Ethanols
- Innovationschancen durch Prozessintensivierung im Bereich des *Upstream Processing*
- Alternative Verfahren der Schlempeverwertung

### IV.2.1 Optimierung des Fermentationsprozesses

Nach einer Untersuchung von SCHMITZ (2005) im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe bietet die Konversion "das größte Optimierungspotential in der Erzeugungskette von der landwirtschaftlichen Produktion bis zur Verwendung im Kraftstoffsektor". Der Autor untersuchte dabei auch die Energie- und Treibhausgasbilanz von Bioethanolanlagen im internationalen Vergleich. Er kommt zu dem Ergebnis, dass die Gewinnung von Bioethanol gegenüber Benzin in allen Fällen mit einer Treibhausgasreduzierung verbunden ist, auch wenn die Ergebnisse im einzelnen stark von den verfügbaren Rohstoffen, der eingesetzten Technik und der energetischen Infrastruktur abhängen. Technologische Innovationspotentiale werden in dieser Studie allenfalls indirekt – aus dem Vergleich der unterschiedlichen Praxisanlagen – erkennbar.

#### IV.2.1.1 Weiterentwicklung der Fermentation zuckerhaltiger Rohstoffe

Verschiedene Hefen, Bakterien und Pilze sind in der Lage, Ethanol durch fermentativen Stoffwechsel von Kohlenhydraten zu produzieren. Obwohl das Bakterium *Zymomonas mobilis* und einige rekombinante *Escherichia coli*-Stämme, bezogen auf die Konversion des Zuckers in Ethanol, verschiedene Vorzüge aufweisen – z.B. eine um den Faktor 5 bis 6 schnellere Ethanol-Produktionsgeschwindigkeit und eine um etwa 5 % höhere Ethanol-Ausbeute im Vergleich zur Hefe – kommen in der großindustriellen Alkoholerzeugung bis heute vornehmlich Hefe-Kulturen zum Einsatz (*Saccharomyces cerevisiae*).

Bakterielle Gärverfahren würden zusätzlich die Chance eröffnen, neben Hexosen zum Teil auch Pentosen für die Alkoholgewinnung zu nutzen (wenngleich Mischsubstrate aus Glucose und Fructose zu einer geringeren Selektivität der Ethanolbildung führen als reine Glucose).

Bemühungen zur Umstellung auf bakterielle Gärverfahren mit *Zymomonas mobilis*, die sich unter Laborbedingungen als sehr aussichtsreich erwiesen hatten (SAHM 1987) scheiterten später in der Praxis daran, dass das Konkurrenzwachstum von Milchsäurebakterien nicht ebenso wirksam unterdrückt werden konnte, wie dies bei Einsatz von Hefen möglich ist. Durch Immobilisierung der Bakterien konnte jedoch ein sehr viel stabileres Betriebsverhalten erzielt werden (WEUSTER-BOTZ 1991). Durch Kaskadierung von zwei Wirbelschichtreaktoren

mit immobilisierten *Zymomonas mobilis* auf Sinterglaskugeln konnten in diesen Untersuchungen – bei Einsatz von B-Stärkehydrolysat – bis zu 99 % Umsatz und eine Raum-Zeit-Ausbeute von über 30 g/(l × h) erzielt werden. Auf Grund des damals konkurrenzlos günstigen Erdöls wurden diese Arbeiten in den 1990er Jahren jedoch nicht weitergeführt.

Gentechnische Entwicklungschancen werden insbesondere im Hinblick auf die Erhöhung der Ethanoltoleranz der Bakterien (auf > 12 %), die Erweiterung des Substratspektrums und die Erhöhung der Salztoleranz (z.B. für den Einsatz von Melasse) gesehen.

Die gleichzeitige Vergärung von Pentosen (neben Hexosen) zu Ethanol ist derzeit – insbesondere für den Einsatz von Hefen – ein international verfolgtes Forschungsthema. Besondere Aktivitäten sind aus den Niederlanden (Univ. Delft), Schweden (Univ. Lund) und Deutschland (Univ. Frankfurt/M.) bekannt. Hierbei geht es auch darum, biokatalytische Nebenreaktionen, die bekanntermaßen beim Einsatz von Fructose zu einer Verringerung der Ethanolausbeute führen, zurückzudrängen.

