

acatech DISKUTIERT

> BIOTECHNOLOGISCHE ENERGIEUMWANDLUNG

GEGENWÄRTIGE SITUATION, CHANCEN UND
KÜNFTIGER FORSCHUNGSBEDARF

THOMAS BLEY (Hrsg.)

> INHALT

> Vorwort

Thomas Bley	9
1 Potenzial der biotechnologischen Energieumwandlung in Deutschland	9
2 Biotechnologische Energieumwandlung	10
3 Das acatech Projekt	10
4 Literatur	11

> Bioenergie in Deutschland

Thomas Bley/Claudia Kirsten/Marc-Denis Weitze	13
1 Grundlegende Aspekte der Bioenergie	13
1.1 Primärenergieverbrauch und Erneuerbare Energien	13
1.2 Potenziale und politische Optionen	14
1.3 Allgemeine Biokraftstoffbewertung	16
2 Biokraftstoffe der 1. Generation	17
2.1 Bioethanol der 1. Generation	18
2.1.1 Technische Anforderungen an den Biokraftstoff	18
2.1.2 Biologisch-chemischer Hintergrund von Bioethanol	18
2.1.3 Aktuelle Situation Bioethanol	18
2.2 Biodiesel und Pflanzenölkraftstoffe	19
2.2.1 Technische Anforderungen an Biodiesel	19
2.2.2 Biologisch-chemischer Hintergrund von Biodiesel	19
2.2.3 Pflanzenölkraftstoffe	20
2.2.4 Aktuelle Situation Biodiesel und Pflanzenölkraftstoffe	20
3 Biokraftstoffe der 2. Generation	20
3.1 Bioethanol der 2. Generation	21
3.2 Biobutanol der 2. Generation	23
3.4 BtL-Kraftstoffe	23
4 Biogenes Methan	24
4.1 Biogaserzeugung – biologisch-chemischer Hintergrund	24
4.2 Biogasanlagen: viele verschiedene Verfahren	25
4.3 Aktuelle Situation Biogas	25
5 Biowasserstoff	27
5.1 Erzeugung von Biowasserstoff	27
5.2 Forschung auf dem Gebiet Biowasserstoff	28
5.3 Forschungsgruppen auf dem Gebiet Biowasserstoff	29
6 Zusammenfassung	30
7 Literatur	32

> Erfolgsfaktoren der Bioethanolproduktion

Murillo Villela Filho

37

1	Bioethanol ergänzt und ersetzt Benzin	37
2	Erfolgsfaktoren	38
2.1	Rohstoffauswahl	38
2.1.1	Pflanzenart und biochemische Faktoren	38
2.1.2	Landwirtschaftliche Faktoren	40
2.1.3	Logistikkosten	40
2.1.4	Bestimmung des Produktionsprozesses	41
2.1.5	Mögliche Energiequellen für die Produktionsanlagen	42
2.1.6	Rohstoffbedingte Produktionskosten	42
2.2	Niedrige Energiekosten	43
2.3	Maximierung der Raum-Zeit-Ausbeute	44
2.3.1	Maximierung der Raum-Zeit-Ausbeute durch Hefe-Rückführung	44
2.4	Produktverbund	45
2.5	Robustheit der Fermentation	47
2.5.1	Reaktionsführung	48
2.5.2	Wahl des Produktionsorganismus	48
2.5.3	Anpassung des Produktionsorganismus	48
2.6	Freie marktgetriebene Nachfrage	49
2.7	Nachhaltigkeit	51
3	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	52
3.1	Bioethanol ist bereits ein erfolgreicher Ottokraftstoff	52
3.2	Potenzial für Deutschland	53
4	Literatur	53

> Bioethanol der 2. Generation

Andre Koltermann

57

1	Einleitung	57
2	Potenziale einer Energiepolitik auf Basis nachwachsender Rohstoffe	57
3	Politische Initiativen und Erfordernisse für eine Förderung von Biokraftstoffen der 2. Generation	58
4	Fazit	59

> Verbesserung der Effizienz und Umweltverträglichkeit von Biogasanlagen

Peter Weiland

61

1	Einleitung	61
2	Aktueller Entwicklungsstand und gegenwärtige Probleme	63

3	Zukünftige Entwicklungen	65
3.1	Substrate	65
3.2	Gärprozess	67
3.3	Anlagentechnik	67
3.4	Gasverwertung	68
3.5	Gärrestverwertung	69
4	Forschungsbedarf	69
5	Fazit	69
6	Literatur	70
> Brennstoffzellen für Biogas: Aufbau und Betrieb eines SOFC-Systems		
	Matthias Jahn/Marc Heddrich	73
1	Einleitung	73
2	Motivation und Zielsetzung	73
3	Systemkonzept und konstruktive Umsetzung	75
4	Experimentelle Ergebnisse	78
5	Ausblick und weiteres Vorgehen	80
6	Wirtschaftliche Umsetzung	80
7	Zusammenfassung	81
8	Literatur	82
> Biomasse Holz		
	André Wagenführ	83
1	Ausgangssituation und Problemstellung	83
2	Potenziale und Lösungsansätze	83
3	Fazit	84
4	Literatur	85
> Mikroalgen als Energieträger der Zukunft		
	Otto Pulz	87
1	Einleitung	87
2	Mikroalgen	87
3	Biotechnologische Nutzung	89
4	Industrielle Produktion von Treibstoffen	91
4.1	Algenkultivierungssysteme	91
4.2	Neue Systeme in der Erprobungsphase	93
5	Aktueller Stand der Technik	95
6	Fazit	95

> „Biomassenutzung in Mitteldeutschland“: Ein Projekt der Sächsischen Akademie der Wissenschaften Ulrich Stottmeister	97
1 Ziele des Projektnetzwerkes	97
2 Handlungsbedarf und Potenziale	97
3 Kooperationen und regionale Verankerung des Projektnetzwerkes	98
4 Zukunftsweisende Fragestellungen	99
> Potenzial der biotechnologischen Energieumwandlung in Deutschland: ein Resümee der Diskussion Thomas Bley	101
> Autorenverzeichnis	105

> VORWORT

THOMAS BLEY

Der Sauerstoff in der Erdatmosphäre ist das Ergebnis des Stoffwechsels von Mikroorganismen vor etwa 700 Millionen Jahren. Die fossilen Rohstoffe, die den überwiegenden Teil des Energiebedarfs der Menschheit decken, sind gewandelte Biomassen, im Wesentlichen pflanzlichen und mikrobiellen Ursprungs. Bis vor etwa 200 Jahren, also vor vergleichsweise kurzer Zeit, waren Biomassen als nachwachsende Rohstoffe die wichtigste Quelle für die Energieversorgung der Menschheit – zum Heizen, zum Kochen, bei der Metallgewinnung und als „Treibstoff“ für die Arbeitstiere. Wenn wir heute einen Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Primärenergieverbrauch von ca. fünf Prozent erreichen und davon wiederum nur 25 Prozent auf eine biotechnologisch gewandelte Biomasse entfallen (der Rest wird schlicht im Ofen verbrannt), so ist das verbleibende eine Prozent zunächst wohl als vernachlässigbare Größe anzusehen.¹

1 POTENZIAL DER BIOTECHNOLOGISCHEN ENERGIEUMWANDLUNG IN DEUTSCHLAND

Eine Diskussion, die sich noch nicht einmal mit der energetischen Nutzung von Biomasse insgesamt beschäftigen will, sondern nur mit einem Teil davon, nämlich jenem, der noch eine biotechnologische Energieumwandlung erfährt – ist das relevant?

Tatsächlich spielt die biotechnologische Energieumwandlung (Bioethanol, Biogas) gegenwärtig eine wichtige Rolle. In der öffentlichen Wahrnehmung handelt es sich dabei um eine CO₂-neutrale, ökologisch wertvolle Art der Energie- und insbesondere auch der Kraftstoffbereitstellung. Die gegenwärtige Situation bei der Beurteilung der biotechnologischen Energieumwandlung ist, besonders auch in Deutschland, durch eine Vielzahl von Partikularinteressen (Landwirtschaft, Automobilwirtschaft, Energiewirtschaft) geprägt. Hohe Erwartungen vonseiten der Politik und widersprüchliche Förderprogramme führen seit einiger Zeit freilich dazu, dass Bewertungen der Entwicklung der Preise und Märkte sowie der Nachhaltigkeit dieser Bioenergien sehr unterschiedlich, zum Teil sogar gegensätzlich ausfallen.

Eine realistische Bewertung (bio-) technologischer Möglichkeiten und Erfordernisse fehlt und ist doch dringend erforderlich. Welche biotechnologischen Entwicklungen sind für eine verstärkte Nutzung pflanzlicher Biomasse für die Energie- und Rohstoff-

¹ Vgl. Behrendt/Dinjus 2006.

gewinnung möglich und welche wirtschaftlich sinnvoll, insbesondere mit Blick auf den Technologiestandort Deutschland? Welche Veränderungen bestehender Ausbildungswege und welche neuen Studiengänge können daraus resultieren? Thermodynamische Berechnungen, eine Bilanzierung von Stoffströmen, die Diskussion relevanter Technologien und zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten sind hier zugrunde zu legen.

2 BIOTECHNOLOGISCHE ENERGIEUMWANDLUNG

Welche Prozesse sind nun als „biotechnologische Energieumwandlung“ zu verstehen? Biotechnologie ist die Anwendung von Wissenschaft und Technik auf lebende Organismen, Teile von ihnen, ihre Produkte oder Modelle von ihnen zwecks Veränderung von lebender oder nichtlebender Materie zur Erweiterung des Wissensstandes, zur Herstellung von Gütern und zur Bereitstellung von Dienstleistungen. Energieträger, die nach dieser Definition durch biotechnologische Energieumwandlung erzeugt wurden, sind demnach Biogas/Biomethan, Biowasserstoff, Bioethanol und -butanol sowie Elektrizität aus mikrobiellen Brennstoffzellen. Durch die biotechnologische Energieumwandlung entstehen also höherwertige Energieformen, die insbesondere als Treibstoffe eine zunehmende Bedeutung gewinnen. Eine wichtige Rolle kann die Biotechnologie zudem beim Aufschluss von Pflanzenmaterial in Form der enzymatischen Hydrolyse spielen. Auch die Vermehrung von Zellen (Algen) in technischen Systemen zur Treibstoffsynthese ist nach der angeführten Definition eine biotechnologische Energieumwandlung. Der Einsatz gentechnischer Methoden zur Züchtung von neuen Energiepflanzen mit höheren Erträgen, verbesserter Anpassung an ungünstige klimatische Bedingungen und Böden (Trockenheit, Salzgehalt) beziehungsweise veränderter Zusammensetzung (Verringerung des Ligningehaltes) sind in diesem Kontext mit zu diskutieren.

3 DAS acatech PROJEKT

acatech hat bereits eine grundlegende Einschätzung zur Energieversorgung in Deutschland vorgelegt.² Es ist deshalb sinnvoll, nun die Bedeutung der Biotechnologie auf diesem Gebiet zu diskutieren. Um angesichts der aktuellen Diskussion zum verstärkten Einsatz von Biomasse für die Energiegewinnung die zahlreichen sich daraus ergebenden Fragen hinsichtlich Umsetzbarkeit und Kostenkalkulation zu thematisieren, hat das acatech Themennetzwerk „Biotechnologie“ Ende 2007 die Projektgruppe „Potenzial der biotechnologischen Energieumwandlung in Deutschland“ initiiert.

Ein erster Workshop dieser Gruppe wurde am 22. Oktober 2008 in Berlin veranstaltet und sollte auf dem Gebiet der biotechnologischen Energieumwandlung gegenwärtige Probleme und künftige Entwicklungen beschreiben sowie den daraus resultierenden Forschungsbedarf bestimmen. Die Workshop-Beiträge sind in diesem Band dokumentiert.

² Hillemeier 2006.

4 LITERATUR

Behrendt/Dinjus 2006

Behrendt, Frank/Dinjus, Eckard: „Die Bedeutung der regenerativen Energien für die Energieversorgung“, in: Hillemeier, Bernd (Hrsg.): Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen – Perspektiven – Lösungswege, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006 (acatech diskutiert), S. 79-90.

Hillemeier 2006

Hillemeier, Bernd (Hrsg.): Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen – Perspektiven – Lösungswege, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006 (acatech diskutiert).

> BIOENERGIE IN DEUTSCHLAND

THOMAS BLEY/CLAUDIA KIRSTEN/MARC-DENIS WEITZE

1 GRUNDLEGENDE ASPEKTE DER BIOENERGIE

Die Fläche der Bundesrepublik Deutschland umfasst 35,7 Mio. ha. Von den heute ca. 16,8 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzung¹ werden bestimmte Anteile zum Anbau nachwachsender Rohstoffe genutzt – waren es 1993 nur knapp 300.000 ha, so sind es gegenwärtig über 2 Mio. ha (2007). Die stoffliche Nutzung des Pflanzenanbaus ist dabei in den letzten Jahren anteilig zurückgegangen. Wurden 1993 noch 84 Prozent der nachwachsenden Rohstoffe als Industriepflanzen stofflich verwertet, waren es 2007 nur noch 13 Prozent – der Rest wird energetisch genutzt.² Bei der Holznutzung (11 Mio. ha Wald in Deutschland) liegen die Verhältnisse anders: hier wird knapp ein Viertel energetisch genutzt, der überwiegende Teil stofflich.³

1.1 PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH UND ERNEUERBARE ENERGIEN

Abbildung 1 zeigt die Struktur des Primärenergieverbrauchs hinsichtlich Erneuerbarer Energien in Deutschland, Europa und weltweit.

¹ 11,8 Mio. ha Ackerfläche und 5 Mio. ha Grünfläche.

² FNR 2007a, S. 11.

³ FNR 2007a, S. 13.

Abbildung 1: Struktur des Primärenergieverbrauchs 2005⁴

	PEV IN PJ	DAVON ANTEIL EE IN PJ	ANTEIL DER WICHTIGSTEN EE AM GESAMTANTEIL EE IN %		
			WASSER	BIOMASSE/ABFÄLLE ⁵	SONSTIGE ⁶
DEUTSCHLAND	14.236	655	13,0	67,6 ⁷	19,4
EU-27	76.200	5.181	21,4	67,8	10,8
AFRIKA	25.268	12.372	2,6	97,0	0,3
LATEINAMERIKA	21.592	6.544	34,1	64,5	1,4
ASIEN	53.844	15.328	5,2	90,8	4,0
CHINA	72.651	10.794	13,2	86,8	0,0
MITTLERER OSTEN	21.073	155	49,5	28,7	21,8
ÜBERGANGSLÄNDER	45.248	1.725	63,4	35,2	1,4
OECD	232.272	13.695	33,4	54,5	12,1
GLOBAL	479.103	60.610	17,4	78,6	4,1

Die Bedeutung der Bioenergie in Deutschland ist in den letzten Jahren beträchtlich gestiegen und nimmt mit rund 70 Prozent den größten Anteil unter den erneuerbaren Energien ein. Wie bereits von Behrendt und Dinjus (2006, S. 82) beschrieben, wird die Herkunft der Kraftstoffe in den nächsten Jahren vom Erdöl weg verlagert werden.

1.2 POTENZIALE UND POLITISCHE OPTIONEN

Die derzeit zur Verfügung stehenden Potenziale an Energiepflanzen werden aktuell durch Zahlen und Prognosen verschiedener Ministerien, Behörden und Fachverbände diskutiert. Eine Vielzahl von Studien hat sich in den letzten Jahren thematisch mit Einzelpotenzialgebieten wie Holz⁸, biogenen Abfällen⁹ und Getreide¹⁰, aber auch mit dem Gesamtpotenzial in Deutschland¹¹ beschäftigt.

So empfiehlt der Wissenschaftliche Beirat Agrarpolitik, „die Erzeugung von Bioenergie (a) in wärmegeführten KWK-Anlagen bzw. Heizanlagen auf Basis von Hackschnitzeln sowie (b) auf Basis von Biogas aus Gülle und Reststoffen in den Mittelpunkt der deutschen Bioenergie-Politik zu stellen“ (WBA 2007, S. iii).

Auch eine auf die Schweiz bezogene Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen kommt zu dem Schluss, dass vor allem die Verwertung biogener Abfallstoffe eine Reduktion der Umweltauswirkungen gegenüber Benzin zeigt (Zah et al. 2007).

⁴ BMU 2008, BMWi 2008, UBA 2007.

⁵ OECD: nur biogener Anteil des Abfalls; weitere Regionen: auch nicht biogene Anteile enthalten.

⁶ Geothermie, Sonnenenergie, Wind, Meeresenergie.

⁷ Biokraftstoffe, biogene Brennstoffe für Strom und Wärme.

⁸ Mantau 2004.

⁹ Leible et al. 2003.

¹⁰ Kröber 2005.

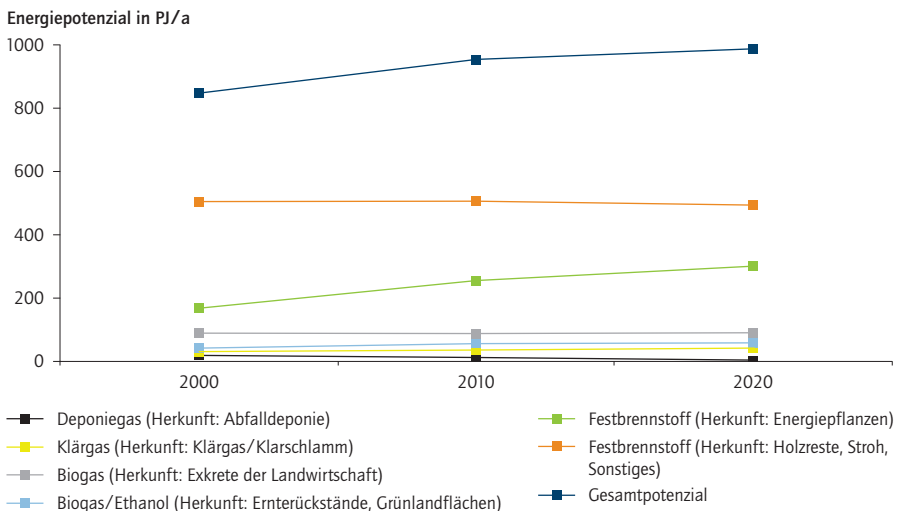
¹¹ Fritsche et al. 2004.

Der Fortschrittsbericht Biokraftstoffe des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses versucht ebenfalls, einen „ganzheitlichen“ Ansatz bei der Ökobilanzierung durchzuführen. Insbesondere stelle sich die Frage der Ergiebigkeit der für die Gewinnung von Biokraftstoffen verwendeten Rohstoffe (EWSA 2007, S. 2). Zudem gibt es in diesem Feld bislang noch zu wenig beachtete Faktoren. So seien die Verbrennungsvorgänge genauer zu analysieren: Es lägen nur wenige einschlägige Daten hierzu vor¹² (EWSA 2007, S. 3).

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen sieht angesichts der Komplexität der Bioenergie die Notwendigkeit, dieses Feld in internationaler Kooperation zu adressieren. Weltweit vorhandene Potenziale der Bioenergie sollten genutzt werden, solange Gefährdungen der Nachhaltigkeit ausgeschlossen werden können, insbesondere der Ernährungssicherheit sowie der Ziele von Natur- und Klimaschutz (WBGU 2008).

Abbildung 2 stellt das Gesamtpotenzial der Bioenergie in Deutschland bezogen auf einzelne Biomasse-Energieträger bis 2020 dar. Das Gesamtenergiepotenzial für 2020 liegt demnach etwa doppelt so hoch wie die in Abbildung 1 angegebene tatsächliche Höhe der eingesetzten Bioenergie im Jahr 2005.¹³

Abbildung 2: Potenzial der Energie aus Biomasse in Deutschland¹⁴



¹² So ist zu prüfen, ob bei Verbrennungsvorgängen, an denen andere Moleküle als Kohlenwasserstoff beteiligt sind, freie Radikale entstehen oder freigesetzt werden, die für oxidativen Stress in Organismen verantwortlich sein können und zu schweren Erkrankungen führen können.

¹³ Nach Schätzungen für das Jahr 2030, die neben technischen auch strukturelle und ökonomische Aspekte berücksichtigen, könnten 17 Prozent der benötigten Energie in Deutschland aus heimischen nachwachsenden Rohstoffen stammen (Festel 2007).

¹⁴ Faulstich et al. 2006, S. 4.

Die gegenwärtige energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen wird genauestens verfolgt und dokumentiert,¹⁵ doch die Zukunft gestaltet sich unsicher. Die Verwendung von Biomasse zur Energieerzeugung kann schwerwiegende ökologische und soziale Folgen mit sich bringen. Die Energiegewinnung aus Pflanzen steht in einem Spannungsverhältnis zum Nahrungsmittelanbau und zum Natur- und Landschaftsschutz. Während die Vergärung von landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen in Biogasanlagen als unproblematisch gilt, gerät der Anbau von Energiepflanzen zur Herstellung von Treib- und Kraftstoffen wegen der begrenzten Kapazität der Agrarflächen oft in die Kritik („Teller vs. Tank“).

Von großer Bedeutung ist die Entwicklung von Verfahren zur Produktion von Biokraftstoffen der „2.Generation“, bei denen die ganze Pflanze biotechnologisch oder thermisch in Treibstoffe umgewandelt wird. Diese Kraftstoffe stellen sowohl ökonomisch als auch ökologisch eine neue Option dar.

1.3 ALLGEMEINE BOKRAFTSTOFFBEWERTUNG

Zahlreiche Einflussfaktoren können für eine effektive Bewertung von Biokraftstoffen herangezogen werden. Neben der angewandten Technologie sind auch wirtschaftliche und ökologische bzw. politische Faktoren von großer Bedeutung. Diese komplexen Zusammenhänge gilt es auf die wesentlichen Einflüsse zu reduzieren, um Biokraftstoffe qualitativ miteinander vergleichen zu können. Folgende Faktoren spielen dabei eine entscheidende Rolle:¹⁶

- Technische Faktoren: Rohstoffversorgung, Herstellverfahren, Motoren-/Antriebstechnologie, Infrastrukturanforderung/Investitionen
- Wirtschaftliche Faktoren: Kraftstoffkosten (inklusive Subventionen und Steuern), Motorrüstungskosten, Infrastruktur-/Verfügbarkeitskosten, Handelsbilanzeffekte
- Ökologische/politische Faktoren: Treibhausgasemissionen und Reduktionskosten, Unterstützung lokaler Bauern, Effiziente Landnutzung/Nutzung für Lebensmittel versus Kraftstoff, Geringe Abhängigkeit vom Erdöl

Aus der Übersicht in Abbildung 3 gehen Eigenschaften, Rohstoffeinsatz und Verfahren zur Herstellung ausgewählter Biokraftstoffe hervor.

¹⁵ BMU 2008.

¹⁶ Festel 2007.

Abbildung 3: Übersicht der Biokraftstoffe¹⁷

	BIOKRAFTSTOFFE						REFERENZ
	BIO-ETHANOL	BIODIESEL (FAME)	BIO-BUTANOL	SYNTHET. DIESEL-KRAFTSTOFF	BIOGAS (SNG)	BIO-WASSERSTOFF	ERDÖL-DIESEL-KRAFTSTOFF
GENERATION	1. bzw. 2.	1.	2.	2.			
KAPITEL	2.1 bzw. 3.1	2.2	3.2	3.3	4	5	
CHEM. STOFFKLASSE	Alkohol (bzw. Ether) C_2H_5OH (bzw. ETBE)	Fettsäure-ester $C_nH_{2n}O_2CH_3$ $n = 14 - 18$ $x = 2$	Alkohol C_4H_9OH	Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n+2} $n = 10 - 20$	Kohlenwasserstoffe CH_4	molekularer H_2	Kohlenwasserstoffe C_nH_{2n} $n = 10 - 20$ $x = 0,5 - 2$
ENERGIE-DICHTE (MJ/L) (15 °C)	21,2	32,6	29,2	34,3	6,4 (bei 200 bar)	1,9 (bei 200 bar)	35
EINSATZ	Ottomotor	Dieselmotor	Ottomotor	Dieselmotor	Dieselmotor, Brennstoffzelle	Dieselmotor, Brennstoffzelle	Dieselmotor
ROHSTOFFE	Kohlenhydrat-Biomasse (Zucker, Stärke, Lignocellulose)	Ölsaaten (Raps, Soja, Palm u. a.)	Kohlenhydrate	Alle Biomassen	a) fermentierbare b) alle Biomassen	a) alle b) fermentierbare Biomassen c) Mikroalgen	Erdöl
VERFAHREN	Fermentation (vorher Aufschluss, Hydrolyse bei polymeren Kohlenhydraten)	Umesterung	Vergasung	Vergasung und katalyt. Synthese (Fischer-Tropsch, Methanol, DME)	a) Fermentation b) Vergasung und katalyt. Synthese	a) Vergasung b) Fotofermentation c) biolog. H_2O -Spaltung	Destillation, Hydro-treating

DME Dimethylether
 ETBE Ethyl-tertiär-Butyl-Ether
 FAME fatty acid methyl ester
 SNG substitute natural gas

2 BIOKRAFTSTOFFE DER 1. GENERATION

Alle Biokraftstoffe, die derzeit nach dem Stand der Technik zur Verfügung stehen und weitestgehend in energetischer Verwertung getestet wurden, gehören zu den Biokraftstoffen der 1. Generation. Dazu zählen aus zuckerhaltigen (zum Beispiel Zuckerrübe

¹⁷ Nach Schaub/Vetter 2007.

oder Zuckerrohr) bzw. stärkehaltigen Rohstoffen (zum Beispiel Getreide oder Mais) hergestellter Bioethanol, Biodiesel sowie Pflanzenölkraftstoffe. Der Kraftstoffverbrauch in Deutschland lag 2006 bei fast 54 Mio. Tonnen. Davon waren 4 Mio. Tonnen Biokraftstoffe (Bioethanol, Biodiesel und Pflanzenöl), der Rest fossilen Ursprungs.¹⁸

2.1 BIOETHANOL DER 1. GENERATION

2.1.1 TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN DEN BOKRAFTSTOFF

Bioethanol kann als reiner Kraftstoff oder als Beimischung von Ottokraftstoffen Anwendung finden. Ausgehend von Ethanol kann ferner Ethyl-tertiär-Butyl-Ether (ETBE) produziert werden, welches zur verbesserten Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen führt und das erdölstämmige MTBE (Methyl-tertiär-Butyl-Ether) ablöst. Reines Ethanol (sogenanntes E-100) wird heute unter anderem in Brasilien eingesetzt. Dort erfolgt auch eine Benzinbeimischung von 25 Prozent (E-25).¹⁹ In Deutschland erfolgt nach DIN EN 228 lediglich eine 5-prozentige Beimischung (E-5).²⁰

2.1.2 BIOLOGISCH-CHEMISCHER HINTERGRUND VON BIOETHANOL

Biogenes Ethanol wird durch anaeroben Abbau von Kohlenhydraten mittels Mikroorganismen wie Hefen gewonnen (Gärung). Durch eine mehrstufige Destillation und Entwässerung kann der Alkohol auf bis zu 99,9 Prozent angereichert werden.²¹ Ausgangsstoffe für den Gärungsprozess sind vor allem landwirtschaftliche Erzeugnisse. Neben stärkehaltigen Pflanzen wie Mais, Weizen und Roggen finden häufig auch Zuckerrohr und Zuckerrüben als Ausgangsmaterialien Verwendung. Zuckerhaltige Pflanzen unterliegen einer Direktvergärung; währenddessen muss bei Getreide und Mais die Stärke erst in Zucker umgewandelt werden. Bei der Herstellung von Bioethanol entsteht als Nebenprodukt Schlempe bzw. Vinasse. Dies kann als Dünge- oder Futtermittel und als Substrat für Biogasanlagen eingesetzt werden.

2.1.3 AKTUELLE SITUATION BIOETHANOL

Der Kraftstofftertrag aus Zuckerrüben ist höher als bei Getreide und auch mehr als doppelt so hoch wie die Produktivität von Pflanzenöl oder Biodiesel.²² Der Absatz für Bioethanol lag in Deutschland 2007 bei 460.000 t, während er drei Jahre davor erst 65.000 t betrug (Abbildung 4).

¹⁸ FNR 2007a

¹⁹ Zah et al. 2007.

²⁰ FNR 2007b, Zah et al. 2007.

²¹ FNR 2007b.

²² Festel 2007.

Abbildung 4: Entwicklung von Bioethanol in Deutschland²³

	2004	2005	2006	2007
ABSATZ IN T	65.000	226.000	478.000	460.000
ERFORDERLICHE BIOMASSE GETREIDE IN T	212.550	739.000	1.563.000	1.500.000

Trotz der begrenzten landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland könnte die Bioethanolproduktion weiter gesteigert werden. Das größte Potenzial liegt bei der Prozessoptimierung. Neben einer verbesserten Zerkleinerung der Pflanzen wird an der enzymatischen Behandlung und der Beimischung anderer Zusatzstoffe gearbeitet.

Die USA und Brasilien sind die größten Bioethanolproduzenten. Dort ist im Vergleich zu Deutschland die Anbaufläche (Mais bzw. Zuckerrohr) freilich viel größer. Die Produktionsmengen messen sich dort nach mehreren Millionen Tonnen, die Produktionskosten liegen um 0,20 Euro/Liter.

2.2 BIODIESEL UND PFLANZENÖLKRAFTSTOFFE

Vor allem Biodiesel konnte sich in den vergangenen Jahren auf dem Kraftstoffmarkt gut etablieren. In den folgenden Abschnitten werden Biodiesel und andere Pflanzenölkraftstoffe kurz vorgestellt.

2.2.1 TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN BIODIESEL

Technisch gesehen ähneln sich die Produktion von konventionellem Diesel und Biodiesel sehr. Somit kann Biodiesel herkömmlichen Diesel ersetzen oder diesem in jedem Mischungsverhältnis von 0 bis 100 Prozent beigegeben werden, ohne dass Dieselmotoren modifiziert werden müssen. Laut der EN 590 ist seit 2004 eine fünfprozentige Beimischung von Biodiesel zulässig.²⁴ Die Kraftstoffqualität muss aber bestimmte Anforderungen erfüllen, welche durch DIN EN 14214 geregelt werden.²⁵ Dagegen ist der Einsatz von 100 Prozent Dieselsubstitut rückläufig, da Fahrzeuge mit reinem Biodiesel aufgrund der hohen Partikelemissionen ohne Umbau die Euro IV- und V-Normen nicht erfüllen können.²⁶

2.2.2 BIOLOGISCH-CHEMISCHER HINTERGRUND VON BIODIESEL

Biodiesel (Fettsäuremethylester) wird aus der Veresterung verschiedener Öle und Fette gewonnen. Dabei benötigt die Umwandlung von Pflanzenölen zu Biodiesel weniger En-

²³ FNR 2008a.

²⁴ Zah et al. 2007.

²⁵ FNR 2007b.

²⁶ Festel 2007.

ergie als das Destillieren von vergorenem Mais zu Bioethanol. In Deutschland findet vorwiegend Rapsöl als Rohstoff Anwendung. Bei der Herstellung von Rapsölmethylester (REM) werden die im Öl vorliegenden drei Fettsäuren mithilfe eines Katalysators vom Glycerin abgespalten und anschließend mit Methanol verestert. Bei Biodiesel aus Raps entsteht aus drei Tonnen Rapskorn eine Tonne Biodiesel.²⁷ Die nutzbare Energiemenge (Output) im Verhältnis zur eingesetzten Energiemenge bei der Produktion (Input) beträgt 2,5:1.

2.2.3 PFLANZENÖLKRAFTSTOFFE

Bei Pflanzenölkraftstoffen handelt es sich vorwiegend um Öle aus Raps, Sonnenblumen, Erdnuss und Soja, aber auch Altspeiseöl kann Verwendung finden. Diese Öle sind die Vorstufe zu Biodiesel und können ohne Veresterung in Dieselmotoren eingesetzt werden. Allerdings wird eine Umrüstung des Motors notwendig – zumindest ein sogenanntes Zweitanksystem, das heißt ein Kaltstart und eine Spülung vor dem Abschalten mit normalem Diesel.²⁸

2.2.4 AKTUELLE SITUATION BIODIESEL UND PFLANZENÖLKRAFTSTOFFE

2006 wurden in Deutschland etwa 1 Mio. Tonnen Pflanzenöle als Kraftstoff genutzt. Die Entwicklung von Biodiesel in Deutschland ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. 2007 lagen die Produktionskapazitäten bei 4,4 Mio. t, die Produktion bei 2,8 Mio. t und der Absatz bei 3,3 Mio. t.²⁹

Die größte Menge an Biodiesel verbrauchten mit 1,25 Mio. t 2006 die LKW im Transportgewerbe.³⁰ Zwar ist Biodiesel an über 1.900 öffentlichen Tankstellen erhältlich; dennoch ist eine flächendeckende PKW-Nutzung nicht zu erwarten. Neben den Transportunternehmen können aber auch andere Nischen wie landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge davon profitieren.³¹

3 BIOKRAFTSTOFFE DER 2. GENERATION

Rohstoffe für Biokraftstoffe der 2. Generation sind Ganzpflanzen. Die Verarbeitung des Lignocellulosegerüsts steht dabei im Mittelpunkt. Neben Stroh, Restholz und anderen biogenen Reststoffen werden schnell wachsende Energiepflanzen mit hoher Anbaureife verwendet. Zwar steht die Technologie noch am Anfang der Entwicklung, jedoch ergeben sich durch den Einsatz verschiedener Rohstoffe viele Möglichkeiten, Biokraftstoffe aus Lignocellulose zu erzeugen. Lignocellulose besteht aus Cellulose

²⁷ Festel 2007.

²⁸ Zah et al. 2007.

²⁹ FNR 2008a.

³⁰ FNR 2007a.

³¹ Faulstich et al. 2006.

(einem aus Glucose aufgebauten linearen Polymer), Hemizellulose (Polysaccharid, entweder aus Pentosen wie Xylose und Arabiose oder Hexosen wie Mannose aufgebaut) und Lignin (dreidimensionales Makromolekül mit einem Phenylpropangerüst).

3.1 BIOETHANOL DER 2. GENERATION

Bioethanol der 1. Generation wird ausschließlich aus dem stärkehaltigen Korn (zum Beispiel von Getreide) hergestellt, steht also in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Im Gegensatz zu diesen Prozessen wird Ethanol der 2. Generation aus pflanzlichen Abfällen wie Holz, Stroh oder Ganzpflanzen produziert. Ethanol der 2. Generation steht damit nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, da die verwendeten Rohstoffe nicht für die menschliche Ernährung geeignet sind. Ausgehend von einem mikrobiologischen Fermentationsprozess muss vor der eigentlichen Ethanolproduktion eine enzymatische Umwandlung der Lignocellulose in Zucker durchgeführt werden. Dieser zusätzliche Verfahrensschritt konnte technologisch bereits von verschiedenen Gruppen bis zur Pilotanlage entwickelt werden; eine Umsetzung in die kommerzielle Produktion ist in den nächsten Jahren zu erwarten.

Aufgrund der komplexeren Struktur der Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulose und Lignin) verläuft deren Umwandlung in Zucker im Gegensatz zur Umwandlung von Stärke langsamer. In diesem Verzuckerungsschritt werden Cellulose und Hemicellulose in vergärbaren Zucker umgewandelt und können von Hefen direkt in Ethanol umgesetzt werden. Die Nutzung der Pentosen (Xylose und Arabinose) stellt eine neue Herausforderung an die Vergärung zu Ethanol dar. Neben natürlichen Hefen könnte die Gentechnik eine wichtige Rolle spielen, indem sie Hefen derart modifiziert, dass diese neben Glucose auch Xylose und Arabinose in Ethanol umwandeln können. Das in Pflanzen enthaltene Lignin könnte als Brennstoff den Energiebedarf des Prozesses selbst liefern.³²

Am ATZ Entwicklungszentrum in Sulzbach-Rosenberg wurde ein Konzept zur kombinierten Produktion von Bioethanol und Biogas entwickelt. Hier werden vor allem grüne Ganzpflanzen verwendet. Vor dem eigentlichen Verzuckerungs- und Fermentationsprozess werden die Pflanzen einer thermischen Hydrolyse (TDH-Verfahren) unterzogen. Bei diesem Verfahren wird die chemische Struktur der Lignocellulose gelockert und aufgeschlossen. Damit kann die im anschließenden Gärprozess erzielte Ethanolausbeute gesteigert werden. Aus der zurückbleibenden Schlempe und den entstehenden Gärresten wird gleichzeitig Biogas gewonnen und zur Erzeugung von Wärme und/oder elektrischer Energie herangezogen. Eine erste Demonstrationsanlage wurde bereits errichtet und zeigte eine Erhöhung des Biogasertrages um bis zu 30 Prozent gegenüber dem Stand der Technik.³³

³² Festel 2007.

³³ Faulstich et al. 2006.

Ebenfalls hat die Süd-Chemie AG ein enzymatisches Umwandlungsverfahren entwickelt, in dem Agrarreststoffe wie zum Beispiel Stroh zu Bioethanol verarbeitet werden. Die entsprechende Anlage wurde gemeinsam mit der Linde AG konzipiert und wird am Forschungsstandort der Süd-Chemie in München betrieben. Eine Demonstrationsanlage ist in Planung (vgl. Beitrag Koltermann in diesem Band).

Für die Bioethanolerzeugung aus lignocellulosehaltiger Biomasse existiert eine Vielzahl von Verfahren; dennoch gibt es noch keine marktfähige Anlagentechnologie. In Abbildung 5 sind einige Demonstrations- bzw. Pilotanlagen sowie Forschungsgruppen und Unternehmen, die sich mit dieser Thematik befassen, aufgelistet.

Abbildung 5: Einige Akteure auf dem Gebiet Bioethanol der 2. Generation

FORSCHUNGSGRUPPE/FIRMEN	KOOPERATION	VERFAHREN BZW. PILOTANLAGE
Abengoa Bioenergy www.abengoabioenergy.com	Novozymes www.novozymes.com Dyadic www.dyadic-group.com	Pilotanlage in York, Nebraska mit einem Output von ca. 500 m ³ /a Planung einer Anlage auf Basis von Weizenstroh mit 5.000 m ³ /a
ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg www.atz.de	FNR	Thermodruckhydrolyse-Verfahren (TDH-Verfahren)
Broin, USA (heute POET) www.broin.com	DuPont www.dupont.com Novozymes www.novozymes.com	Anlagenkonzept für die Umwandlung von Kleie aus der Maisverarbeitung – Ertragssteigerung um 27 Prozent je ha Pilotanlage für Bioethanol der 2. Generation in Scotland, South Dakota
DuPont www.dupont.com	Michigan State University National Renewable Energy Laboratory (NREL) Diversa www.diversa.com	Konzept zur Entwicklung einer Bioraffinerie – Chemikalien und Kraftstoffe der 2. Generation auf Basis der gesamten Maispflanze
Iogen Corporation, Kanada www.iogen.ca	Shell, Petro-Canada, kanadische Regierung	Demonstrationsanlage in Ottawa – Produktion seit 2004
Sekab, Schweden www.sekab.com		Pilotanlage in Örnköldsvik, Produktion von 300-400 l/d, Rohstoff sind Holzhackschnitzel
Süd-Chemie AG, Germany www.sud-chemie.com	Linde Group, Germany www.linde.com	Entwicklung des sunliquid Prozesses und der darauf abgestimmten Anlagen zur Herstellung von Bioethanol der 2. Generation; Pilotanlage in München
SunOpta, Kanada www.sunopta.com		erste Demonstrationsanlage in Frankreich, vor etwa 20 Jahren, plant in China erste konventionelle Anlage
Verenium, USA		Demoanlage in Jennings, Louisiana zur Herstellung von Bioethanol der 2. Generation aus Zuckerrohr-Bagasse

Bei effizienter Verarbeitung von Cellulose zu Ethanol kann ein Drittel des Benzinverbrauchs in der EU allein aus überschüssigem Getreidestroh der EU gewonnen werden (vgl. Beitrag Koltermann in diesem Band). Die Energiebilanz, sprich die Produktionsenergiemenge (Input) im Verhältnis zur nutzbaren Energiemenge (Output) beträgt 1:2-36 je nach Produktionsmethode.

3.2 BIOBUTANOL DER 2. GENERATION

Butanol hat hinsichtlich der chemischen und physikalischen Eigenschaften Vorteile als Treibstoff im Vergleich zu Ethanol. Butanol ist in seinen Eigenschaften dem Benzin ähnlicher und kann herkömmlichen Kraftstoffen ohne Beschränkung und Motorenrüstung zugesetzt werden.³⁴ Zudem hat Butanol eine höhere Energiedichte als Ethanol.

Viele Bakterien der Gattung Clostridium stellen bei der Buttersäuregärung auf Nebenwegen aus Brenztraubensäure außer Aceton (A) auch Butanol (B) und Ethanol (E) her. Dies wird besonders bei niedrigen pH-Werten realisiert. Die Ausbeute der sogenannten ABE-Fermentation ist allerdings noch sehr gering und bedarf erheblicher Optimierung.³⁵ Wie beim Bioethanol der 2. Generation bleibt freilich auch bei der Herstellung von Biobutanol der 2. Generation der Aufschluss der Lignocellulose der entscheidende Verfahrensschritt.

3.4 BTL-KRAFTSTOFFE

Ausgangsstoffe für die Herstellung von BtL-Kraftstoffen sind Stroh, Holz und Energiepflanzen. Diese werden über eine Pyrolyse zu Synthesegas umgewandelt. Das Gas bildet wiederum den Ausgang für die Dieselproduktion. Biomass-to-Liquid- (BtL-) Kraftstoffe haben Vorteile bezüglich konventioneller Antriebe. Ohne Umrüstung können sie in herkömmlichen Dieselmotoren eingesetzt werden. Ein Vertrieb im bestehenden Tankstellennetz ist somit als unproblematisch anzuerkennen.³⁶

Eine der weltweit ersten Pilotanlagen zur Herstellung von synthetischem Biokraftstoff wurde im April 2008 im sächsischen Freiberg von dem Unternehmen Choren fertig gestellt. Die sogenannte Beta-Anlage soll unter Normalauslastung rund 18 Mio. Liter BtL pro Jahr erzeugen. Das entspricht etwa dem Jahresbedarf von 15.000 PKW. Der Biomassebedarf von rund 65.000 t Trockenmasse pro Jahr soll durch Waldrest- und Altholz realisiert werden.³⁷

³⁴ Freilich zeigt das Beispiel Brasilien, dass auch Bioethanol als Treibstoff für die Autoindustrie in der praktischen Umsetzung unproblematisch sein kann.