Die Fermentation von Rübenschnitzeln (anstelle des Zuckersaftes) mit Einsatz von Bakterien anstelle von Hefe würde eine Anhebung der Ethanolausbeute auf 91,6 % ermöglichen (SCHULZ und HEBECKER 2005). Dazu sind jedoch weitere Entwicklungsdefizite zu lösen:

- Verbesserung der Wärmeabfuhr aus der Feststoff-Fermentation
- Ethanolabtrennung aus den vergorenen Schnitzeln
- Biomasseabtrennung und -rückführung
- insbesondere: sterile Prozessführung

Bei allen künftigen Forschungsinitiativen zur Optimierung der Fermentation zuckerhaltiger Substrate zu Bioethanol sollten die umfangreichen Erfahrungen aus früheren Forschungsaktivitäten berücksichtigt werden!

#### **IV.2.1.2 Erhöhung der Ethanolverträglichkeit der eingesetzten Mikroorganismen**

Durch Erhöhung der Ethanolverträglichkeit der in der Fermentation verwendeten Hefen könnte die Alkoholkonzentration in der Maische erhöht und der zu entfernende Wasseranteil gesenkt werden. Der Prozess ließe sich auf diese Weise energiesparender und somit auch kostengünstiger durchführen, da gleichzeitig auch die vorgelagerten Prozessschritte von dem resultierenden höheren Trockensubstanzgehalt profitieren.

#### **IV.2.2 Optimierung des Upstream- und Downstream Processing**

Die destillative Abtrennung des Bioethanols aus der Maische bedingt mehr als die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs im Bioethanolprozess. Es muss daher das Bestreben sein, im *Upstream*-Part des Prozesses möglichst hohe Ethanolkonzentrationen bzw. Raum-Zeit-Ausbeuten zu realisieren, um die notwendige Energie zur Aufkonzentrierung im *Downstream*-Teil gering zu halten.

Durch die Verwendung der Membranverfahren zur Absolutierung des Ethanols können energetisch aufwendige Verfahren wie z.B. die Azeotrop-Rektifikation vermieden werden. Eine zusätzliche Entlastung der Rektifikation kann durch Herabsetzung der Eingangskonzentration in einer membrangestützten Absolutierung auf etwa 70 wt.-% Ethanol erzielt werden. Dadurch würde der erforderliche Energieaufwand der Rektifikation nochmals erheblich gesenkt.

Entwicklungsbedarf:

- kontinuierliche Gewinnung von konzentriertem Ethanol (> 70 wt.-%) aus der Fermentationsbrühe durch Pervaporation mittels hydrophober Zeolithmembranen
- Entwässerung des Ethanols (auf > 99 wt.-%) durch Pervaporation mittels hydrophiler Membranen
- Technische Erprobung der Membranverfahren im Produktionsverbund

Der Einsatz der Membrantechnik bereits in der Fermentation zur Abtrennung des gebildeten Ethanols durch Pervaporation würde die Möglichkeit eröffnen, die Fermentation quasi-kontinuierlich bei einer Ethanolkonzentration von ca. 8 %, mit deutlich höherer Raum-Zeit-Ausbeute gegenüber dem Batchverfahren, zu betreiben. Auf diese Weise könnte ein höheres Anmischverhältnis und dementsprechend geringerer Wassereinsatz erzielt werden (siehe unten).

Bei einer quasi-kontinuierlichen Fermentation könnte der größte Teil des Alkohols aus der Fermentationsbrühe – im Bypass zum Fermenter – durch Pervaporation abgezogen werden. Man erwartet von einer derartigen Verfahrensverbesserung eine Energieeinsparung von mindestens 50 % gegenüber der konventionellen destillativen Aufkonzentrierung. Eine hinreichend sterile Betriebsweise ohne aufwendige Zusatzmaßnahmen – d.h. Stabilität der erwünschten Mikroflora (Hefen etc.) gegenüber Fremdkeimen, insbes. Milchsäurebakterien und Actinomyceten ist bei kontinuierlicher Betriebsweise des Fermenters eine wichtige (weil schwieriger kontrollierbare) Randbedingung. Der Einsatz immobilisierter Mikroorganismen (zu vertretbaren Kosten und mit hinreichender mechanischer Stabilität) würde die Einhaltung dieser Bedingung erleichtern.

Mit den derzeit verfügbaren hydrophoben Zeolithmembranen erreicht man Alkoholkonzentrationen in der ersten Stufe der Aufkonzentrierung von 70 – 80 %, was für eine anschließende Absolutierung mittels hydrophiler Membranen ausreichend ist. Allerdings ist der Flux bei Einsatz der Membranen in der Fermentationslösung noch zu niedrig. Es ist deshalb weitere Entwicklungsarbeit erforderlich.