³⁵ Festel 2007.

³⁶ FNR 2007b.

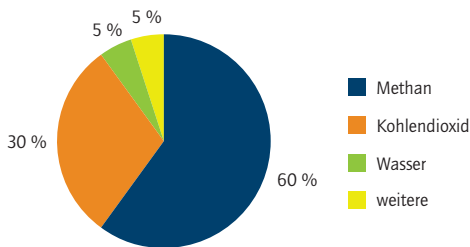
³⁷ www.choren.de.

4 BIOGENES METHAN

4.1 BIOGASERZEUGUNG – BIOLOGISCH-CHEMISCHER HINTERGRUND

Biogas entsteht durch die Vergärung organischer Stoffe unter Lichtabschluss. Hauptbestandteile sind Methan, Kohlendioxid und Wasser (siehe Abbildung 6).

Abb. 6: Chemische Zusammensetzung von Biogas (Durchschnittswerte)³⁸



Je nach Substrat variieren die Biogaserträge; bezogen auf eine Tonne Frischsubstrat entstehen aus Rinder- oder Schweinegülle rund 30 Kubikmeter Biogas, aus Schweinemist rund 60 Kubikmeter. Substrat aus der Biotonne bringt rund 100 und Maissilage sowie Grünschnitt bis zu 200 Kubikmeter pro Tonne.

Die Umwandlung biogener Roh-/Reststoffe erfolgt im Wesentlichen in vier Stufen, wobei mehrere Bakteriengruppen beteiligt sind.

- Während der ersten Phase, der Hydrolyse, verbrauchen aerobe Bakterien den im Ausgangsstoff enthaltenen Sauerstoff und spalten hochmolekulare organische Bestandteile wie Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate in niedermolekulare Verbindungen (Fett- und Aminosäuren, Einfachzucker und Wasser).
- In der zweiten Phase sinkt der pH-Wert, denn Säure bildende Bakterien wandeln die entstandenen Moleküle in organische Säuren, Alkohole und Gase wie CO_2 , H_2 , H_2S und NH_3 um.
- Essigsäurebakterien produzieren dann in der dritten Phase die Ausgangsverbindungen der Methanbildung Acetate, Kohlendioxid und Wasserstoff.
- Während der vierten Phase entsteht schließlich das Methan.

Bis heute sind etwa zehn verschiedene Arten von Methanococcus und Methanobacterium bekannt, die in der Lage sind, Methan zu produzieren.³⁹

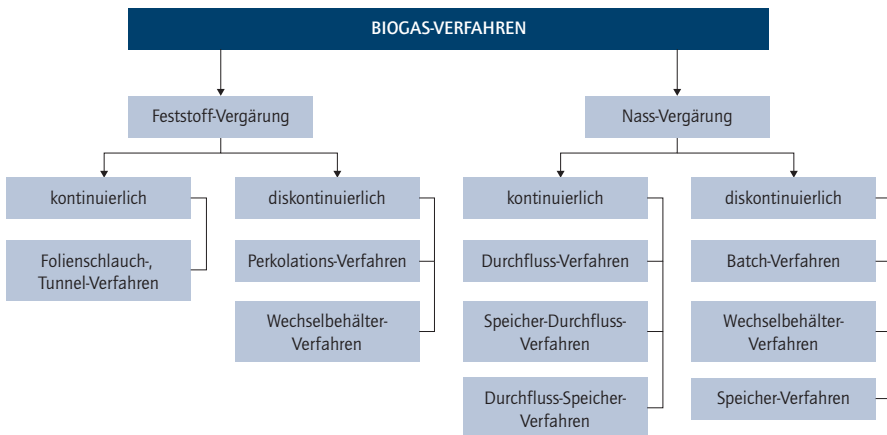
³⁸ Nach FNR 2007b, S. 20.

³⁹ Renneberg 2007, Eder/Schulz 2006.

4.2 BIOGASANLAGEN: VIELE VERSCHIEDENE VERFAHREN

Biogasanlagen unterscheiden sich je nach den Einsatzstoffen, der verwendeten Technik und der Arbeitstemperatur. In Deutschland werden die meisten Biogasanlagen bei einer Fermentertemperatur von 38-42 °C betrieben. Es gibt gegenwärtig eine große Anzahl verschiedener Biogasverfahren, doch lassen sie sich in typische verfahrenstechnische Varianten zusammenfassen. Prinzipiell gibt es folgende Unterscheidungsmerkmale: Art der Bestückung (Batch- oder Durchflussverfahren), Art der Mischung (voldurchmischt oder Pfropfenstrom), ein- oder mehrstufiges Verfahren, Konsistenz der Substrate (fest oder flüssig).⁴⁰ Abbildung 7 zeigt eine schematische Übersicht der genannten Prozessführungen.

Abbildung 7: Übersicht möglicher Biogas-Verfahren⁴¹



4.3 AKTUELLE SITUATION BIOGAS

Die gegenwärtige Forschung beschäftigt sich zum einen mit der technischen Optimierung der Biogasproduktion; neben einer verbesserten Verbrennung in Gas-, Otto- und Zündstrahlmotoren werden hier auch verschiedene Reaktormaterialien untersucht. Zum anderen geht es um die Verbesserung des Gärprozesses. Der Einsatz von geeigneten Enzymen spielt dabei eine große Rolle. Die Polysaccharide der eingesetzten Biomasse können enzymatisch gespalten werden und sind somit für die am Gärprozess beteiligten Bakterien besser zugänglich.

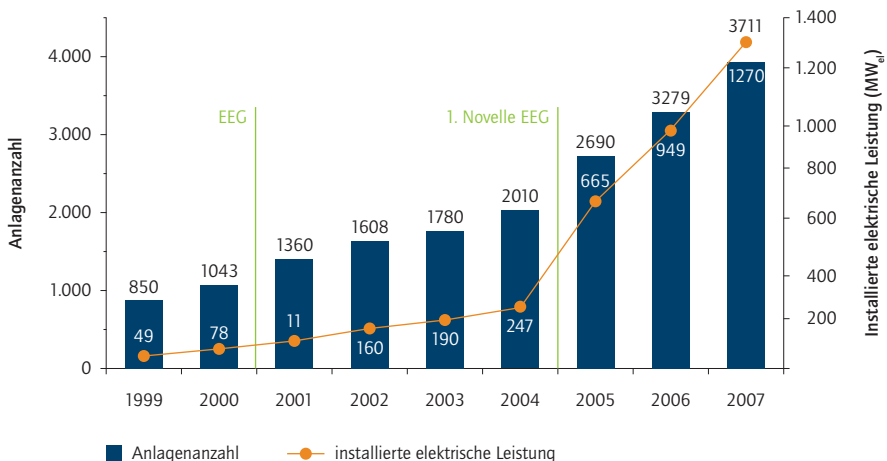
Biogas wird vorwiegend über KWK-Anlagen (Kraftwärmekopplung) umgesetzt. Vor einer energetischen Biogasnutzung erfolgt zunächst die Reinigung. Neben der Entschwefelung werden unerwünschte Gasbestandteile wie Wasser, Kohlendioxid und

⁴⁰ Eder/Schulz 2006.

⁴¹ Eder/Schulz 2006.

Staub abgeschieden. Aufbereitungsverfahren wie zum Beispiel Druckwechsel-Adsorptionsverfahren (PSA) und Duckwasserwäschen (DWW) haben sich in der Praxis bisher gut bewährt.⁴² Anschließend wird das gereinigte Biogas beispielsweise in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zu Strom umgewandelt. Die dabei entstehende Wärme kann zur Beheizung des Fermenters und/oder von Wohn- und Wirtschaftsanlagen genutzt werden. Mit Technologien nach dem Stand der Technik lassen sich allerdings nur etwa 35 Prozent der im Biogas enthaltenen Energie verstromen. Nach Meinung verschiedener Wissenschaftler kann ein elektrischer Wirkungsgrad von 50 Prozent durch den Einsatz in Brennstoffzellen erreicht werden.⁴³ Dank des seit 2000 gültigen Erneuerbare Energien-Gesetzes (EEG) besteht großes Interesse an der Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz.⁴⁴ In den letzten Jahren gab es eine deutliche Zunahme an Biogasanlagen und installierter Leistung (siehe Abbildung 8). Ein weiterer Anstieg wird prognostiziert.⁴⁵

Abbildung 8: Anlagenbestand und installierte elektrische Leistung von Biogasanlagen⁴⁶



⁴² Faulstich et al. 2006.

⁴³ FNR 2007b.

⁴⁴ Dieses Gesetz wurde 2004 durch eine höhere Vergütung erneuert. So bekommen zum Beispiel Betreiber von Kleinanlagen (bis 150 kW) 10,83 ct/kWh, wohingegen der Strom von Großbetrieben (5-20 MW) nur mit 7,91 ct/kWh vergütet wird (Stand 2008). Die Grundvergütung ist im Vergleich zum letzten Jahr leicht gesunken (FNR 2008b). Blockheizkraftwerke, die am Erdgasnetz hängen, erzielen einen Nutzungsgrad von etwa 80 Prozent (Burmeister 2007).

⁴⁵ Eder/Schulz 2006.

⁴⁶ FNR 2008b.

Neben der Verstromung, die wegen der erforderlichen Reinigung und Aufbereitung des Biogases freilich sehr teuer ist, kann Biogas auch in Erdgasfahrzeugen zum Einsatz kommen. 2006 wurde in Deutschland die erste Biogastankstelle eröffnet.⁴⁷

Die weltweit größte und modernste Biogasfabrik soll künftig in Güstrow entstehen.⁴⁸ Neben der Biogaserzeugung werden die anfallenden Gärreste in einem eigenen BHKW verstromt. Mit dieser Anlage können ca. 46 Mio. m³ Biogas mit Erdgasqualität erzeugt werden – das entspricht ca. 160 Mio. kWh Strom und 180 Mio. kWh Wärme pro Jahr.

5 BIOWASSERSTOFF

Wasserstoff (H₂) gilt als ein Energieträger der Zukunft. Wasserstoff ist energiereich, effizient, ungiftig, gut speicherbar und „sauber“. Er kann aber nur dann als „sauber“ bezeichnet werden, wenn er regenerativ zum Beispiel durch Elektrolyse von Wasser mithilfe von „sauber“ gewonnenem Strom, Fotovoltaik (solarbetriebene Fotolyse von Wasser) oder durch biologische Prozesse erzeugt wird. Bei seiner Verbrennung in Brennstoffzellen (Knallgasreaktion) entstehen reines Wasser und Energie. Wasserstoff besitzt als Energieträger mit 142 MJ/t den höchsten massenbezogenen Brennwert, doch die volumenbezogene Energiedichte ist recht gering. Der bisher aus fossilen Energiequellen durch bewährte Reformierungs- und Vergasungsverfahren erzeugte Wasserstoff bringt gravierende Nachteile mit sich: Neben den nur endlich verfügbaren fossilen Rohstoffquellen, dem hohen technischen und apparativen Aufwand (Prozesse mit hohen Temperaturen und hohen Drücken) entstehen bei der H₂-Erzeugung hohe Schadstoffemissionen – bei der Produktion von einer Tonne H₂ werden drei Tonnen CO₂ frei.⁴⁹

5.1 ERZEUGUNG VON BIOWASSERSTOFF

Die Erzeugung von Biowasserstoff stellt dagegen eine alternative und CO₂-neutrale Methode dar. Folgende drei Ansätze spielen dabei eine Rolle:⁵⁰

1. Bestimmte Mikroalgen und Cyanobakterien sind von Natur aus in der Lage, mittels Fotosynthese Wasserstoff zu produzieren. Durch gentechnische Veränderungen dieser Organismen kann deren Effizienz gesteigert werden.

⁴⁷ FNR 2007b.

⁴⁸ <http://nawaro.ag>.

⁴⁹ Happe 2006.

⁵⁰ Donner 2007.

2. Für die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff sind in den Mikroorganismen bestimmte Enzyme verantwortlich. Die Isolierung dieser Substanzen aus den Zellen und Immobilisierung auf geeignete Membranen stellt das Konzept einer „Biobatterie“ dar.
3. Eine biomimetische Wasserstoffproduktion könnte anstatt durch ursprüngliche Zellbestandteile durch die Verwendung chemisch ähnlicher Verbindungen realisiert werden.

5.2 FORSCHUNG AUF DEM GEBIET BIOWASSERSTOFF

Die meisten aktuellen Forschungen beschäftigen sich mit dem gesamten Mikroorganismus und der fotobiologischen Wasserstoffgewinnung. Dafür kommen grundsätzlich drei Stoffwechselprozesse infrage:⁵¹

1. Gärung: Geeignete Bakterien verarbeiten unter anaeroben Bedingungen organisches Material zu H_2 , CO_2 und oxidierten organischen Verbindungen. Die Energie stammt dabei aus dem organischen Rohstoff.
2. Anoxygene Fotosynthese: Fototrophe Bakterien bilden mithilfe von Sonnenenergie aus organischen Substanzen oder reduzierenden Schwefelverbindungen H_2 und CO_2 oder oxidierte S-Verbindungen.
3. Oxygene Fotosynthese: Algen oder Cyanobakterien sind in der Lage, Wasser unter Verwendung von Sonnenenergie enzymatisch in H_2 und O_2 zu spalten.

Schwerpunkt vieler aktueller Forschungen ist der dritte Stoffwechselprozess. Schon vor etwa 70 Jahren entdeckte man, dass einzellige Grünalgen die Fähigkeit besitzen, Wasserstoff zu produzieren.⁵² Im Rahmen der Fotosynthese wird enzymatisch die Pyrolyse des Wassers angeregt, wobei Sauerstoff entsteht. Die verbleibenden Wasserstoffionen werden durch spezielle Enzyme, sogenannte Hydrogenasen, aus molekularem Wasserstoff umgewandelt.

Hydrogenasen besitzen in zahlreichen Prokaryonten eine wichtige Funktion im Energiehaushalt. Eine Vielzahl fermentativer Bakterien ist nur unter anaeroben Bedingungen in der Lage, den Wasserstoffmetabolismus durchzuführen. Die Vielfalt biologischer Prozesse mit Vor- und Nachteilen und Beispiele für Wasserstoff erzeugende Mikroorganismen sind in der Abbildung 9 aufgelistet.

⁵¹ Happe 2006.

⁵² Gaffron 1939.

Abbildung 9: Vor- und Nachteile diverser Prozesse zur Biowasserstoffproduktion⁵³

PROZESS	MIKROORGANISMEN	VORTEILE	NACHTEILE
Direkte Biofotolyse	Grünalgen (Chlamydomonas sp.)	H ₂ aus Wasser und Sonnenlicht	hohe Lichtintensität wird benötigt, geringe fotochemische Effizienz
Indirekte Biofotolyse	Cyanobakterien (Anabena sp.)	H ₂ aus Wasser, Möglichkeit der Stickstofffixierung aus Atmosphäre	H ₂ -Verbrauch durch Uptake-Hydrogenasen, gebildetes Gas enthält O ₂ (inhibiert Nitrogenase)
Fotofermentation	Fotosynthetische Bakterien (Rhodospirillum rubrum sp., Rhodospirillum rubrum sp.)	breites Lichtspektrum verwertbar, Abbau von organ. Säuren, Zuckern, potenziellen Abwässern	Lichtumwandlungseffizienz gering (1-5 Prozent), Hydrogenasen stark O ₂ -inhibiert
Dunkelfermentation	Fermentative Bakterien (Clostridium sp., Enterobacter sp., E. coli)	kein Licht zur H ₂ -Bildung benötigt, viele C-Quellen verwertbar – höchste H ₂ -Bildungsraten, wertvolle Nebenprodukte (Butter, Milch-, Essigsäure)	geringe H ₂ -Erträge, H ₂ -Inhibierung/H ₂ -Bildung thermodynamisch nur bei geringen H ₂ -Konzentrationen – viel CO ₂ im Abgas (→ Abtrennung)

5.3 FORSCHUNGSGRUPPEN AUF DEM GEBIET BIOWASSERSTOFF

Das Team von Olaf Kruse an der Fakultät für Biologie der Universität Bielefeld arbeitet in Kooperation mit Ben Hankammer von der University of Brisbane in Australien an der gentechnischen Veränderung von Grünalgen. Objekt der Forschung ist hierbei vor allem *Chlamydomonas reinhardtii*. Diese mutierte Alge „Stm6“ kann achtmal so viel Wasserstoff erzeugen wie in natura. In Höchstzeiten liefert der Einzeller für vier bis fünf Tage 7 ml H₂/h/l Nährlösung.⁵⁴

Die Arbeitsgruppe „Bioenergie“ der RWTH Aachen befasste sich in früheren Forschungsarbeiten unter anderem mit der fermentativen Wasserstoffproduktion mit *Clostridium butyricum*.⁵⁵ Derzeitige Arbeiten beschäftigen sich neben der Prozessoptimierung, Immobilisierung von Mikroorganismen auf porösen Trägermaterialien und Tests verschiedener organisch belasteter Abwässer auch mit der Weitervergärung der Hauptnebenprodukte Butter- und Essigsäure in einer zweiten Verfahrensstufe. Im Rahmen eines Verbundkonzeptes sollen kontinuierlich Wasserstoff und Methan zur Steigerung der Gesamtenergie erzeugt werden.

Das Schlüsselenzym Hydrogenase in Grünalgen katalysiert den Wasserstoffmetabolismus nur unter anaeroben Bedingungen. Daher beschäftigt sich die Abteilung „Physiologie und Biotechnologie der Pflanzlichen Zelle“ der Christian-Albrechts-Universität Kiel mit dem Potenzial der Wasserstoffproduktion durch Cyanobakterien. Diese Hydrogenase ist gegenüber Sauerstoff stabiler.

⁵³ Fritsch 2009.

⁵⁴ Donner 2007.

⁵⁵ Fritsch 2008.

Die AG Photobiotechnologie von Prof. Thomas Happe und der Lehrstuhl Biochemie der Pflanzen (Prof. Matthias Rögner) der Ruhr-Universität Bochum arbeiten unter anderem an der technischen Realisierung. Die Wasserstoffproduktion durch Algen wurde bislang im Labormaßstab (10 l-Reaktoren) unter Schwefelmangel etabliert. Dabei wurden durchschnittlich 1 l H₂/Tag und 4 l Algenkultur erzeugt. Durch die erhöhte Algenproduktion kann dieses System nicht ohne Weiteres in den großtechnischen Maßstab überführt werden. Der Wasserstoff muss somit in einem zweistufigen Verfahren gebildet werden: Phase 1 stellt die Wachstumsphase der Grünalge dar (kleiner Bioreaktor für die Anzucht). Wenn der anfänglich zugegebene, zum Wachstum notwendige Schwefel verbraucht ist, wird das Wachstum eingestellt und die Produktionsphase (Phase 2, Reaktor zur Wasserstoffherzeugung) beginnt. Durch diese Selbstentschwefelung konnte die Wasserstoffproduktion um bis zu 30 Prozent gesteigert werden. Die Beleuchtung des Gesamtsystems besitzt hierbei zudem großes Optimierungspotenzial. Die Verwendung von Tageslicht hat den großen Vorteil, dass es kostenlos ist und nahezu grenzenlos zur Verfügung steht. Dennoch wurde bei einer Beleuchtung mit rotem und blauem Licht während der Wasserstoffproduktionsphase eine gesteigerte Enzymaktivität und somit eine erhöhte H₂-Menge festgestellt. Neben der Bildung von Wasserstoff direkt im Organismus untersucht die Arbeitsgruppe auch zellfreie Systeme. Zwar stellt sich eine Separation des Enzyms Hydrogenase aus Grünalgen in großen Mengen noch als schwierig dar; dennoch gelang eine heterologe Expression des Enzyms in einen anderen Wirt, zum Beispiel einem bestimmten Bakterium. Dies könnte in naher Zukunft zur Produktion von Hydrogenasen in ausreichend großer Menge führen. Das aufgereinigte Enzym könnte in bioanalogen Membranen (mobile Brennstoffzelle) eingebaut werden. Bei optimaler Versorgung mit Protonen und Elektronen kann ein Molekül Hydrogenase 5.000 Moleküle H₂ je Sekunde umsetzen.⁵⁶

6 ZUSAMMENFASSUNG

Erneuerbare Energien sind derzeit ein wichtiges Investitionsthema. Im Zuge steigender Ölpreise und Klimaschutzbemühungen erlangen Biokraftstoffe immer größere Bedeutung. Deutschland hat sich durch eine frühe Förderung des Sektors Bioenergie einen Vorsprung gegenüber anderen Ländern verschafft. Die Politik unterstützt innovative Vorschläge zur Entwicklung und Umsetzung neuer Verfahren zur Herstellung Biomasse-basierter Kraftstoffe. Unter dem Gesichtspunkt des Rohstoffwandels kann geschlussfolgert werden:⁵⁷

- Biokraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind regional verfügbar. Über geeignete Rohstoffe und technische Wandlungsverfahren besitzen sie Eigenschaften, die denen fossiler Kraftstoffe sehr ähneln.

⁵⁶ Happe/Müllner 2006.

⁵⁷ Vgl. Pfennig 2007, Schaub/Vetter 2007.

- Hinsichtlich ihrer CO₂-Bilanz unterstreichen sie den Übergang von nicht-nachhaltiger (fossiler) zu nachhaltiger Rohstoff-Wirtschaft (im Bereich der organischen Rohstoffe).
- Die Produktion von Biokraftstoffen ist mengenmäßig begrenzt und kann deshalb Erdöl nicht vollständig ersetzen. Ursachen für die Begrenzung finden sich besonders in den Anbauflächen, der Nettoproduktion der Fotosynthese, den Verlusten bei der Rohstoffumwandlung und der Verfügbarkeit von Wasser.
- Es besteht Optimierungsbedarf in Bezug auf die Biomasse-Erträge. Durch fortschreitende Verbesserung der landwirtschaftlichen Erträge, neue Zweikulturnutzungssysteme und Einhaltung von weiten Fruchtfolgen kann die Nachhaltigkeit sichergestellt werden. Die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion darf dabei nicht außer Acht gelassen werden.
- Viele Forschungsvorhaben beschäftigen sich heutzutage mit der Weiterentwicklung der Biokraftstoffe von der 1. zur 2. Generation. Besonders auf dem Gebiet der enzymatischen Aufspaltung von Lignocellulose muss die Forschung vorangetrieben werden.
- Biomasse-basierende Kraftstoffe bilden für sich allein nur eine Teillösung der Rohstoffsicherheit. Durch Effizienzsteigerung, Anpassung der Konsumgewohnheiten und Einschränkung im Bereich Mobilität können langfristig Rohstoffe sichergestellt werden.

Das Interesse an biogenem Methan ist in letzter Zeit wieder stark gewachsen. Seit der Novellierung des EEG 2004 und den damit verbundenen erhöhten Stromeinspeisungstarifen boomt der Biogasanlagenbau in Deutschland. Durch den Bonus für die Fermentation von nachwachsenden Rohstoffen arbeiten Wissenschaftler und Landwirte eng zusammen. Kontrollierter Anbau von Energiepflanzen oder die Verwertung von Ernterückständen und biogenen Abfällen können regionale und nachhaltige Quellen zur Biogaserzeugung bereitstellen. Die technische Optimierung des Prozesses, aber auch biologische Aspekte der Vergärung werden in der aktuellen Forschung diskutiert und bieten noch viel Potenzial.

Die Produktion von Biowasserstoff durch Bakterien und Grünalgen befindet sich noch am Anfang der Entwicklung. Zwar wurden bereits verschiedene Scale Up-Versuche (Reaktoren mit 1-10 l) erfolgreich getestet, doch trotz allem ist es zur großtechnischen Realisierung noch ein großer Schritt. Grundlegende Parameter wie zum Beispiel die Beleuchtung der Algen sind entscheidend für die Auslegung von Reaktormodulen. Zellfreie Systeme bieten aufgrund hoher Enzymaktivitäten ein erhebliches biotechnologisches Nutzungspotenzial. Durch gentechnisch veränderte Mikroorganismen könnte die Wasserstoffherzeugung in zellulären wie auch zellfreien Systemen beträchtlich gesteigert werden. Mit diesem Thema befasst sich zunehmend die Grundlagenforschung.

7 LITERATUR

BAdW 2007

Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Ökonomische und ökologische Bewertung, München: Pfeil-Verlag, 2007.

BMELV 2007

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMELV: Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik, 2007. URL: http://www.bmelv.de/cIn_045/nn_751706/DE/14-WirUeberUns/Beiraete/Veroeffentlichungen/NutzungBiomasseEnergiegewinnung.html__nnn=true [Stand: 09.03.2009].

BMU 2008

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung, Berlin, 2008. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_zahlen_update.pdf [Stand: 23.02.2009].

BMWi 2008

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiedaten – nationale und internationale Entwicklung. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html> [Stand: 23.02.2009].

Donner 2007

Donner, S.: „Wasserstoff sprudelt aus der Turboalge“, in: Chemische Rundschau 5 (2007), Forschung/Innovation, S. 99-101.

Eder/Schulz 2006

Eder, B./Schulz, H.: Biogas Praxis – Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Freiburg: Ökobuch Verlag (3. Aufl.) 2006.

EWSA 2007

Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses (EWSA) zum Thema „Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament – Fortschrittsbericht Biokraftstoffe – Fortschritte bei der Verwendung von Biokraftstoffen und anderen erneuerbaren Kraftstoffen in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union“, Brüssel, 2007.

Faulstich et al. 2006

Faulstich, M./Greiff, K./Mayer, W./Mocker, M./Quicker, P./Schieder, D.: Energetische Nutzung von Biomasse. Potenziale – Entwicklung – Chancen (Abfalltage Baden-Württemberg), Stuttgart, 2006. URL: http://www.wz-straubing.de/ret/download/2006_09_26_aufsatz_abfalltage_badenwuertt_2006.pdf [Stand: 23.02.2009].

Festel 2007

Festel, G.: „Biotkraftstoffe in Deutschland – Produktionskosten und Marktchancen“, in: Chemie Ingenieur Technik 79 (2007), Nr. 5.

FNR 2007a

Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.): Daten und Fakten zu nachwachsenden Rohstoffen, Gülzow, 2007. URL: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_303fg_dafa_071107.pdf [Stand: 23.02.2009].

FNR 2007b

Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.): Bioenergie – Pflanzen, Rohstoffe und Produkte, 2007.

FNR 2008a

Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.): Biotkraftstoffe Basisdaten Deutschland, Gülzow, 2008. URL: http://www.biobeth.de/download/pdf_174-basisdaten_biokraftstoff-freigabe.pdf [Stand: 23.02.2009].

FNR 2008b

Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.): Biogas Basisdaten Deutschland, Gülzow, 2008.

Fritsch 2009

Fritsch, M.: Versuche zur Intensivierung der fermentativen Wasserstoffproduktion mesophiler Clostridien durch verfahrenstechnische Maßnahmen, Dissertation, RWTH Aachen, 2009.

Fritsche et al. 2004

Fritsche, U. R. et al.: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse (Verbundprojekt, Projekträger FZ Jülich), Darmstadt, 2004. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/biomasse_vorhaben_endbericht.pdf [Stand: 23.02.2009].

Gaffron 1939

Gaffron, H.: „Reduction of CO₂ with molecular hydrogen in green algae“, in: Nature 143 (1939), S. 204-205.

Happe 2006

Happe, T.: Leistungsfähigkeit von Mikroalgen zur Biomasse- und Wasserstoffproduktion, Ruhr-Universität Bochum, 2006. URL:http://www.mstonline.de/mikrosystemtechnik/mst-fuer-energie/medien/04_happe.pdf [Stand: 23.02.2009].

Happe/Müllner 2006

Happe, T./Müllner, K.: Biokraftstoffe aus Algen: Photobiologische Wasserstoffproduktion und CO₂-Fixierung, Ruhr-Universität Bochum, 2006.

Kröber 2005

Kröber, A.: Energetische Getreidenutzung in Deutschland, Diskursive Technikbewertung unter Berücksichtigung ethische Aspekte (Diplomarbeit), Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2005.

Leible et al. 2003

Leible, L./Arlt, A./Fürniß, B./Kälber, G./Lange, S./Nieke, E./Rösch, C./Wintzer, D.: Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen, hrsg. vom Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 2003. URL: <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2003/leua03a.pdf> [Stand: 23.02.2009].

Mantau 2004

Mantau, U.: Holzrohstoffbilanz Deutschland, Bestandsaufnahme 2002 (Abschluss-Forschungsbericht), Hamburg, 2004. URL: <http://www.bundeswaldinventur.de/media/archive/226.pdf> [Stand: 23.02.2009].

Pfennig 2007

Pfennig, A.: „Globale Bilanzen als Wegweiser für nachhaltiges Wirtschaften“, in: Chemie Ingenieur Technik 79 (2007), Nr. 12.

Renneberg 2007

Renneberg, R.: Biotechnologie für Einsteiger, München: Elsevier GmbH (2. Aufl.), 2007.

Schaub/Vetter 2007

Schaub, G./Vetter, A.: „Biokraftstoffe – Eine Übersicht“, in: Chemie Ingenieur Technik 79 (2007), Nr. 5.

UBA 2007

Umweltbundesamt (UBA): Umweltdaten Deutschland: Nachhaltig wirtschaften – Natürliche Ressourcen und Umwelt schonen, 2007. URL: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3244.pdf> [Stand: 23.02.2009].

WBGU 2008

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung, 2008. URL: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_vorab.pdf [Stand: 09.03.2009].

Zah et al. 2007

Zah, R./Böni, H./Gauch, M./Hischier, R./Lehmann, M./Wäger, Pa.: Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen (Schlussbericht BFE, BAFU, BLW, Schweizerische Eidgenossenschaft), 2007. URL: <http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/8514.pdf> [Stand: 23.02.2009].

> ERFOLGSFAKTOREN DER BIOETHANOLPRODUKTION

MURILLO VILLELA FILHO

1 BIOETHANOL ERGÄNZT UND ERSETZT BENZIN

Bioethanol wird als Kraftstoff für Ottomotoren verwendet. Langfristig ist die Bioethanolproduktion erfolgreich, wenn sie einen niedrigeren Ethanol- als Benzinpreis erlaubt. Bioethanol kann als Kraftstoffbeimischung zu Benzin oder als Hauptbestandteil von Ottokraftstoff eingesetzt werden. Bioethanol ermöglicht eine sauberere Verbrennung als Benzin und besitzt dabei 60 Prozent der Energiedichte von Benzin. Als Beimischung fungiert Bioethanol als Antiklopffmittel und erhöht als Sauerstoffträger die Oktanzahl. Beimischungen mit Volumenverhältnissen von bis zu 10 Prozent bewirken dadurch keine Einschränkung der Eigenschaften von Benzin. Bioethanol wird deswegen in den USA als Ersatz für das Antiklopffmittel MTBE benutzt. Die Beschaffung von Bioethanol über Produzenten mit einer durchschnittlichen Jahresproduktion von 100.000 Tonnen erfordert allerdings einen zusätzlichen logistischen Aufwand für die Ölindustrie. Wenn der Bioethanolpreis niedriger ist als der Benzinpreis, wird die Beimischung trotzdem rentabel und damit attraktiv. Motiviert durch diese wirtschaftliche Attraktivität, setzt sich die Ölindustrie freiwillig für die Beimischung von Bioethanol ein. Die Erfüllung von Quoten wird dadurch auf eine wirtschaftliche Basis gestellt. Sie bringt außerdem durch niedrigere Kraftstoffkosten Vorteile für die Konsumenten. In diesem bereits beobachteten Szenario wird Umweltschutz durch Vorteile für die Volkswirtschaft finanziert und nicht auf Kosten der Volkswirtschaft erzwungen.¹

Als Hauptbestandteil von Ottokraftstoffen kann Bioethanol in sogenannten Flex-Fuel-Vehicles (FFV) benutzt werden. Die Flex-Fuel-Technologie erlaubt Ottomotoren, Bioethanol-Benzin-Gemische in jedem Verhältnis zu verbrennen. Auch das reine Bioethanol kann getankt werden. Diese Technologie wurde von der Firma Bosch entwickelt.² Es handelt sich dabei um eine seit 2003 erfolgreich vermarktete Technologie. 2007 wurden zwei Millionen Autos mit Flex-Fuel-Technologie verkauft.³

Wenn Bioethanol als im Vergleich zu Benzin günstigerer Kraftstoff vermarktet wird, bietet er einen Vorteil für den Autofahrer. Der finanzielle Vorteil, einen billigeren Kraftstoff tanken zu können, motiviert Autofahrer, Flex-Fuel-Vehicles zu kaufen. Denn sie

¹ Macedo 2005.

² Vgl. Bosch 2008.

³ UNICA 2008.

besitzen mit diesem Auto immer die Flexibilität, den günstigsten Kraftstoff tanken zu können. Der günstigere Kraftstoff wird nach Preis und Energiegehalt ermittelt. Bei dem momentanen durchschnittlichen Preisverhältnis von Bioethanol zu Benzin von 0,53 an der brasilianischen Zapfsäule ist Bioethanol dort vorteilhaft.⁴ Dieser Vorteil amortisiert in kurzer Zeit die Mehrkosten für das Flex-Fuel-Vehicle. Dadurch entsteht Nachfrage für Autos mit der Flex-Fuel-Technologie. Auf diese Nachfrage hat die Automobilindustrie schnell reagiert. Die absolute Zahl der bioethanolfähigen Autos stellt ein großes Nachfragepotenzial dar, von dem jede Tankstelle profitieren will. Das ermöglicht die Umrüstung auf den Verkauf eines zusätzlichen Kraftstoffes. Bioethanolproduzenten profitieren ebenfalls von der Nachfrage. Sie ermöglicht eine Vergrößerung des Produktionsmaßstabs und damit eine bessere Rentabilität der Anlagen. Für Landwirte bedeutet der Erfolg dieser Wertschöpfungskette die Sicherheit, ohne Abhängigkeit von Subventionen produzieren zu können. Für die Volkswirtschaft bedeutet dieses Szenario eine Entlastung der öffentlichen Hand durch Abbau von Subventionen. 89 Prozent Flex-Fuel-Markanteil in Brasilien bei Neuzulassungen fünf Jahre nach der Markteinführung und 52 Prozent Bioethanolanteil auf dem Ottokraftstoffmarkt belegen den Erfolg dieses Modells.⁵

2 ERFOLGSFAKTOREN

Welches sind die Faktoren, die eine Bioethanolproduktion sowie dessen Vertrieb unterhalb des Benzinpreises ermöglichen?

2.1 ROHSTOFFAUSWAHL

Wichtigster Erfolgsfaktor der Bioethanolproduktion ist die Rohstoffauswahl. Weltweit werden unterschiedliche Rohstoffe für die Produktion von Bioethanol als Treibstoff verwendet: Zuckerrohr in tropischen Ländern wie beispielsweise Brasilien, Mais in den USA, Teilen von Europa (zum Beispiel Spanien und Ungarn) und Asien, Zuckerrüben ebenso wie Weizen und weitere Getreide in Europa (unter anderem Deutschland). Zusätzlich startet die Cassava-basierte Bioethanolproduktion in Asien (zum Beispiel Thailand und China). Gebunden an die Wahl der Pflanzenart sind die Vergütung für die Landwirtschaft, die Festlegung der Logistikkosten und die Bestimmung des Produktionsprozesses sowie der möglichen Energiequellen. Damit wird die gesamte Kostenstruktur entscheidend von der Rohstoffauswahl diktiert.

2.1.1 PFLANZENART UND BIOCHEMISCHE FAKTOREN

In allen Pflanzen wird während der Fotosynthese die Sonnenenergie unter Einbindung von CO₂ aus der Luft in Form von Kohlenhydraten gespeichert. Diese Kohlenhydrate dienen als Rohstoffe für die Bioethanolproduktion. Für die CO₂-Fixierung gibt es

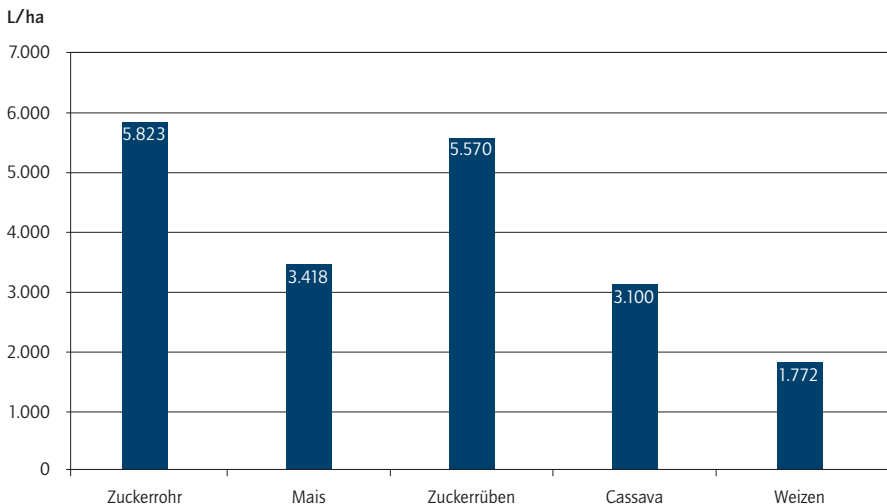
⁴ Stand: November 2008 in Sao Paulo, Brasilien.

⁵ Jank 2008.

unterschiedliche Mechanismen. Je nach Mechanismus werden die Pflanzen in C_3 - und C_4 -Pflanzen unterteilt. Pflanzenarten aus gemäßigten Klimazonen wie zum Beispiel Weizen (*Triticum aestivum*) und Roggen (*Secale cereale*) gehören zu den C_3 -Pflanzen. Pflanzenarten, die an hohe Temperaturen und an die intensive Lichteinstrahlung der Tropen angepasst sind, gehören zu den C_4 -Pflanzen. Beispiele für C_4 -Pflanzen sind Zuckerrohr (*Saccharum officinarum*) und Mais (*Zea mays*). Der C_4 -Mechanismus ermöglicht Fotosyntheseraten, die zwei- bis dreimal größer sind als bei C_3 -Pflanzen.⁶ Die Geschwindigkeit der CO_2 -Fixierung, und damit auch der Kohlenhydrateproduktion, ist zusammen mit der Vegetationsperiode maßgeblich für die Produktivität von Bioethanol aus einer Pflanzenart. Die „Produktivität“ wird hier als Ertrag von Bioethanol pro angebaute Fläche definiert. Faktoren, die die Produktivität beeinflussen, sind Lichteinstrahlung, Wetter, Wasserverfügbarkeit etc.

Abbildung 1 zeigt die Produktivität der am häufigsten eingesetzten Pflanzenarten.⁷ Ihr ist zu entnehmen, dass die C_4 -Pflanzen eine höhere Produktivität ermöglichen als die C_3 -Pflanzen. Außerdem ist eine höhere Produktivität der Zuckerpflanzen (Zuckerrohr und Zuckerrüben) im Vergleich mit den stärkehaltigen Pflanzen (Mais, Cassava und Weizen) zu beobachten. Der CO_2 -Fixierungsweg, die längere Vegetationsperiode und die hohe Lichteinstrahlung bewirken, dass Zuckerrohr die höchste Produktivität aufweist.

Abbildung 1: Produktivität (L/ha) der in der Bioethanolproduktion am häufigsten eingesetzten Pflanzenarten



⁶ Raven 1992.

⁷ Vgl. Pastrello 2006 und FAOSTAT 2007.

2.1.2 LANDWIRTSCHAFTLICHE FAKTOREN

Die landwirtschaftliche Phase macht bei Zuckerrohr mindestens 61 Prozent der Bioethanolproduktionskosten aus.⁸ Für andere Pflanzenarten sind die Werte höher. Die wichtigsten Kosten für die landwirtschaftliche Phase der Bioethanolproduktion setzen sich aus den Kosten für die Agrarfläche (zum Beispiel Pacht), den Anbau, die Düngung, die Ernte und den Transport zu dem verarbeitenden Betrieb zusammen. Die Kosten für die Agrarfläche werden über die Produktivität bestimmt. Die Kosten für den Anbau sind über die gesamte Lebensdauer der Pflanze zu verteilen; bei ausdauernden Pflanzen sind die effektiven Kosten daher geringer als bei einjährigen Kulturen. Zuckerrüben, Mais, Weizen und Cassava werden jährlich gesät bzw. angebaut. Bei wirtschaftlichem Anbau kann Zuckerrohr dagegen je nach Region über sechs Jahre in Folge geerntet werden, bevor die Pflanze ersetzt werden muss. Dadurch sind die Anbaukosten für diese Pflanzenart substanziiell geringer. Die Düngung ist stark von der spezifischen Bodenbeschaffenheit abhängig. Sie wird daher in diesem Beitrag nicht als kulturspezifisch betrachtet. Es sei trotzdem darauf hingewiesen, dass eine Integration der Bioethanolproduktion in die Agrarlandschaft eine nachhaltige Rückführung von Mineralien erlaubt (siehe 2.4). Auf diese Weise ist eine starke Verringerung der Düngungskosten erreichbar.

Die Bioethanolproduktion erfordert eine effiziente Landwirtschaft. Diese ist mit maschineller Ernte verbunden. Teilweise sind die spezifischen Erntekosten bei Einsatz von Handarbeit bei der Ernte geringer, aber in der Gesamtbetrachtung der Bioethanolproduktion führt Handarbeit zu höheren Kosten. Wesentlicher Kostenfaktor bei der maschinellen Ernte ist die Abschreibung der Erntegeräte. Diese Abschreibung lässt sich über die Dauer der Ernte verteilen. Damit ist die Erntedauer entscheidend für die Höhe der Abschreibungskosten. Während Getreide (Mais und Weizen) eine konzentrierte Erntezeit verlangt, verteilt sich die Ernte von Zuckerrüben über ca. drei Monate. Je nach Region wird Zuckerrohr bis zu acht Monate lang geerntet. Damit ist die Abschreibung der Erntemaschinen bei Zuckerrohr am günstigsten. Cassava wird über das ganze Jahr geerntet. Für die empfindliche Arbeit gibt es noch keine geeignete Maschine. Die Ernte wird meistens in Familienbetrieben und überwiegend in Handarbeit durchgeführt; sie weist deswegen die geringeren Erntekosten auf.⁹

2.1.3 LOGISTIKKOSTEN

Die Logistikkosten werden in zwei Gruppen unterteilt: Transport- und Lagerkosten. Die Transportkosten wirken sich auf die wirtschaftliche, industrielle Verwertung einer Pflanze limitierend aus. Sie bestimmen heute die obere Maßstabgrenze der wirtschaftlichen Bioethanolproduktion.¹⁰ Dagegen spielen die Lagerkosten eine untergeordnete Rolle und werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

⁸ Vgl. Consecana 2008.