Die Absolutierungsstufe mittels Pervaporation bzw. Dampfpermeation erfordert auf den Anwendungsfall maßgeschneiderte, standfeste Membranen sowie innovative Modulkonzepte in Hinblick auf Flussleistung und Selektivität bei Übergabekonzentrationen von ca. 70 wt.-% Ethanol. Vom Einsatz der Membrantechnik in der Absolutierungsstufe verspricht sich die Praxis eine Energieeinsparung gegenüber der herkömmlichen Technik von 30 – 50 % (bez. auf die Absolutierungsstufe allein) und die Chance zu einer deutlichen Senkung der Betriebskosten. Notwendig ist ein gestuftes *Scaling* des Pilotmaßstabs zur Erprobung der Membranen unter praxisnahen Bedingungen. In der Erprobung für diesen Zweck sind z.B. hydrophile Keramikmembranen (HITK, Hermsdorf) und dichte organische Membranen (GÓRAK et al. 2007).

### IV.2.3 Alternative Schlempeverwertung

Bei der Destillation von vergorener Maische fallen Rückstände in Form der sog. Schlempe an. Dazu gehören Reste an nicht abgetrenntem Alkohol, nicht zu Ethanol umgesetzte und nicht flüchtige pflanzliche Inhaltsstoffe (Cellulose, Stärke, Di- und Monosaccharide, Proteine, Betaine, Lipide, organische Säuren), anorganische Substanzen (Kalium-, Calcium-, Magnesium-, Sulfat- und Phosphatverbindungen) sowie die zur Fermentation eingesetzte und nachgewachsene Hefe.

Der in der Maische vorhandene Stickstoff wird größtenteils in Hefeprotein gebunden. Durch die Hefen werden auch Vitamine und Wachstumsstoffe gebildet.

Typischerweise erfolgt bei der Reststoffaufarbeitung zunächst eine Dekantierung der Schlempe, wobei die Feststoffe (Dickschlempe) mit einem Trockensubstanzgehalt von 25 – 30 % von der Flüssigphase (Dünnschlempe) abgetrennt werden. Die Flüssigphase wird in einem Verdampfer eingedickt. Das Kondensat wird als Prozesswasser bei der Anmischung wieder eingesetzt. Die Dickphase aus dem Dekanter und die konzentrierte Dünnschlempe werden anschließend vermischt, in einer Trockentrommel getrocknet und dann pelletiert. Das Produkt, das "*Distillers' dried grains with solubles*" (DDGS), ist sehr proteinhaltig und damit eine wertvolle Futtermittelkomponente. Der Absatzmarkt des DDGS als Viehfutter erscheint bei der zu erwartenden Ausweitung der Produktion jedoch begrenzt – es müssen neue Wege der Schlempeverwertung gefunden werden.

Durch Kopplung der Bioethanolgewinnung mit einer Biogasgewinnung aus der anfallenden Schlempe könnte die Energiebilanz des Gesamtprozesses wesentlich verbessert werden – sowohl durch Verstromung des Biogases als auch durch Rückführung der Abwärme aus dem BHKW in den Bioethanolprozess. Der Verbundbetrieb von Bioethanol- und Biogasanlagen erscheint deshalb als eine wünschenswerte Entwicklung zur Erhöhung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Bioethanolgewinnung.

Entwicklungspotentiale liegen in dem Stickstoffmanagement der kombinierten Bioethanol- und Biogasanlagen. Bei der Erzeugung von Biogas aus Schlempe können höhere Stickstoffgehalte > 5 g/l Ammonium- und Ammoniakstickstoff im Biogasreaktor auftreten, die die Verwendung von Hochlastverfahren bei der Biogaserzeugung einschränken.

#### IV.2.4 Erweiterung der Rohstoffbasis

Obwohl bei den zuckerhaltigen Rohstoffen – gemessen an den kurzfristig erwarteten Bedarfsmengen zur Erfüllung der EU-Biokraftstoff-Richtlinie für 2010 – nicht mit einer schnellen Verknappung zu rechnen ist, begründet der internationale Trend zur verstärkten Nutzung von Bioenergie und biogenen Rohstoffen auch im Falle von Bioethanol längerfristig angelegte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zur Erweiterung der Rohstoffbasis. Hierzu gehört z.B.:

- die Entwicklung geeigneter und ökonomisch günstiger Aufschlussverfahren, z.B. für unkonventionelle Getreidearten und andere Biomassen sowie für pflanzliche Roh- und Reststoffe mit höheren cellulosischen (bzw. lignocellulosischen) Anteilen und
- die Erweiterung des Substratspektrums der ethanolproduzierenden Mikroorganismen.