⁹ Vgl. Thai Tapioca Trade Association 2008.

¹⁰ Die untere Grenze ergibt sich aus der Kostendegression für die Produktion von Commodities und liegt bei ca. 80.000 t/a.

Die Transportkosten ergeben sich aus der Produktivität pro Fläche und der Belegungs-
dichte der die verarbeitende Anlage umgebenden Ländereien. Die Belegungs-
dichte wird durch die Fruchtwechsel bestimmt. Während die Belegungs-
dichte bei Graspflanzen (Zuckerrohr, Mais und Weizen) und Cassava wegen der Fruchtfolge nicht limitiert ist,
werden Zuckerrüben in einer Dreifeldwirtschaft angebaut. Das bedeutet, dass lediglich
ein Drittel der Fläche um die verarbeitende Anlage mit Zuckerrüben bestellt werden
kann. Dies ist ein stark einschränkender Nachteil für die rübenbasierte Bioethanolpro-
duktion. Entweder werden die Transportkosten durch eine Einschränkung der Produk-
tionskapazität wettbewerbsfähig gehalten oder hohe Transportkosten werden zugun-
sten einer wettbewerbsfähigen Produktionskapazität in Kauf genommen.

2.1.4 BESTIMMUNG DES PRODUKTIONSPROZESSES

Die Art des Rohstoffs bestimmt den Bioethanol-Produktionsprozess.¹¹ Bei Zuckerrohr
handelt es sich um einen dreistufigen Prozess: Auspressen, Fermentieren, Destillieren.
Die Zuckerrübenverarbeitung nimmt bereits an Komplexität zu. Die Zuckerrübe wird
zuerst in Schnitzel zerteilt, anschließend wird der Rohsaft unter Nutzung des Diffu-
sionsprozesses durch heißes Wasser extrahiert. Es folgen Fermentation und Destillation.
Cassava wird ebenfalls zuerst in Schnitzel zerteilt. Die Stärke aus den Schnitzeln wird
verflüssigt und verzuckert. Es folgt die Fermentation und die Destillation. Weizen wird
vermahlen, die enthaltene Stärke wird verflüssigt, verzuckert und anschließend fermen-
tiert. Das Bioethanol wird destilliert. Verzuckerung und Fermentation können gleichzei-
tig geschehen. In diesem Fall wird von „Simultaneous Saccharification and Fermenta-
tion“ gesprochen. Die Rückstände der Verzuckerung bleiben im Fermentationsgefäß
und werden nach der Destillation mit der gebildeten Hefe als Futtermittel verwertet
(siehe 2.4). Mais kann ebenfalls auf diese Weise zu Bioethanol verarbeitet werden. Der
Prozess wird „Trockenmahlverfahren“ genannt und kommt in den USA am häufigsten
vor. Alternativ wird Mais verquollen, gemahlen und in die verschiedenen Fraktionen
getrennt. Die stärkehaltige Fraktion wird verzuckert und fermentiert; der Bioethanol
wird destilliert. Es handelt sich dabei um das sogenannte Nassmahlverfahren. Die ent-
stehenden Produkte werden unabhängig voneinander vermarktet. Dieser Prozess wird
bei größeren Anlagen bevorzugt.

Die Komplexität des Verfahrens korreliert nicht gezwungenermaßen mit der Wirt-
schaftlichkeit des Prozesses, jedoch mit dem gebundenen Kapital und den damit ver-
bundenen Verzinsungskosten und Risiken. Außerdem erfordern komplexere Anlagen
mehr Know-how und besser ausgebildetes Personal.

¹¹ Paul 1980.

2.1.5 MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN FÜR DIE PRODUKTIONSANLAGEN

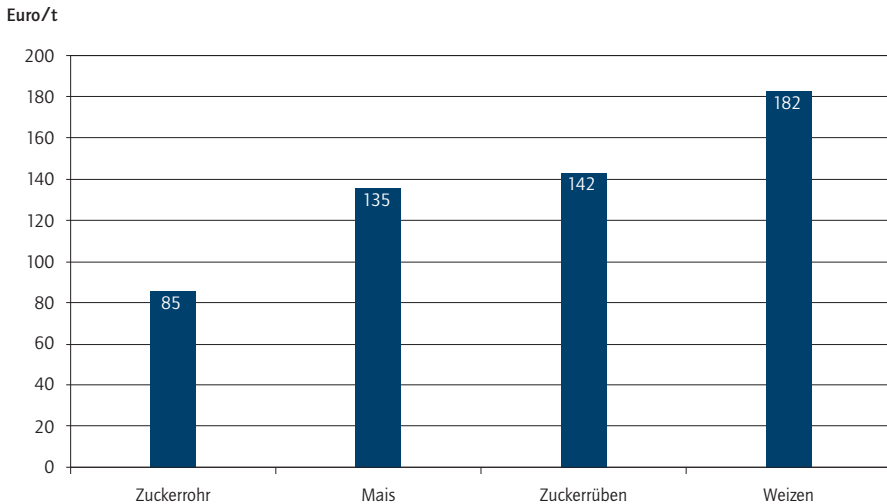
Die Produktion von Commodities erfordert hocheffiziente Anlagen. Dort müssen alle Massenströme optimal verwertet werden. Entsprechend müssen die Nebenprodukte der Pflanzenverarbeitung ebenfalls verwertet werden (vgl. 2.4). Sie bestehen in der Regel aus pflanzlichen Fasern und können zum Beispiel als Futtermittel verkauft werden. Gibt es keinen Abnahmemarkt, werden sie energetisch verwertet. So werden die Zuckerrohrrückstände („Bagasse“ genannt) als Treibstoff für die kostengünstige Dampf- und Stromerzeugung genutzt¹² (dieser Aspekt wird in 2.2 behandelt). Entstehendes Abwasser in der Stärkeverarbeitung von Cassava wird zur Biogasproduktion verwendet und kann ebenfalls als Energiequelle für die Anlage dienen.

2.1.6 ROHSTOFFBEDINGTE PRODUKTIONSKOSTEN

Aus den beschriebenen Gründen werden die Produktionskosten von der Rohstoffauswahl bestimmt. So ist es möglich, die durchschnittlichen Produktionskosten von Bioethanol in Abhängigkeit vom Rohstoff zu ermitteln. Dieser Wert erlaubt einen objektiven Vergleich der Wettbewerbsfähigkeit einzelner Rohstoffe. Aus klimatischen und landwirtschaftlichen Gründen unterscheidet sich die Kostensituation zwischen den Kontinenten. Auch währungskursbedingte Einflüsse sind zu beobachten. Deswegen werden Referenzregionen nach ihrer Bedeutung für diese Darstellung ausgesucht. Für Zuckerrohr wird die Kostensituation in Brasilien, für Mais in den USA, für Zuckerrüben in Europa und für Weizen ebenfalls in Europa abgebildet. Cassava wird erst seit Kurzem wieder zur Produktion von Bioethanol unter marktwirtschaftlichen Bedingungen in Asien genutzt. Die vorhandene Datenbasis erlaubt noch keine brauchbare Auswertung. Die Werte wurden für das Erntejahr 2006/2007 bestimmt. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis.

¹² Chen/Chou 1993.

Abbildung 2: Bioethanol-Produktionskosten (Euro/t Ethanol) in Abhängigkeit von der Rohstoffart.



Die günstigste Variante der Bioethanolproduktion ist die Gewinnung aus Zuckerrohr in Brasilien (85 Euro/t). Die Produktionskosten für Bioethanol aus Mais in den USA (135 Euro/t) und aus Zuckerrüben in der EU (142 Euro/t) sind miteinander vergleichbar. Die europäische Bioethanolproduktion aus Weizen ist dagegen mit 182 Euro/t kaum wettbewerbsfähig. Daraus wird deutlich: Der Rohstoff ist der Schlüssel zur erfolgreichen Bioethanolproduktion.

2.2 NIEDRIGE ENERGIEKOSTEN

Bioethanol wird aus einer Fermentationsbrühe über Destillation gewonnen. Es handelt sich um eine sehr energieintensive Aufarbeitung. Damit die Energiekosten so gering wie möglich gehalten werden können, wurde die Endkonzentration von Ethanol ständig erhöht. 1985 erreichte die durchschnittliche Bioethanolkonzentration am Ende einer Fermentation bereits 9,5 Prozent.

Bei dieser Entwicklung wurde nicht beachtet, dass Bioethanol durch lebende Organismen produziert wird, auf die es toxisch und damit inhibierend auf die Fermentation wirkt. In der Folge wird die spezifische Bioethanolbildungsgeschwindigkeit im Verlauf der Fermentation geringer; die sogenannte Produktinhibierung tritt ein.¹³ Damit eine effektive Auslastung der Anlage erreicht wird (vgl. 2.3), ist es erforderlich, eine geringe

¹³ Hagen 1993.

Ethanolkonzentration während der Produktion zu halten. Eine geringe Produktkonzentration hat einen hohen Energieverbrauch während der Aufarbeitung zur Folge. Diese lässt sich unter wirtschaftlichen Aspekten nur mit sehr geringen Energiepreisen verwirklichen.

Bei der Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr wird der anfallende holzartige Rückstand von Zuckerrohr, die Bagasse, als Treibstoff für die Dampf- und Energieerzeugung verwendet (siehe 2.1.5). Die thermische Verwertung eines ohnehin anfallenden Nebenproduktes ist eine sehr günstige Energiequelle. Eine Tonne Zuckerrohr liefert 150 kg Bagassefasern. Der Energieinhalt der Bagasse beträgt 17,9 MJ/kg Fasern. Die erzeugte Energiemenge reicht aus, um die Bioethanolanlage zu versorgen.¹⁴ Es bleibt noch ein Überschuss übrig, der gewinnbringend ins Netz eingespeist werden kann. Der erzielte Erlös wird zur Finanzierung der Dampf- und Stromerzeugungsanlage verwendet. Mit dieser preisgünstigen Energiequelle ist es möglich, die Endkonzentration der Bioethanolfermentation auf ein wirtschaftliches Optimum zu vermindern. Heute beträgt die durchschnittliche Endkonzentration 8,5 Prozent. Damit verknüpft ist eine Verkürzung der durchschnittlichen Fermentationsdauer von 13 Stunden im Jahr 1985 auf gegenwärtig 8,5 Stunden.¹⁵

Wenn für die Produktion keine kostengünstige Energie zur Verfügung steht, verlangt die Wirtschaftlichkeit Bioethanol-Endkonzentrationswerte von über 10 Prozent. Die Folge ist eine niedrigere Produktivität der Anlage und, damit verbunden, ein Verlust an Wettbewerbsfähigkeit. Niedrige Energiekosten sind bei der Produktion von Energieträgern ein entscheidender Faktor.

2.3 MAXIMIERUNG DER RAUM-ZEIT-AUSBEUTE

Aus der Marktperspektive kann Bioethanol als Commodity betrachtet werden. Eine Folge davon ist die sehr geringe Marge pro Einheit. Unter diesen Bedingungen müssen aus betriebswirtschaftlichen Gründen die Fixkosten über ein großes Produktionsvolumen verteilt werden, um eine gute Rentabilität zu ermöglichen. Um dieses Ziel erreichen zu können, ist eine maximale Produktbildung pro Zeit- und Reaktoreinheit erforderlich. Diese Größe wird als „Raum-Zeit-Ausbeute“ definiert.¹⁶ Ihre Maximierung ist entscheidend für den Erfolg der Bioethanolproduktion.

2.3.1 MAXIMIERUNG DER RAUM-ZEIT-AUSBEUTE DURCH HEFE-RÜCKFÜHRUNG

Fermentationsverfahren beinhalten zwei Phasen: die Wachstumsphase und die Produktionsphase. In der Wachstumsphase erhöht sich die Zellzahl unter Verbrauch von Substrat. In der Produktionsphase wird das Substrat von den vorhandenen Zellen zur Produktbildung verbraucht. Die beiden Phasen können gleichzeitig oder voneinander entkoppelt ablaufen.

¹⁴ de Camargo 1990.

¹⁵ Finguerut 2005.

¹⁶ Levenspiel 1999.

Am Ende der Wachstumsphase erlaubt die höhere Zellzahl eine höhere Produktbildungsgeschwindigkeit. Im Satzbetrieb kann dieser Effekt im Fall einer Produktinhibierung teilweise aufgehoben werden. Das ist bei der Bioethanolproduktion der Fall. Gleichzeitig bedeutet die Bildung von Biomasse eine Verringerung der Produktausbeute, weil das verbrauchte Substrat nicht in Bioethanol umgesetzt wird.

Bei der Bioethanolproduktion aus Getreide wird die gebildete Biomasse als Futtermittel verkauft (siehe 2.4).¹⁷ Das hat einen positiven Effekt auf den Deckungsbeitrag, erfordert aber eine gekoppelte Wachstums- und Produktionsphase. Das limitiert aus den erwähnten Gründen die Raum-Zeit-Ausbeute.

Eine effizientere Konfiguration wird durch eine Weiterentwicklung des Belle-Moinot-Verfahrens erreicht.¹⁸ In diesem Verfahren werden die Zellen am Ende einer Fermentation durch Zentrifugation von der Fermentationsbrühe getrennt, durch chemische Behandlung rekonditioniert und erneut in einen Fed-Batch-Betrieb eingesetzt. So werden Wachstums- und Produktionsphasen entkoppelt. Die Produktionsphase verläuft ständig unter hoher Zellzahl. Die Produktbildungsgeschwindigkeit wird dadurch maximiert. Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist eine niedrige Bioethanolkonzentration am Ende der Fermentation. Hohe Bioethanolkonzentrationen schädigen die Hefezellen und machen die Rückführung unmöglich. Ein wichtiger Nebeneffekt der Zellrückführung ist die Unterdrückung des Hefewachstums. Damit kann mehr Substrat in Bioethanol umgewandelt werden, was eine Erhöhung des Ertrags zur Folge hat. Die erreichte Verbesserung der Raum-Zeit-Ausbeute ermöglicht die höchstmögliche Rentabilität.¹⁹

2.4 PRODUKTVERBUND

Die Verarbeitung von Agrarrohstoffen liefert neben dem fermentierbaren Zucker viele Nebenprodukte. Sie bestehen in der Regel aus pflanzlichen Fasern, Eiweißen und Ölen. Die Zusammensetzung der Produkte, ihr Verhältnis und ihre Qualität sind pflanzenartspezifisch. Selbst der Zucker kann in unterschiedlichen Qualitäten anfallen und daher zu unterschiedlichen Zwecken verwendet werden. Auch die fermentative Produktion von Bioethanol liefert verschiedene Nebenprodukte. Die industrielle Ausbeute der Bioethanolproduktion liegt zwischen 90 und 92 Prozent der theoretischen Maximalausbeute. Die wichtigsten Nebenprodukte sind Glycerin, organische Säuren und Hefe. Die Erlöse aus der Nebenproduktkommerzialisierung sind ein wichtiger Bestandteil des Deckungsbeitrages. Das Konzept zur Verwendung, Veredlung und Vermarktung der unterschiedlich anfallenden Massenströme ist entscheidend für den langfristigen Erfolg der Bioethanolproduktion.

¹⁷ Jaques 2003.

¹⁸ Boinot 1936.

¹⁹ Finguerut 2005.

Wie für eine Commodity typisch, wird der Bioethanolpreis vom Markt bestimmt, das heißt von Angebot und Nachfrage. Damit ist die Höhe der Herstellungskosten unabhängig und einer Volatilität ausgesetzt. Die Rohstoffe für Bioethanol werden in der Regel auch als Commodity gehandelt. Demzufolge werden die Rohstoffpreise auch nicht von Bioethanolherstellern diktiert. Sie werden ebenfalls vom Markt bestimmt und unterliegen auch eigenen Veränderungen. Ausnahmen sind Zuckerpflanzen, deren Preis über ausgehandelte Formeln errechnet wird. Auch hier ist der Preismechanismus nicht vom Bioethanolproduzenten steuerbar. Daher kann die Gewinnmarge der Bioethanolproduktion stark schwanken und sogar zeitweise negativ sein, sodass durch die Produktion von Bioethanol ein Verlust entsteht.

Auf diese Situation kann der Bioethanolproduzent nur bedingt reagieren. Wenn aus dem Rohstoff nur Bioethanol produziert wird, muss die Produktion während des ungünstigen Zeitraumes unterbrochen werden. Bei der Verwertung des Agrarrohstoffes zur Herstellung von verschiedenen Produkten wird dieses marktbedingte Risiko minimiert. Beim Trockenmahlverfahren in der Bioethanolproduktion aus Weizen und Mais werden die anfallenden Nebenprodukte der Getreideverarbeitung in die Fermentation geleitet. Sie bestehen aus Fasern und Eiweiß und haben bei Mais auch bedeutende Ölteile. Bei der Bioethanolaufarbeitung bilden diese Rückstände zusammen mit der gebildeten Hefe den Rückstand der Destillation. Dieser Rückstand (Schlempe) wird nach der Trocknung „Dried Distillers Grains with Solubles“ (DDGS) genannt. Das DDGS wird als Futtermittel verwendet. Die Futtermittel orientieren sich teilweise an den Getreidepreisen. Auf diese Weise werden die hohen Rohstoffpreise der Bioethanolproduktion durch hohe Nebenprodukterlöse teilweise ausgeglichen. Die Flexibilität dieser Konfiguration ist gering. Außerdem ist der Erfolg der Vermarktung davon abhängig, ob ein Abnahmemarkt für derlei Nebenprodukte vorhanden ist. Wegen des hohen Fasernanteils ist das DDGS besonders für Wiederkäuer geeignet. Der Vermarktungswert ist damit in Geflügel- und Schweinezuchtregionen geringer. Auch beim Absatz der Nebenprodukte spielen die Logistikkosten eine wichtige Rolle. Daraus ergeben sich Vorteile für Bioethanolproduktionsstätten, die eine Wiederkäuerzucht im Umkreis haben.

Beim Mais-Nassmahlverfahren werden höherwertige Produkte wie Öl, Protein und Fasern vor der Bioethanolproduktion gefiltert. Dadurch wird eine höhere Wertschöpfung erzielt und unterschiedliche Märkte werden bedient. Diese Konfiguration erlaubt eine bessere Verteilung der Risiken.²⁰

Auch der Zuckerstrom kann je nach Konfiguration geteilt werden. Von dieser Möglichkeit wird bei der Zuckerrohrproduktion Gebrauch gemacht. Der Saft aus Zuckerrohr wird in unterschiedlichen Fraktionen gesammelt und veredelt. Die edlere Saftfraktion wird zu Kristallzucker aufgearbeitet. Eine verdünntere Fraktion von Zuckerrohrsaft wird zur Bioethanolproduktion verwertet. Dabei wird sie mit der Mutterlauge der Zucker-

²⁰ Jaques 2003.

kristallisation (Molasse) angereichert. Diese Konfiguration ist im Hinblick auf die Verhältnisse der Produkte flexibel. Es ist möglich, 40 bis 60 Prozent des Zuckers in der Kristallisation zu verarbeiten und den komplementären Anteil in der Bioethanolproduktion zu verwerten. Somit werden die Produktionsmengen an Zucker und Bioethanol nach Marktlage definiert. Das ermöglicht eine flexible Maximierung der Wertschöpfung. Gleichzeitig erlaubt dieser Produktionsverbund eine Anpassung der Produktionsmenge an die Marktbedingungen, ohne die Verarbeitungsauslastung zu verändern. Dadurch wird die langfristige Rentabilität erhöht.²¹

Die Streuung der Absatzmärkte erhöht die Stabilität und Flexibilität der Investition. Je unabhängiger die Märkte sind, desto größer ist dieser Effekt. In diesem Zusammenhang sei die Vermarktung von Strom und mineralischem Dünger bei Zuckerrohr verarbeitenden Anlagen erwähnt.

Strom wird aus der Verbrennung des holzartigen Zuckerrohrrückstands, der Bagasse, gewonnen. Nach heutigem Stand der Technik kann eine Anlage mit der Verarbeitungskapazität von 2,1 Millionen t Zuckerrohr pro Jahr neben 70.000 t Bioethanol und 140.000 t Zucker etwa 40 MW Stromüberschuss produzieren.²² Als Rückstand der Bagasseverbrennung bleibt Asche übrig. Sie besteht aus Mineralien, die die Zuckerrohrpflanze dem Boden entzogen hat. Damit eignet sich die Asche als angepasster mineralischer Dünger für Zuckerrohrfelder. Neben ökologischen Vorteilen bedeutet die Vermarktung dieses Düngers eine zusätzliche Ertragsquelle, die von der Energie- und Kraftstoffpreisentwicklung unabhängig ist.

In Zeiten sich rasch verändernder Rahmenbedingungen erlaubt die Vermarktung eines Produktverbundes die Maximierung der Wertschöpfung und gleichzeitig eine Risikoverminderung. Damit ist der Produktverbund ein wichtiges Kriterium für die Entscheidung über Investitionen in Bioethanolanlagen.

2.5 ROBUSTHEIT DER FERMENTATION

Die Wirtschaftlichkeit der Bioethanolproduktion hängt von einer sehr hohen Auslastung der Anlage ab. Eine Voraussetzung für die hohe Auslastung einer Anlage ist die Prozessstabilität. Die Bioethanolproduktion setzt auf Agrarrohstoffe. Diese Rohstoffe weisen eine natürliche Qualitätsschwankung auf. Durch diese Ausgangslage entsteht ein gravierendes Prozessstabilitätsrisiko. In der industriellen Praxis kommen weitere Risikofaktoren hinzu: Zu den wichtigsten gehört die Kontamination der Fermentationslösung mit unerwünschten Organismen. Die schwerwiegendste Folge der Kontamination ist eine Verminderung der Ausbeute, weil das Substrat zur Bildung neuer Biomasse verbraucht wird. Je nach kontaminierendem Organismus wird das Substrat auch zur Bildung anderer Metabolite verbraucht. Häufig beobachtet wird die Bildung von Milchsäure durch Milchbakterien. Weitere Risiken der Prozessdestabilisierung sind Schwankungen

²¹ Finguerut 2005.

²² Oliverio 2008.

der Produktionstemperatur und des pH-Wertes sowie die diskontinuierliche Zufuhr von Substrat. Auch diese Veränderungen verursachen eine Verringerung der Ausbeute durch Nebenproduktbildung und Verringerung der Produktbildungsgeschwindigkeit.

Um die Prozessstabilitätsrisiken zu minimieren, ist eine robuste Fermentationstechnologie essenziell. Sie sollte in der Lage sein, das Eintreten von Prozessschwankungen zu vermeiden, und bei anderweitigen Prozessschwankungen eine schnelle Wiederherstellung der Ausgangsbedingungen erlauben. Damit ist eine robuste Fermentationstechnologie eine wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche Bioethanolproduktion.²³

2.5.1 REAKTIONSFÜHRUNG

Für die Commodity-Produktion sind kontinuierliche Verfahren zu bevorzugen. Sie weisen eine bessere Raum-Zeit-Ausbeute auf und erlauben damit eine Senkung des Fixkostenanteils. Eine Erhebung des Zentrums für Zuckerrohrtechnologie in Brasilien zeigte, dass sich vor zehn Jahren ca. 25 Prozent der Bioethanolanlagen für die kontinuierliche Variante entschieden hatten. Eine höhere Anfälligkeit gegenüber Prozessschwankungen steht einer höheren Raum-Zeit-Ausbeute entgegen. Die Praxis hat gezeigt, dass die Instabilität der Produktion die Vorteile des kontinuierlichen Betriebs zunichte macht. Das Zentrum für Zuckerrohrtechnologie hat in den letzten Jahren die Tendenz beobachtet, dass die kontinuierliche Bioethanolproduktion durch die semi-kontinuierliche Fed-Batch-Produktion ersetzt wird. Der Robustheit der Fermentation wird in der Praxis mehr Bedeutung zugeschrieben als der Möglichkeit, höhere Raum-Zeit-Ausbeuten zu erzielen.

2.5.2 WAHL DES PRODUKTIONSORGANISMUS

Hefen werden seit Jahrhunderten in der ethanolischen Gärung eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Bakterien in der Bioethanolproduktion bezüglich der Fermentationszeit Vorteile mit sich bringt.²⁴ Die Bakterien sind im Vergleich zu Hefe gegen Prozessinstabilitäten jedoch weniger robust. Insbesondere Kontaminationen durch unerwünschte Bakterien limitieren die bakterielle Bioethanolproduktion, weil sie schwieriger zu bekämpfen sind als bei der Hefe-Fermentation. Trotz intensiver Forschung zur Verbesserung der bakteriellen Bioethanolproduktion bleibt *Saccharomyces cerevisiae* wegen seiner Robustheit der Organismus der Wahl bei industriellen Anlagen.

2.5.3 ANPASSUNG DES PRODUKTIONSORGANISMUS

Die Fermentation mit Wildstämmen von *Saccharomyces cerevisiae* unter Produktionsbedingungen verläuft nicht mit 100-prozentiger Selektivität. Unter Einsatz moderner biotechnologischer Werkzeuge könnten die Ursachen und Mechanismen der Nebenproduktbildungen verstanden werden. Es ist zudem gelungen, Hefestämme zu entwickeln,

²³ Vgl. Finguerut 2008.

²⁴ Vgl. Sahn/Bringer-Meyer 1987.

die eine höhere Selektivität während der Fermentation unter Laborbedingungen ermöglichen.²⁵ Trotzdem könnten sich solche Stämme in der industriellen Praxis nicht behaupten.

Die Optimierung der Produktionsorganismen unterliegt einer empirischen evolutiven Strategie. Die Impfkulturen bestehen aus Wildstämmen, die in Produktionsanlagen der umliegenden Region isoliert worden sind. Tatsächlich sind diese Organismen durch die natürliche Evolution auf die Substrate und Bedingungen der Bioethanolproduktion angepasst. Sie sind in der Lage, sich gegen kontaminierende Organismen zu behaupten, und ermöglichen eine robuste Fermentation.

2.6 FREIE MARKTGETRIEBENE NACHFRAGE

Der Absatzmarkt ist die Triebkraft der Bioethanolproduktion. Wo der freie Markt funktioniert, werden innovative Ansätze zu Prozessverbesserungen und damit zur Gewinnsteigerung gesucht. Und nur durch ständige Verbesserungen kann ein Prozess langfristig erfolgreich bleiben. So ist die freie marktgetriebene Nachfrage ein wichtiger Erfolgsfaktor der Bioethanolproduktion.

Ohne Markt verzerrende Maßnahmen wie Subventionen oder Importzölle kann der direkte Wettbewerb zwischen Ottokraftstoffen stattfinden. Wo der Bioethanolpreis niedriger ist als der Preis von Benzin, wird der Biokraftstoff vom Verbraucher bevorzugt. Bioethanol aus Zuckerrohr in Brasilien erfüllt diese Bedingung. Dort wird der alternative Kraftstoff von den Verbrauchern bevorzugt und hat einen Anteil von 52 Prozent am brasilianischen Ottokraftstoffmarkt.²⁶ Die hohe Nachfrage rechtfertigt die notwendigen Investitionen in Infrastruktur und Logistik zur Kommerzialisierung des Biokraftstoffes. Dadurch wiederum finanziert sich das Vermarktungsnetz von selbst.

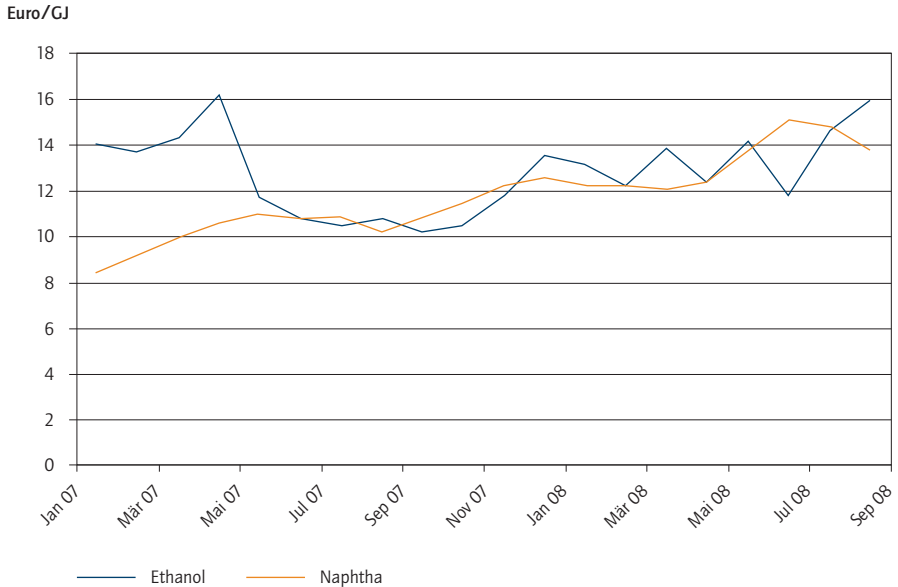
Der freie Markt gleicht die Kraftstoffpreise auf Energiebasis aus. Der auf den Energiegehalt bezogene Vergleich des Naphthapreises in Westeuropa mit dem Bioethanolpreis in Brasilien (siehe Abbildung 3) zeigt diesen Ausgleich.²⁷ Das führt zu einem Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage für Bioethanol. Dadurch werden transparente Preismechanismen etabliert. Diese Mechanismen sind verlässlich und erlauben fundierte Kosten- und Absatzplanungen. Sie fördern dadurch die Prozessverbesserung als Weg zur Gewinnsteigerung. Der Gewinn sichert den Bioethanolproduzenten entsprechende Renditen ohne Abhängigkeit von Subventionen. Die gesamte Wertschöpfungskette trägt sich selbst und ist nachhaltig sowie langfristig erfolgreich.

²⁵ Forster 2003.

²⁶ Jank 2008.

²⁷ Cepea 2008.

Abbildung 3: Vergleich des Naphthapreises in Westeuropa mit dem Bioethanolpreis in Brasilien bezogen auf den Energiegehalt (Euro/GJ).



Zwangsbeimischungen schränken die Anwendungsmöglichkeiten von Bioethanol ein. Sie erzeugen eine künstliche Nachfrage und senken dadurch den Innovationsdruck. Importzölle zur Sicherung der Lokalproduktion verstärken diesen Effekt. Damit wird langfristig der lokalen Wettbewerbsfähigkeit der Wertschöpfungskette geschadet.

Die freie Nutzung von wettbewerbsfähigem Bioethanol erlaubt den Einsatz in weiteren Anwendungsgebieten neben dem Kraftstoffmarkt. So sind Anlagen zur Herstellung von Kunststoffen auf Basis alkoholchemischer Produktionsverfahren bereits im Entstehen. Der brasilianische Petrochemiekonzern Braskem hat eine Polyethylenanlage zur Produktion von 200.000 t/a auf Basis von Bioethanol angekündigt.²⁸ Das US-amerikanische Chemieunternehmen DOW wird in einem Joint-Venture mit dem brasilianischen Bioethanolproduzenten Santa Elisa eine integrierte Anlage zur Produktion von 300.000 t/a auf Basis von Zuckerrohrethanol bauen.²⁹ Der belgische Chemie- und Pharmakonzern Solvay wird 60.000 t PVC auf Basis von Bioethanol aus Zuckerrohr produzieren.³⁰ Diese Beispiele beweisen, dass der freie Bioethanolmarkt in Brasilien zu einer Verbesserung der Kostensituation der Bioethanolproduktion geführt hat, die sich positiv auf weitere Segmente der Volkswirtschaft auswirkt.

²⁸ Braskem 2008.

²⁹ DOW 2007.

³⁰ Solvay 2007.

2.7 NACHHALTIGKEIT

Die Nachhaltigkeit ist eine zwingende Voraussetzung für agroindustrielle Investitionen in dreistelliger Millionenhöhe, die der Bau einer Bioethanolanlage erfordert. Die nachhaltige Landwirtschaft ergibt sich als Folge einer wirtschaftlichen Bioethanolproduktion unter freien Marktbedingungen. Damit die Transportkosten der Rohstoffe niedrig gehalten werden können, werden die Bioethanolanlagen in der Nähe der Felder gebaut. Die Amortisierung der Investitionen erfordert eine lange Laufzeit der Anlagen. Wegen der wichtigen Rolle der Rohstoffkosten ist eine nachhaltige Agrarproduktion mit steigender Produktivität erforderlich, um die Wettbewerbsfähigkeit der Anlagen zu garantieren.

Die ökologische Nachhaltigkeit ist neben dem Preis ein wichtiges Argument für den Einsatz von Bioethanol als Treibstoff. Diese Nachhaltigkeit von Bioethanol ist nicht per se gegeben, weil es auf Basis nachwachsender Rohstoffe produziert wird. Sie ist von Faktoren wie dem Rohstoff für die Fermentation und der Energiequelle für die Aufarbeitung abhängig. Die integrierte Konfiguration zur Bioethanol- und Stromproduktion aus Zuckerrohr zeigt den positivsten Umwelteinfluss. So ermöglicht die Produktion von Bioethanol aus Zuckerrohr, die fossilen CO₂-Emissionen im Bereich von 85 Prozent zu reduzieren. Auch die Menge der Treibhausgasemissionen wird bei der Herstellung von Bioethanol aus Zuckerrohr verringert.³¹ Als Vergleich erlauben Bioethanol aus Zuckerrüben eine Reduktion der Emissionen im Bereich von 45 Prozent und Bioethanol aus Mais Reduktionen im Bereich von 30 Prozent. Die Ursachen für die günstigere Energiebilanz bei Bioethanol aus Zuckerrohr liegen in der höheren Produktivität pro Anbaufläche, dem geringeren Transportaufwand und der Benutzung der Bagasse als Energiequelle für die Bioethanol-Aufarbeitung. Diese Aspekte rechtfertigen den Einsatz von importiertem Bioethanol in Ländern, in denen Zuckerrohr nicht angebaut wird, wie zum Beispiel Schweden. Diese Rechtfertigung setzt den Erhalt von Naturschutzgebieten und biologischer Vielfalt voraus, was durch Zertifizierung gewährleistet wird.

Die Nachhaltigkeit im Hinblick auf die Nahrungsmittelherstellung ist ein weiterer wichtiger Aspekt der Bioethanolvermarktung. Eine Biotreibstoffpolitik ist nur tragbar, wenn der soziale Frieden nicht durch Hungersnot gefährdet wird. Die postulierte Korrelation zwischen hohen Getreidepreisen und der Bioethanolproduktion wird durch die Preisentwicklung der zweiten Jahreshälfte 2008 nicht bestätigt. Eine sachliche Analyse der Preismechanismen von unterschiedlichen Wertschöpfungsketten zeigt die Verträglichkeit der Bioethanol- mit der Nahrungsmittelproduktion.³² Auch eine nachhaltige Expansion der Bioethanolproduktion ist ohne Einschränkung der Nahrungsmittelproduktion oder eine Gefährdung der Urwälder möglich. Weltweit werden 1,4 Mrd. ha für die Landwirtschaft genutzt. Davon werden in Brasilien 7,8 Mio. ha mit Zuckerrohr angebaut.

³¹ Macedo 2008.

³² Langenheld 2008.

Für die derzeitige Produktion von 17 Mio. t Bioethanol werden 3,8 Mio. ha Zuckerrohranbau benötigt. Gleichzeitig werden in diesem Land 172 Mio. ha Weidenland für extensive Rinderzucht verwendet. Eine Intensivierung der Rinderzucht und damit einhergehend eine Landeinsparung um 10 Prozent ermöglicht die Freisetzung von weiteren 17 Mio. ha für den Zuckerrohranbau ohne Veränderung der bereits landwirtschaftlich genutzten Fläche.³³

Die Erweiterung des Bioethanolmarktes erfordert einen transparenten Nachhaltigkeitsbeweis. Die Nachhaltigkeit der Bioethanolproduktion hingegen wurde im Hinblick auf landwirtschaftliche Produktion sowie ökologische und soziale Aspekte bereits transparent ermittelt. Diese Information muss der Bevölkerung zugänglich gemacht werden und durch Zertifizierung nach zu etablierenden Standards den Verbrauchern garantiert werden.³⁴ Dies gewährleistet die Vermarktung des Biotreibstoffes mit den größten Vorteilen für die Umwelt und ohne Verunsicherung der Verbraucher.³⁵

3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

3.1 BIOETHANOL IST BEREITS EIN ERFOLGREICHER OTTOKRAFTSTOFF

Die Bioethanolproduktion ist erfolgreich, wo sie einen Bioethanolpreis ermöglicht, der unter dem Benzinpreis liegt. Den wichtigsten Einfluss auf die Produktionskosten hat der Rohstoff. Daher ist die Rohstoffauswahl entscheidend für den Erfolg der Bioethanolproduktion. Die niedrigsten Kosten werden mit der Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr erreicht. Zuckerrohr weist die höchste flächenbezogene Produktivität sowie die längste Vegetationsperiode auf und wird mithilfe des im Vergleich zu anderen Rohstoffen einfachsten Prozesses verarbeitet. Die Zuckerrohrverarbeitung erlaubt die flexible Herstellung von verschiedenen Produkten (Produktverbund) für unterschiedliche Märkte; zu ihnen zählen Ottokraftstoff, Nahrungsmittel, Energie und Dünger. Dadurch wird ein anpassungsfähiges Wertschöpfungsnetz geschaffen und die wirtschaftliche Abhängigkeit von einzelnen Märkten eingeschränkt. Die Energieproduktion aus den Zuckerrohrrückständen liefert der Produktionsanlage zu niedrigen Kosten Strom und Wärme. Ohne Limitierung durch die Energiekosten kann die Bioethanolfermentation auf die erforderliche hohe Raum-Zeit-Ausbeute optimiert werden. Sie wird durch eine niedrige Bioethanol-Endkonzentration und durch Hefe-Rückführung maximiert.

Die Optimierung der Raum-Zeit-Ausbeute darf allerdings nicht auf Kosten der Produktionsstabilität geschehen. Eine robuste Fermentation wird durch angepasste Hefestämme erreicht. Die Anreize zur konstanten Prozessverbesserung werden durch den Absatz unter freien Marktbedingungen geschaffen. So wird Bioethanol in Brasilien bereits

³³ Vgl. Jank 2008a.

³⁴ Standards zur Nachhaltigkeit der Biomasseproduktion werden zurzeit von DIN, CEN und ABNT erarbeitet.

³⁵ Vgl. Macedo 2005 und Goldemberg/Guardabassi 2009.

heute als wichtigster Ottokraftstoff und gleichzeitig als chemischer Rohstoff verwendet. Die hohe Kapitalbindung der Bioethanolproduktion kann sich nur durch eine langfristige Strategie auszahlen. Das erfordert Nachhaltigkeit auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette. Bioethanol aus Zuckerrohr erfüllt diese Bedingungen. Die Zertifizierung der Nachhaltigkeit soll in diesem Zusammenhang Transparenz für den Markt erzeugen.

3.2 POTENZIAL FÜR DEUTSCHLAND

Die Technologie kann die Rohstoffsituation bei der Bioethanolproduktion nicht ausgleichen. Deutschland verfügt nicht über wettbewerbsfähige Rohstoffe für die Bioethanolproduktion. Eine erfolgreiche Strategie für die biotechnologische Energieumwandlung aus deutscher Sicht ist die Kooperation mit Zuckerrohr produzierenden Ländern, die zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Bioethanolproduktionstechnologie sowie zur erfolgreichen Vermarktung von Bioethanol beitragen könnte. Deutschland verfügt über hervorragendes technologisches Know-how in Bereichen, die das unmittelbare Verbesserungspotenzial in der Bioethanolproduktion erkennen und deren Umsetzung gestalten können. Verfahrenstechnisches Know-how ist zur Weiterentwicklung der Aufarbeitung von Bioethanol und zur Optimierung der Energieeffizienz gefragt. So werden im Hinblick auf Energieeffizienz bereits heute brasilianische Bioethanolproduzenten von deutschen Unternehmen unterstützt. Biotechnologische Kompetenz ist für die Charakterisierung der industriellen Bioethanolfermentation notwendig, um unter anderem die Flockung der Hefe beherrschen zu können und neue Ansätze zur Prozessintensivierung zu ermöglichen. Japan verfolgt eine analoge Kooperationsstrategie.

4 LITERATUR

Boinot 1936

Boinot, F.: Improvements relating the alcoholic fermentation of sugar containing liquids. US patent 2,063,7223, 1936.

Bosch 2008

Bosch: Flex-Fuel. URL: <http://rb-k.bosch.de/de/leistungverbrauchemissionen/alternativeantriebe/flexfuel.html> [Stand: 08.12.2008].

Braskem 2008

Braskem: Braskem approves green polyethelene project. URL: http://www.braskem.com.br/site/portal_braskem/en/sala_de_imprensa/sala_de_imprensa_detalhes_8129.aspx [Stand: 18.12.2008].

Cepea 2008

Cepea: Indicadores de preços. URL: <http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool> [Stand: 05.08.2008].

Chen/Chou 1993

Chen, J. C. P./Chou, C.-C.: Cane Sugar Handbook, 12th edn. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

Consecana 2008

Consecana: Manual do Consecana. URL: <http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={6ED1BE65-C819-4721-B5E7-312EF1EA2555}> [Stand: 11.10.2008].

de Camargo 1990

de Camargo, C. A. (Hrsg.): Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1990.

DOW 2007

DOW: DOW and Crystalsev announce plans to make polyethylene from sugar cane in Brazil. URL: http://www.news.dow.com/dow_news/prodhub/2007/20070719a.htm [Stand: 19.07.2007].

FAOSTAT 2007

FAOSTAT-Agriculture. URL: <http://faostat.fao.org/default.aspx> [Stand: 10.12.2007].

Finguerut 2005

Finguerut, J.: „Panorama da fermentação no Brasil”, in: Sinaferm (Hrsg.): XV Simpósio Nacional de Bioprocessos (Recife 2005), Recife: Editora Universitária UFPE, 2005 – Tagungsband.

Finguerut 2008

Finguerut, J.: „Evolution and perspectives of technological development in the Brazilian sugar and ethanol industry”, in: Lichts, F. O. (Hrsg.): Sugar and Ethanol Brazil 2008 (São Paulo 2008), Turnbridge Wells: Agra Informa Ltd. 2008 – elektronischer Tagungsband.

Forster 2003

Forster, J./Famili, I./Fu, P./Palsson, B. O./Nielsen, J.: “Genome-scale reconstruction of the *Saccharomyces cerevisiae* metabolic network.” In: Genome Research 13 (2003), Nr. 2, S. 244-253.