## V. Biobutanolgewinnung

### Forschungsziele:

- Optimierung der Biotechnologie des Prozesses: Umsatz, Selektivität, Prozessstabilität, Erweiterung der Substratbasis
- Optimierung des Downstreamprocessing (Minimierung des Energiebedarfs)

Für die fermentative Gewinnung von Biobutanol aus Kohlenhydraten zeichnet sich in jüngster Zeit ein zunehmendes internationales Interesse der Industrie zur Weiterentwicklung des seit langem bekannten WEIZMANN-Prozesses ab (z. B. SCHWARZ und GAPES, 2006). Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass es möglich ist, die Produktpalette der konventionellen ABE-Fermentation (Aceton/Butanol/Ethanol) weitestgehend auf die Seite des Butanols zu verschieben. Ein wesentlicher ökonomischer und ökologischer Nachteil ist

auch hier der hohe Energieverbrauch im Bereich des Downstream-Processing für die Abtrennung des Alkohols aus der ca. 2-prozentigen Produktlösung (Maische). Eingeführte Technologien sind Gasstrippen und Adsorption/Desorption. Ziel ist die technische Erprobung energiesparender Trennverfahren, z.B. der Einsatz moderner Membrantechniken zur Abtrennung des Butanols aus der Maische und bei der weiteren Aufkonzentrierung. Außerdem ist auch hier eine energetische Kopplung mit der Aufarbeitung der Schlempe anzustreben.

Eine aktuelle Wirtschaftlichkeitsuntersuchung hat ergeben, dass die Produktion von Biobutanol auf der Basis nachwachsender Rohstoffe in Europa beim derzeitigen Rohölpreis, auch unter Einbezug der Besteuerung, bereits in Kürze wettbewerbsfähig sein sollte (Festel Capital (pers. Mitteilung)). Es ist bekannt, dass neue Anlagen in China, Großbritannien und den USA geplant werden. Von einem internationalen Chemiekonzern wurde bekannt, dass er in den nächsten 10 Jahren 500 Mio. US-\$ in die Weiterentwicklung des Verfahrens investieren will.

Folgendes zielgerichtetes Forschungs- und Entwicklungskonzept für die Gewinnung von Biobutanol wird als wünschenswert erachtet:

- Optimierung der Mikrobiologie der Biobutanolgewinnung, Stammoptimierung, Erweiterung der Substratbasis:
  - Optimierung der Biobutanolausbeute und Prozessstabilität unter Laborbedingungen durch Wahl und Kombination geeigneter Bakterienstämme (Clostridien) und Einstellung geeigneter Milieubedingungen. Untersuchungen zur Steigerung der Butanoltoleranz.
  - Genetische Stammoptimierung durch gezielte Veränderung des bakteriellen Metabolismus in Richtung auf Biobutanolbildung. Erprobung der genetisch optimierten Stämme unter Laborbedingungen.
  - Untersuchungen zur Ausdehnung der Substratbasis unter Erhalt von Ausbeute und Prozessstabilität. Notwendig sind F&E-Projekte zur Nutzung der C<sub>6</sub>- und C<sub>5</sub>-Bausteine aufgeschlossener Biomassen aus Cellulose/Hemicellulosen/Lignocellulose (Holz, Stroh, Energiepflanzen etc.) für die Fermentation.
  - Untersuchungen zur Verwendung und Etablierung definierter und stabiler symbiotischer Mischkulturen bei der Butanolherstellung.
- Optimierung der Bioprozesstechnik und des Downstream Processing:
  - Prozesstechnische Optimierung zur Erhöhung der Produktkonzentration bzw. der Raum-Zeit-Ausbeute (Beherrschung der Produktinhibierung).
  - Untersuchung alternativer Trenntechniken und Verfahrenskombinationen unter Technikumsbedingungen zur Produktabtrennung und Aufkonzentrierung unter dem Ziel einer Minimierung des Energie- und Kostenaufwands.
  - Untersuchung des Einsatzes hydrophober/hydrophiler Membranen zur Butanolabtrennung aus der Fermentationsbrühe und bei der nachfolgenden Aufkonzentrierung.
  - Schlempeaufarbeitung durch Biogasgewinnung; Nutzung der Energie (Strom und Wärme) im Biobutanolprozess.