Goldemberg/Guardabassi 2009

Goldemberg, J./Guardabassi, P.: „Are biofuels a feasible option?“ In: Energy Policy 37 (2009) Nr. 1, S. 10-14.

Hagen 1993

Hagen, J.: Chemische Reaktionstechnik. Weinheim: VCH, 1993.

Jank 2008

Jank, M.: Biofuels update in Brazil: Ethanol dynamics. URL: <http://www.unica.com.br/download.asp?mmdCode=DA686A31-6528-4C5B-82A3-37F0F4802C4C> [Stand: 23.12.2008].

Jank 2008a

Jank, M.: A dinâmica da inserção do agronegócio brasileiro na economia mundialo. URL: <http://www.unica.com.br/noticias/show.asp?nwsCode=%7B0BFC7C7E-EB6B-486A-83F4-A86A48669715%7D> [Stand: 15.10.2008].

Jaques 2003

Jaques, K. A./Lyons, T. P./Kelsall, D. R.: The alcohol Textbook. A reference fort he beverage, fuel and industrial alcohol industries, 4th Edition, Nottingham: Nottigham University Press, 2003.

Langenheld 2008

Langenheld, A.: „Biofuels in the renewable energy directive“, in: Lichts, F. O. (Hrsg.): Impact of Biofues on Commodity Markets (Brussel 2008), Turnbridge Wells: Agra Informa Ltd. 2008 – elektronischer Tagungsband.

Levenspiel 1999

Levenspiel, O.: Chemical Reaction Eengineering, 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, 1999.

Macedo 2005

Macedo, I. C. (Hrsg.): Sugar cane's energy. Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability. São Paulo: Berlendis Editores Ltda. 2005.

Macedo 2008

Macedo, I. C./Seabra, J. E. A/Silva, J. E. A. R.: „Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugar cane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020.“ In: Biomass and Bioenergy 32 (2008), S. 582-595.

Oliverio 2008

Oliverio, J. L.: „Cogeneration a new source of income for sugar and ethanol mills”, in: Lichts, F. O. (Hrsg.): Sugar and Ethanol Brazil 2008 (São Paulo 2008), Turnbridge Wells: Agra Informa Ltd. 2008 – elektronischer Tagungsband.

Pastrello 2006

Pastrello, C. P. (Hrsg.): Agriannual 2006, São Paulo: Agra FNP, 2005.

Paul 1980

Paul, J. K.: Large and small scale ethyl alcohol manufacturing processes from agricultural raw materials. Park Ridge: Noyes Data Corporation, 1980.

Raven 1992

Raven, P./Everr, R./Eichhorn, S.: Biology of Plants, 5th Edition, New York: Worth Publishers, 1992.

Sahm/Bringer-Meyer 1987

Sahm, H./Bringer-Meyer, S.: „Continuous ethanol production by Zymomonas mobilis on an industrial scale.” In: Acta Biotechnologica 7 (1987) Nr. 4, S. 307-313.

Solvay 2007

Solvay: Solvay Indupa will produce bioethanol-based vinyl in Brazil. URL: http://www.solvinpvc.com/static/wma/pdf/1/2/1/0/0/Press_release_Brasilian_SolVinPVC_EN_141207.pdf [Stand: 14.12.2007].

Thai Tapioca Trade Association 2008

Thai Tapioca Trade Association. URL: <http://www.ttta-tapioca.org/main2.php> [Stand: 31.10.2008].

UNICA 2008

UNICA: Venda de automóveis e veículos leves no Brasil. URL: <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica> [Stand: 23.12.2008].

> BIOETHANOL DER 2. GENERATION

ANDRE KOLTERMANN

1 EINLEITUNG

Die weiße Biotechnologie spielt eine Schlüsselrolle bei der Transformation von einer auf Erdöl zu einer nachhaltigen, auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Industrie. Biokraftstoffe der 2. Generation, die nicht in Konkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen und eine positive Energiebilanz vorweisen, bedürfen innovativer technischer Lösungen und politischer Rahmenbedingungen.

2 POTENZIALE EINER ENERGIEPOLITIK AUF BASIS NACHWACHSENDER ROHSTOFFE

Der in den vergangenen Jahren stetig gestiegene Bedarf an Energie, Kraftstoffen und Chemikalien und das in naher Zukunft zu erreichende Maximum der weltweiten Produktionskapazität für Rohöl schaffen eine immer größere Lücke zwischen Angebot und Nachfrage. Dies wird die Preisspirale für fossile Energieträger auf lange Sicht antreiben, auch wenn die aktuelle Finanzmarktkrise für eine kurzfristige Entspannung an den Rohstoffmärkten gesorgt hat. Die meisten Experten gehen davon aus, dass Rohöl insbesondere in einem positiven wirtschaftlichen Umfeld sich stark verteuern und somit der Bedarf an nachhaltigen Alternativen stetig ansteigen wird. Einige Industrienationen wirken bereits auf Basis nachwachsender Rohstoffe der zunehmenden Verknappung fossiler Rohstoffe wie Erdöl und Erdgas entgegen. Aber nicht nur die oben genannten Argumente tragen zur vermehrten Entwicklung von Prozessen zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe bei, sondern auch klima- und geopolitische Gesichtspunkte.

Die Bedarfslücken für Energie, Kraftstoffe und Chemikalien können zum Teil durch die weiße Biotechnologie auf einer nachwachsenden Rohstoffbasis – und zwar klimafreundlich – geschlossen werden. So könnte bereits heute ein Drittel des derzeitigen jährlichen Benzinverbrauches in der EU durch lignocellulose-basiertes Bioethanol (Bioethanol zweiter Generation) aus überschüssigem Getreidestroh, welches nicht in Konkurrenz zu Nahrungsmitteln steht, substituiert werden. Und es gibt noch weiteres Potenzial, wie beispielsweise die Verwendung anderer agrarischer Reststoffe, die Umwidmung von Brach- und Weideland in Ackerland oder die Nutzung von hocheffizienten Energiepflanzen. Diese und weitere Potenziale können sowohl für die Herstellung von Biokraftstoffen als auch für die Produktion von Chemikalien auf Basis nachwachsender Rohstoffe genutzt werden.

3 POLITISCHE INITIATIVEN UND ERFORDERNISSE FÜR EINE FÖRDERUNG VON BIOKRAFTSTOFFEN DER 2. GENERATION

Sowohl die Entwicklung von Produktionsverfahren als auch die Produktion von Chemikalien und Biokraftstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe, die nicht in Konkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen, müssen von staatlicher Seite unterstützt werden, wenn der Paradigmenwechsel von einer erdölbasierten Industrie zu einer nachhaltigen Industrie gelingen soll. Jeder Euro, der nicht jetzt in die Umstrukturierung der Energieinfrastruktur investiert wird, zieht später ein Vielfaches an Folgekosten nach sich. Erste Anzeichen konnten die Erdöl importierenden Länder bereits 2008 sehen, da durch steigende Energiepreise die Inflation stieg und ein stetig wachsender Anteil des volkswirtschaftlichen Vermögens von den Erdöl importierenden Ländern an die Erdöl exportierenden Länder abgegeben wurde. Diese einseitige Energieabhängigkeit stellt eine der größten Herausforderungen für den Wohlstand unserer Gesellschaft dar und kann nicht über Nacht verändert werden.

In den USA hat man dem Energieinfrastrukturwandel bereits Rechnung getragen, indem im Herbst 2007 der sogenannte „energy bill“ verabschiedet wurde; bis zum Jahr 2022 sollen nach dieser Verordnung etwa 15 Prozent des jährlichen US-Benzinverbrauchs mit Bioethanol (137 Mrd. l) substituiert werden. Knapp 60 Prozent davon (ca. 80 Mrd. l) sollen dabei verpflichtend aus lignozellulosehaltigen Reststoffen generiert werden. Vom US-Department of Energy wurden dafür mehrere Milliarden US-Dollar zur Förderung von Projekten zur Entwicklung und Produktion von Biokraftstoffen der 2. Generation zur Verfügung gestellt.

Demgegenüber hat das Europäische Parlament im Dezember 2008 der Richtlinie Erneuerbarer Energien zugestimmt. Diese besagt, dass bis zum Jahr 2020 ein Mindestanteil von 10 Prozent an erneuerbaren Energieträgern im Verkehr erreicht werden muss. Das „Zehn-Prozent-Ziel“ ist verbindlich – unter der Bedingung, dass die hergestellten Biokraftstoffe nachhaltig sind und dadurch eine Treibhausgasminderung von zunächst mindestens 35 Prozent erreicht wird. Eine weitere Bedingung ist, dass die sogenannten „Biokraftstoffe der 2. Generation“ wirtschaftlich umsetzbar werden. Ein verpflichtender Anteil an Biokraftstoffen der 2. Generation wurde in der EU-Richtlinie jedoch nicht festgelegt. Lediglich eine doppelte Anrechnung auf die Erfüllungsquote für aus Zellulose und Lignozellulose gewonnenem Biokraftstoff wurde beschlossen. Es ist insgesamt jedoch fraglich, ob diese Maßnahme allein ausreichen wird, um Biokraftstoffe der 2. Generation auf dem Markt zu platzieren. Die Einführung eines verpflichtenden Anteils an lignozellulosebasierten Kraftstoffen wäre notwendig, um solche neuen, klimafreundlichen und nachhaltigen Technologien auf den Markt zu bringen. Unter den bisher vereinbarten Bedingungen hingegen mangelt es an Anreizen, in die Produktion von Biokraftstoffen der 2. Generation zu investieren, sodass die Gefahr besteht, dass die Europäische Union gegenüber anderen Industrienationen wie den USA bei der Energiewende weiter ins Hintertreffen geraten wird.

Weitere Argumente, die für eine stärkere Förderung der Biokraftstoffe der 2. Generation sprechen, ergeben sich aus den zunehmenden Bedenken hinsichtlich der Nachhaltigkeit der Biokraftstoffe der 1. Generation. So stehen Biokraftstoffe der 2. Generation, anders als die der 1. Generation, nicht in Konkurrenz zur Lebens- und Futtermittelherstellung. Zudem bieten sie auch eine bessere Energiebilanz als Biokraftstoffe der 1. Generation. Die vorteilhaftere Bilanz an Treibhausgasemissionen ist ebenfalls ein bedeutendes Vorzugsargument. Bereits heute ist das CO₂-Einsparungspotenzial bei der Herstellung von Biokraftstoffen der 2. Generation signifikant höher als bei solchen der 1. Generation auf Basis von Stärke und Zucker.

Allerdings bedarf es für die Verwendung von Agrarreststoffen wie zum Beispiel Getreide- oder Maisstroh, also Rohstoffen mit relativ geringer Dichte und dezentraler Verteilung, neuer Technologien, Infrastrukturen und Logistik. Für die erfolgreiche Kommerzialisierung der lignozellulosebasierten Biokraftstoffe müssten beispielsweise Anpassungen bei Ernte, Transport und Lagerung des verwendeten Rohstoffs erfolgen. Eine weitere Herausforderung für die Herstellung von Biokraftstoffen der 2. Generation sind zudem die im Moment noch relativ hohen Herstellungs- und Investitionskosten. Jedoch sind im Hinblick auf Enzymproduktion, Vorbehandlungs- und Vergärungsprozesse mithilfe der weißen Biotechnologie bereits wichtige Entwicklungen zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion erfolgreich umgesetzt worden. So hat die Süd-Chemie AG bereits einen Produktionsprozess im Technikumsmaßstab entwickelt, der die Biokonversion von Getreidestroh oder Bagasse aus Zuckerrohr zu Bioethanol unter wirtschaftlich konkurrenzfähigen Bedingungen erlaubt; die Süd-Chemie AG arbeitet mit Partnern an der großtechnischen Umsetzung dieses Verfahrens.

4 FAZIT

Bei lignocellulosehaltiger Biomasse handelt es sich zwar um einen begrenzten, jedoch nachwachsenden Rohstoff mit dem Potenzial, einen großen Teil des Bedarfs an Kraftstoffen und Chemikalien in Deutschland zu decken. Im Gegensatz zu Strom und Wärme, die sich aus Wind, Wasser und Solarenergie generieren lassen, sind nachwachsende Rohstoffe die nahezu einzige Quelle für Chemikalien und Kraftstoffe auf Basis einer nachhaltigen Produktion. In ihnen steckt das größte ökonomische sowie ökologische Potenzial. Die große Herausforderung aufseiten der Politik liegt nun darin, wirksame Anreize zu setzen, lignocellulosehaltige Rohstoffe ausschließlich der stofflichen Verwertung – für Biokraftstoffe und Chemikalien – zuzuführen und nicht in Konkurrenz zur energetischen Verwertung einfach zu verbrennen. Weiterhin müssen Anreize für Investitionen und eine Investitionssicherheit geschaffen werden, sodass Produktionsanlagen für nachhaltige und klimafreundliche Biokraftstoffe und Chemikalien gebaut werden, die unserer Gesellschaft dazu verhelfen, die Rohstoffwende ökologisch und ökonomisch erfolgreich zu bestehen.

> VERBESSERUNG DER EFFIZIENZ UND UMWELTVERTRÄGLICHKEIT VON BIOGASANLAGEN

PETER WEILAND

1 EINLEITUNG

Die Erschließung neuer Energiequellen und die teilweise Umstellung des bestehenden Versorgungssystems von fossilen Quellen auf erneuerbare Energieträger stellt eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Obgleich das erschließbare Biogaspotenzial nur einen begrenzten Beitrag zur Energieversorgung leisten kann, spielt Biogas aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Erzeugung und Nutzung sowie wegen des hohen Reduktionspotenzials für Treibhausgas-Emissionen eine wichtige Rolle.

Die Biogaserzeugung zeichnet sich durch vielfältige Vorteile aus, die den bisherigen schnellen Ausbau begünstigt haben und auch für die weitere Entwicklung eine wichtige Rolle spielen. Als Besonderheiten der Biogastechnik sind hervorzuheben:

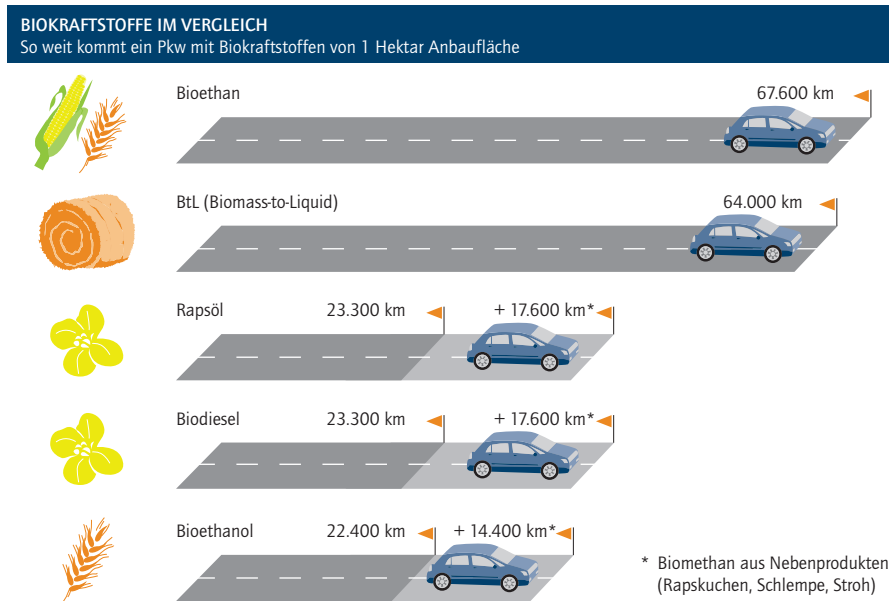
- Anwendbarkeit einer breiten Palette unterschiedlicher Roh- und Reststoffe;
- vielseitige energetische und stoffliche Nutzungsmöglichkeiten des Gases;
- kontinuierliche Produktion, daher grundlastfähig und als Regelenergie nutzbar;
- breites Leistungsspektrum der Anlagentechnik;
- Erhalt sämtlicher Nährstoffe bei gleichzeitiger Verbesserung der Düngewirksamkeit;
- hohes CO₂-Minderungspotenzial;
- hohe Energieausbeute je Fläche bei Einsatz von Energiepflanzen.

Für die Gaserzeugung können vielfältige organische Reststoffe, aber auch gezielt angebaute nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden, sodass für eine dezentrale Energiebereitstellung in der Regel hohe Substratpotenziale regional verfügbar sind. Wie kaum eine andere erneuerbare Energiequelle kann Biogas universell genutzt werden, sowohl zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung als auch als Fahrzeugtreibstoff oder als Erdgassubstitut. Daneben kann Biogas aber auch zur Erzeugung von Wasserstoff dienen, der zukünftig vor allem für den Betrieb von Brennstoffzellen benötigt wird. Aus Biogas erzeugter Strom ist nicht nur grundlastfähig, sondern er kann bei bedarfsgerechter Produktion und ausreichender Speicherkapazität auch als Regelenergie eingesetzt werden, sodass durch Kombination mit Wind- und Solarkraftwerken eine bedarfsgerechte Stromversorgung möglich wird. Vorteilhaft ist fernerhin, dass Biogasanlagen in sehr

unterschiedlichen Leistungsklassen gebaut und betrieben werden können, wodurch je nach Substratverfügbarkeit der Einsatz von Klein- oder Großanlagen möglich ist. Im Vergleich zu anderen Nutzungsformen von Biomasse bleiben sämtliche Nährstoffe erhalten; zusätzlich findet eine Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit statt, sodass Mineraldünger, dessen Herstellung einen hohen Energiebedarf erfordert, gezielt substituiert werden kann. Im Hinblick auf den Klimaschutz ist hervorzuheben, dass Biogas bei Verwertung von Wirtschaftsdünger nicht nur durch die Substitution fossiler Brennstoffe zur Minderung von CO₂-Emissionen beiträgt, sondern zusätzlich Treibhausgas-Emissionen (THG) einspart, da bei der Lagerung und Ausbringung Methanemissionen vermieden werden.

Beim Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse kommt der Flächeneffizienz eine hohe Bedeutung zu, da in Deutschland für den Anbau von Biomasse im Nichtnahrungsbereich maximal ein Flächenpotenzial von 3-4 Mio. ha Landfläche zur Verfügung steht.¹ Wie Abbildung 1 zeigt, weist Biogas im Vergleich zu allen anderen Bioenergieträgern die höchste Flächeneffizienz auf, sodass der weitere Ausbau der Biogaserzeugung den geringsten spezifischen Flächenverbrauch beansprucht.²

Abbildung 1: Flächeneffizienz verschiedener Biokraftstoffe im Vergleich (Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.)



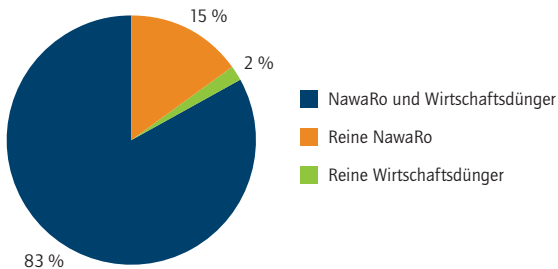
Pkw-Kraftstoffverbrauch: Otto 7,4 l/100 km, Diesel 6,1 l/100 km

¹ SRU 2008.
² FNR 2008a.

2 AKTUELLER ENTWICKLUNGSSTAND UND GEGENWÄRTIGE PROBLEME

Seit 1990 ist die Zahl der Biogasanlagen stetig angestiegen. Beim aktuellen Bestand von über 3.800 Anlagen weist sie eine installierte elektrische Leistung von ca. 1.300 MW auf. Wie die in Abbildung 2 dargestellten Ergebnisse einer bundesweiten Erhebung zeigen, wird bei etwa 80 Prozent der seit 2004 neu errichteten Biogasanlagen zur Gaserzeugung eine Mischung aus Wirtschaftsdünger und nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt; 15 Prozent der Neuanlagen verarbeiten ausschließlich nachwachsende Rohstoffe in Form einer Monovergärung von Energiepflanzen und wegen der unzureichenden Wirtschaftlichkeit findet kaum eine alleinige Vergärung von Wirtschaftsdünger statt.³

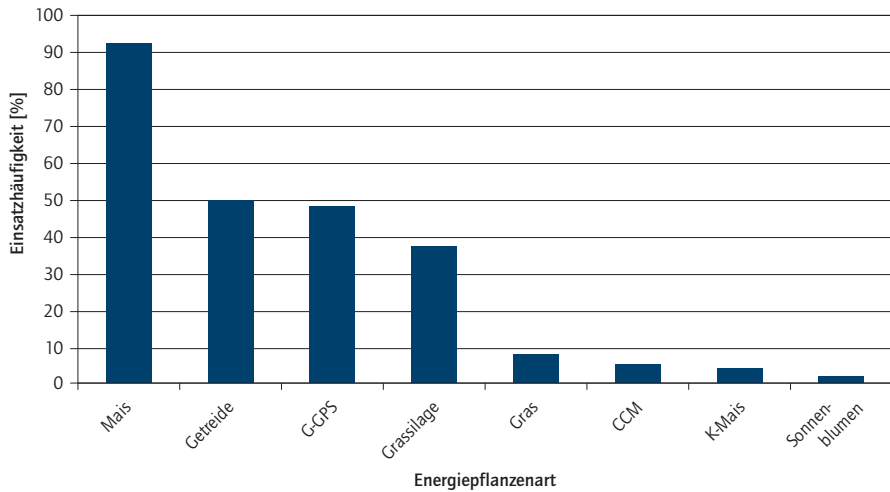
Abbildung 2: Häufigkeit des Einsatzes von Gärsubstraten



Aktuell werden für den Anbau von Biogas-Energiepflanzen etwa 500.000 ha beansprucht; das entspricht weniger als 3 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Im Vergleich dazu wurden bisher ca. 7 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche stillgelegt, um eine Überproduktion im Nahrungsmittelbereich zu vermeiden. In über 90 Prozent der seit 2004 gebauten Anlagen wird Silomais als Energiepflanze eingesetzt, wobei der Anteil am Substratinput überwiegend mehr als 50 Prozent beträgt. Getreide stellt die zweite dominierende Kulturart dar, wohingegen zum Beispiel Wildpflanzen bisher keine Anwendung finden (siehe Abbildung 3).