Das zweite Entwicklungsziel könnte ohne Zeitverzögerung durch das Erste mit dem heute verfügbaren Kenntnisstand der Butanolfermentation in Angriff genommen werden, d.h. unter Verwendung herkömmlich eingesetzter Stämme und Substrate.

## VI. Literatur

Biokraftstoffrichtlinie 2003: Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor

DECHEMA 2006: F&E-Studie – Integrierte Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Diskussionspapier unter Federführung der DECHEMA/GVC-Fachgemeinschaft SuPER und Mitwirkung von Expertengruppen beider Gesellschaften, Frankfurt, Februar 2006

Dürre, P. 2007: Biobutanol: An Attractive Biofuel, *Biotechnol. J.*, 2:12. S. 1525 - 1534  
<<http://dx.doi.org/10.1002/biot.200700168>>

EEG 2004: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2004 (BGBl. I S. 1918), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. November 2006 (BGBl. I S. 2550)

FNR 2005: Ergebnisse des Biogasmessprogramms (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Technologie und Biosystemtechnik), Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2005

FNR 2006a: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe meó Consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

FNR 2006b: Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Górak, A., Hoffmann, A., Kreis, P. 2007: Prozessintensivierung: Reaktive und membranunterstützte Rektifikation. *Chem. Ing. Tech.* 79, 1581-1600  
<<http://dx.doi.org/10.1002/cite.200700111>>

Lin, Y., Tanaka, S. 2006: Ethanol Fermentation from Biomass: Current State and Prospects. *Appl. Microbiol. Biotechnol* 69, 627-642  
<<http://dx.doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>>

Märkl, H., Friedmann, H. 2005: Biogasproduktion. *In: Angewandte Mikrobiologie*, G. Antranikian (Editor), Springer-Verlag. 459 - 487

Pulz, O., Scheibenbogen, K., Groß, W. 2001: Biotechnology with Cyanobacteria and Microalgae, *In: H.-J. Rehm and G. Reed in cooperation with A. Pühler and P. Stadler. Biotechnology. Second Completely Revised Edition, Volume 10: Special Processes. WILEY-VCH, Weinheim, 105 - 136*

Ramesohl, S., Arnold, K., Kaltschmitt, M., Scholwin, F., Hofmann, F., Plättner, A., Kalies, M., Lulies, S., Schröder, G., Althaus, W., Urban, W., Burmeister, F. 2005: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW, Band 1: Gesamtergebnisse und Schlußfolgerungen, Wuppertal Institut  
<[http://www.wupperinst.org/de/projekte/proj/uploads/tx\\_wiprojekt/1110-report.pdf](http://www.wupperinst.org/de/projekte/proj/uploads/tx_wiprojekt/1110-report.pdf)>

Sahm, H., Bringer-Meyer, S. 1987: Ethanol-Herstellung mit Bakterien, *Chem. Ing. Tech.* 59, 695 - 700  
<<http://dx.doi.org/10.1002/cite.330590904>>

Schmitz, N. (Hrsg.) 2005: Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie- und Treibhausgasbilanzen. Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster

Schütte, A. 2005: Biogas – Stand und Perspektiven für die Landwirtschaft, Vortrag auf der Biogasfachtagung Berlin, 24.01.2005  
<[http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/FT\\_Biogas/Plenarvortrag\\_GF.pdf](http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/FT_Biogas/Plenarvortrag_GF.pdf)>

Schulz, M., Hebecker, D. 2005: Thermodynamische Analyse und Bewertung der Bioethanolherstellung, Chem. Ing. Tech. 78, 502 - 505  
<<http://dx.doi.org/10.1002/cite.200690033>>

Schwarz W. H., Gapes, J. R. 2006: Butanol – Rediscovering a Renewable Fuel. BioWorld EUROPE, Nr. 1/2006, 16 - 19

SRU 2007: Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen, Berlin, Juli 2007  
<[http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/sonderg/SG\\_Biomasse\\_2007\\_Hausdruck.pdf](http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/sonderg/SG_Biomasse_2007_Hausdruck.pdf)>

Weuster-Botz, D. 1991: Ethanolproduktion mit immobilisierten *Zymomonas mobilis* im Wirbelschichtreaktor. Dissertation. Berichte des Forschungszentrums Jülich GmbH, Jül-2518, September 1991