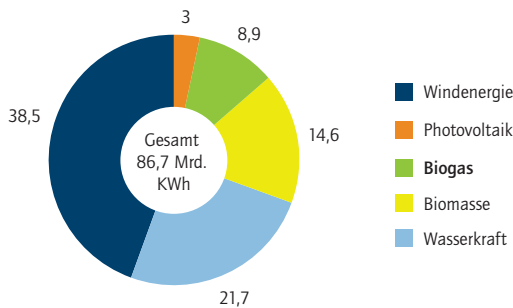
³ Weiland 2008a.

Abbildung 3: Einsatzhäufigkeit der wichtigsten Energiepflanzen



Die Nutzung des Biogases erfolgt derzeit fast ausschließlich in Blockheizkraftwerken zur kombinierten Strom- und Wärmeproduktion. Im Jahr 2007 wurden in Deutschland 8,9 Mrd. kWh Strom erzeugt.⁴ Dies entspricht einem Anteil von ca. 10 Prozent an der erneuerbaren Stromproduktion bzw. 1,5 Prozent des deutschen Stromverbrauchs (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Anteil des aus Biogas erzeugten Stroms an der erneuerbaren Stromerzeugung in Mrd. kWh.



Erneuerbarer Stromanteil am Verbrauch: 14,3 %

⁴ BMU 2008.

Damit stellt Biogas nach Windkraft, Wasserkraft und fester Biomasse bereits einen wichtigen Baustein für eine umwelt- und klimaverträgliche Energieproduktion dar und deckt aktuell den Strombedarf von über 3 Mio. Haushalten ab.

Über die Hälfte der Neuanlagen verwendet einen Teil der bei der Verstromung anfallenden Wärme zur Beheizung betriebseigener Gebäude, aber lediglich 30 Prozent führen eine Fremdverwertung durch. Daher muss davon ausgegangen werden, dass bei ca. 70 Prozent der in den letzten drei Jahren neu errichteten Biogasanlagen keine vollständige Wärmenutzung erfolgt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz von Biogasanlagen sind folglich erhebliche Anstrengungen notwendig, um in Zukunft einen höheren Wärmenutzungsgrad zu erreichen.

3 ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN

Der aktuelle Entwicklungsstand macht deutlich, dass die Biogaserzeugung zwar mit zu den effizientesten Techniken im Bereich der Biomassenutzung zählt; dennoch sind für den weiteren Ausbau erhebliche Verbesserungen bezüglich der Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit notwendig. Effizienzverbesserungen sind innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette von der Bereitstellung der Substrate bis hin zur Nutzung des Biogases möglich. Die wichtigsten Maßnahmen werden nachfolgend näher betrachtet.

3.1 SUBSTRATE

Aufgrund der stark gestiegenen Kosten landwirtschaftlicher Rohstoffe, die eine Folge der weltweit wachsenden Nachfrage nach hochwertigen Nahrungsmitteln sind, müssen für die Biogaserzeugung vermehrt neue Substratquellen erschlossen werden, die möglichst nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Deshalb sollten zukünftig zur Biogaserzeugung vermehrt pflanzliche und tierische Reststoffe und Nebenprodukte eingesetzt werden, die frei von Schadstoffen sind und somit eine Rückführung des Gärrestes als Dünger ermöglichen.

Wegen des doppelten Klimaeffekts muss insbesondere die Verwertung von Wirtschaftsdünger intensiviert werden. Mit dem neuen EEG 2009 wird hierzu bereits ein erheblicher Anreiz geschaffen, da bei Verarbeitung von mindestens 30 Prozent Wirtschaftsdünger ein Güllebonus in Höhe von bis zu 4 Euro-Cent/kWhel gezahlt wird. Derzeit fallen in Deutschland ca. 150 Mio. Tonnen Gülle und 40 Mio. Tonnen Festmist an. Davon werden bisher nur etwa 10 Prozent zur Biogaserzeugung genutzt. Ein weitgehend ungenutztes Energiepotenzial weisen fernerhin pflanzliche Nebenprodukte auf, die in großer Menge bei der industriellen Verarbeitung landwirtschaftlicher Rohstoffe anfallen und bisher überwiegend einer Kompostierung zugeführt wurden. Zu dieser Substratgruppe gehören beispielsweise Press- und Extraktionsrückstände aus der

Verarbeitung von Obst, Gemüse und Ölsaaten sowie von Schlempen, Treber und Trester aus Fermentationsprozessen. Ferner sind verschiedene Nebenprodukte aus der Verarbeitung von Pflanzenölen, wie zum Beispiel Glycerin, aufgrund des hohen Energiegehalts für die Biogaszeugung besonders geeignet. In Tabelle 1 sind für einige rein pflanzliche Nebenprodukte die Biogaserträge dargestellt.

Tabelle 1: Rein pflanzliche Nebenprodukte und deren Energiepotenzial (Stromausbeute bei elektrischem Wirkungsgrad von 36 Prozent).

PFLANZLICHE NEBENPRODUKTE	BIOGASERTRAG [m ³ /t FM]	METHANGEHALT [%]	STROMAUSBEUTE [kWh _{el} /t FM]
Getreideausputz	555	54	1.080
Glycerin	840	50	1.514
Kartoffelpülpe	143	50	258
Melasse	393	50	707
Obsttrester	112	52	210
Rapspresskuchen	571	63	1.305
Zuckerrübenschnitzel	148	51	272

Um den Einsatz der dominierenden Energiepflanzen Mais und Ganzpflanzengetreide nicht weiter auszuweiten, sollten zukünftig verstärkt Nicht-Nahrungspflanzen – wie Sudangras, Zuckerhirse, Durchwachsene Silphie sowie diverse Zwischenfrüchte – zur Gaserzeugung eingesetzt werden.⁵

Interessant sind auch diverse ertragreiche Wildpflanzen wie zum Beispiel Rainfarn, Beifuß und Wilde Malve, da diese auch auf schwächeren Ackerstandorten gedeihen und hohe Biomasserträge liefern. Gleichzeitig muss auch der Einsatz mehrjähriger Kulturen intensiviert werden, da diese einer geringeren Menge an Dünger und Pflanzenschutzmitteln bedürfen und daher ökonomisch und ökologisch besonders vorteilhaft sind.

Um die Effizienz der Nutzung nachwachsender Rohstoffe zu verbessern, müssen die bei der Silierung und Lagerung entstehenden Energieverluste durch Veratmung, die meist zwischen 10 und 20 Prozent liegen, mittels technischer Maßnahmen reduziert werden. Hierfür sind folgende Entwicklungen notwendig:

⁵ FNR 2008b.

- Spezialgeräte zur Verbesserung der Verdichtung;
- Messmethoden zur Online-Bestimmung der lokalen Verdichtung;
- spezielle Silierhilfsmittel für Energiepflanzen;
- Optimierung der Geometrie des Substratsilos in Abhängigkeit von der Anlagenleistung.

3.2 GÄRPROZESS

Unbefriedigend ist derzeit die Stoffumsatzleistung von Biogasanlagen, da für den Substratabbau teilweise mehr als 100 Tage benötigt werden und häufig bereits bei geringen Raumbelastungen Prozessinstabilitäten auftreten.⁶ Auch ist die Prozesskontrolle mangels geeigneter Sensoren bisher unzureichend, wodurch die Prozessoptimierung erschwert wird und Prozessstörungen zu spät erkannt werden.

Zur Effizienzsteigerung des Vergärungsprozesses bestehen vielfältige Möglichkeiten, wobei jedoch Aufwand und Nutzen in jedem Einzelfall kritisch zu prüfen sind. Zur Verkürzung der Vergärungszeit werden derzeit vor allem verschiedene Aufschlussverfahren erprobt. Ferner hat sich gezeigt, dass der Stoffumsatz häufig durch einen Mangel an Mikro- und Makronährstoffen beeinträchtigt wird; der Einsatz eines gezielten Nährstoffcocktails kann hier die Stoffumsatzleistung verbessern. Weitere Möglichkeiten der Effizienzverbesserung bestehen in einer besser an die Substrateigenschaften angepassten Verfahrensgestaltung, zum Beispiel durch eine Trennung von Hydrolyse und Methanbildung. Auch die Rührsysteme zur Durchmischung des Fermenterinhalt müssen besser an die Stoffeigenschaften der Substrate angepasst werden, um den Eigenenergiebedarf der Anlage zu senken und den Stofftransport zu verbessern. Obgleich diverse Mess- und Regeltechniken zur Prozessüberwachung und -optimierung in den letzten zwei bis drei Jahren entwickelt wurden, scheitert der Einsatz bisher häufig an den hohen Kosten und der teilweise unzureichenden Robustheit der Sensoren. Zur Überwindung dieser Hemmnisse bedarf es einer Weiterentwicklung der Messtechnik und größerer Stückzahlen, um die Kosten zu senken.⁷

3.3 ANLAGENTECHNIK

Deutliche Fortschritte sind auch bei der Anlagentechnik erforderlich, da Betriebsausfälle durch Störungen und Reparaturen die Effizienz und Umweltverträglichkeit der Biogas-erzeugung und -nutzung häufig beeinträchtigen.

Wünschenswert sind eine stärkere Standardisierung von Anlagenbauteilen sowie eine verbesserte Materialauswahl und Dimensionierung. So ist zum Beispiel nicht akzeptabel, dass Tauchmotorrührwerke häufig durch Seilriss abstürzen oder Rührflügel und Dosierschnecken durch hohen Verschleiß nach kurzer Betriebszeit ausgetauscht

⁶ Weiland 2008a.

⁷ FNR 2008c.

werden müssen, was jeweils einen mehrtägigen Anlagenstillstand zur Folge hat.⁸ Anlagenaggregate von überragender Bedeutung wie zum Beispiel Zentralpumpen sollten möglichst redundant ausgelegt werden, um Ausfallzeiten zu vermeiden. Im Hinblick auf Klimaschutz und Energieeffizienz müssen zudem die Methanverluste minimiert werden. Hierzu sind vor allem eine Abdeckung des Gärrestlagers und dessen Einbindung in das Gasverwertungssystem notwendig. Um Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit in der Praxis schnellstmöglich zu verbessern, wird nach dem neuen EEG 2009 der NawaRo-Bonus für Biogasanlagen, die nach Bundesemissionsschutzgesetz genehmigt wurden, nur gewährt, wenn diese Bedingung erfüllt ist.

3.4 GASVERWERTUNG

Das größte Potenzial zur Effizienzsteigerung besteht im Bereich der Gasverwertung. Ziel muss es sein, die gesamte im Biogas chemisch gebundene Energie zu nutzen. Dabei steht bei der Verstromung des Biogases vor allem die vollständige Nutzung der anfallenden Abwärme im Vordergrund. Hierfür stehen verschiedene technische Möglichkeiten zur Verfügung:

- Errichtung der Biogasanlage am Ort einer ausreichend großen Wärmesenke;
- Erzeugung von Kälte für ganzjährige Kühlzwecke;
- Einsatz der ORC-Technik zur weitergehenden Verstromung der Abwärme;
- Errichtung von Biogas-Mikrogasnetzen;
- Aufbereitung von Biogas und Einspeisung ins Erdgasnetz.

Die Nutzung von Biomethan als Kraftstoff stellt eine weitere Möglichkeit zur effizienten Biogasverwertung dar, da bei dieser Anwendung eine vollständige energetische Nutzung des Gases erreicht wird. Dabei kann das aufbereitete Gas entweder direkt an der Biogasanlage oder als Beimischung zum Erdgas getankt werden. Die deutsche Gaswirtschaft hat sich verpflichtet, bis zum Jahr 2010 dem Erdgaskraftstoff 10 Prozent Biomethan beizumischen, sodass ein zügiger Ausbau zu erwarten ist. Da die Kraftstoffnutzung nur eine geringfügig schlechtere THG-Einsparung als die Verstromung und Wärmenutzung aufweist, stellt dieser Weg – im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen – eine sinnvolle Möglichkeit dar, fossile Kraftstoffe zu ersetzen.

Zukünftig kann Biogas im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien einen wichtigen Beitrag als Systemdienstleister spielen, da es zur Bereitstellung von Regelenergie genutzt werden kann. Hierzu bedarf es einer Erhöhung der Gasspeicherkapazität und einer Poolung mehrerer Einzelanlagen zu einem virtuellen Kraftwerk. Erste Versuche zur Erprobung wurden bereits unter Praxisbedingungen erfolgreich abgeschlossen.⁹

⁸ Weiland 2008b.

⁹ Agentur für Erneuerbare Energien 2008.

3.5 GÄRRESTVERWERTUNG

Durch Rückführung des Gärrestes auf die Ackerflächen kann der Einsatz von Mineraldüngern reduziert werden. Mit steigender Bestandsdichte von Biogasanlagen kann es allerdings regional zu Nährstoffüberschüssen kommen, sodass eine überregionale Gärrestverwertung erforderlich wird. Dieses Risiko besteht vor allem bei einem hohen regionalen Tierbesatz sowie bei großen Verarbeitungskapazitäten. Notwendig ist in diesem Fall eine Aufbereitung des Gärrestes zu einem transportfähigen Dünger. Für die Gärrestaufbereitung wurden verschiedene Total- und Teilaufbereitungsverfahren entwickelt; allerdings sind die bisherigen Praxiserfahrungen auf wenige Demonstrationsanlagen beschränkt.¹⁰ Der Standortfrage und der Substratlogistik muss eine hohe Bedeutung zugemessen werden, da mit steigender Transportentfernung für die Gärrestverwertung sowie durch den Einsatz von Aufbereitungsverfahren sich die Energiebilanz der Biogaserzeugung grundsätzlich verschlechtert.

4 FORSCHUNGSBEDARF

Zur Effizienzsteigerung sowie zur Verminderung von Umweltbelastungen besteht in den diskutierten Bereichen weiterer Forschungsbedarf. An der Lösung der noch offenen Fragen wird teilweise bereits intensiv gearbeitet und vieles wird schon jetzt in Pilotversuchen erprobt. Um die internationale Spitzenposition Deutschlands auf dem Gebiet der Biogaserzeugung und -nutzung zu halten, sind neben der Optimierung der bestehenden Anlagentechniken und Nutzungsrouten vor allem auch Innovationen notwendig, um langfristig zu konkurrenzfähigen Kosten Biogas bereitzustellen. Das neue EEG 2009 öffnet im Bereich der Biomassenutzung und Gasverwertung die rechtlichen Regelungen für Innovationen, sodass günstige Voraussetzungen für eine dynamische Weiterentwicklung bestehen.

5 FAZIT

Biogas bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Deutschland besitzt die Technologieführerschaft auf dem Gebiet der Biogastechnik. Die Vorteile für den Klimaschutz sind unbestritten, ebenso die Vorteile der Dezentralität bei dieser Art der Energieversorgung. Daher sollten der Biogaspfad prioritär verfolgt und die Nutzung von Biogas zügig weiter ausgebaut werden. Ziel muss es dabei sein, den Biogaspfad unter ganzheitlichen Aspekten auszubauen, um Konkurrenzen zur Nahrungsmittelproduktion zu vermeiden. Gleichzeitig müssen Aspekte des Naturschutzes hinreichend Berücksichtigung finden und es muss auf eine effiziente Nutzung der nur begrenzt verfügbaren Ackerfläche besonders geachtet werden. Die in Rest- und Abfallstoffen verfügbaren Energiepotenziale sind vorrangig zu nutzen. Zudem besteht bei industrieller Verwertung

¹⁰ Döhler 2008.

nachwachsender Rohstoffe häufig die Möglichkeit einer Kaskadennutzung, indem am Ende einer stofflichen Verwertung die anfallenden Nebenprodukte und Reststoffe zur Biogasproduktion genutzt werden. Hierdurch verbessern sich nicht nur die Nutzungseffizienz und die Wirtschaftlichkeit der stofflichen Verwertung, sondern es kann gleichzeitig ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung geleistet werden.

6 LITERATUR

Agentur für Erneuerbare Energien 2008

Agentur für Erneuerbare Energien: Das regenerative Kombikraftwerk. URL: <http://www.kombikraftwerk.de> [Stand: 02.02.2009].

BMU 2008

Bundesministerium für Umwelt (Hrsg.): Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin, 2008.

Döhler 2008

Döhler, Helmut: Verfahren und Kosten der Gärrestaufbereitung (17. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas, Nürnberg 2008), Freising, 2008 – Tagungsband.

FNR 2008a

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Biokraftstoffe im Vergleich, Gülzow, 2008.

FNR 2008b

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen, Gülzow, 2008.

FNR 2008c

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung (Gülzower Fachgespräche Bd. 27), Gülzow, 2008.

SRU 2008

Sachverständigenrat für Umweltfragen: Klimaschutz durch Biomasse – Sondergutachten, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2008.

Weiland 2008a

Weiland, Peter: Erfahrungen mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Hamburger Berichte Bd. 31, Stuttgart: Verlag Abfall aktuell, 2008.

Weiland 2008b

Weiland, Peter et al.: Bundesmessprogramm zur Bewertung neuartiger Biogasanlagen, Abschlussbericht (unveröffentlicht), Braunschweig, 2008.

> BRENNSTOFFZELLEN FÜR BIOGAS: AUFBAU UND BETRIEB EINES SOFC-SYSTEMS

MATTHIAS JAHN/MARC HEDDRICH

1 EINLEITUNG

Zum effizienten Einsatz von biogenen Energieträgern zur Bereitstellung von Strom und Wärme können Brennstoffzellen einen wichtigen Beitrag leisten, da sie einen hohen Wirkungsgrad bei der Energiewandlung über einen weiten Leistungsbereich von einigen Watt bis zu mehreren Megawatt besitzen. Speziell die Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell = SOFC) kann in diesem Leistungsbereich unter Verwendung kohlenwasserstoffhaltiger Brennstoffe wie beispielsweise Erdgas, Biogas und Bioethanol eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur von 650-850 °C ist die Gasaufbereitung weniger komplex und es besteht die Möglichkeit der effizienten Nutzung der Abwärme.

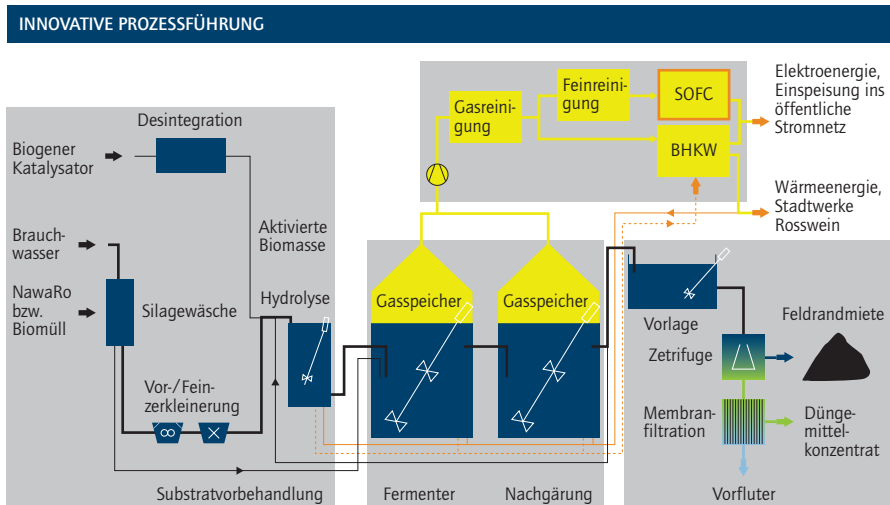
Ein mit Biogas gespeistes SOFC-System wurde vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) innerhalb eines Jahres konzipiert, simuliert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Erste Versuche wurden am IKTS mit synthetischem Biogas durchgeführt und in 500 Stunden Dauerbetrieb konnte eine sichere, automatisierte Funktion nachgewiesen werden. Anschließend wurde das in einem Laborcontainer aufgestellte System mit einer Pilotanlage zur Biogaserzeugung gekoppelt betrieben. Zur Reinigung des Biogases wurde ein mit dotierter Aktivkohle gefüllter Adsorber eingesetzt. Hierdurch wurden die schwefelhaltigen Komponenten (vor allem H_2S) vollständig entfernt.

2 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Im Rahmen eines vom Land Sachsen sowie von der EU geförderten Forschungsprojektes zur regenerativen Energieerzeugung wurde vom Fraunhofer IKTS eine auf SOFC-Technologie basierende Anlage zur Bereitstellung von Strom und Wärme auf der Grundlage von nachwachsenden Rohstoffen konzipiert und gebaut. Die gesamte Prozesskette von Biogaserzeugung mit Vorzerkleinerung, Desintegration und Fermentation der Biomasse über Biogaskonditionierung bis hin zur Bereitstellung von elektrischem Strom und Wärme wurde dargestellt. Das Brennstoffzellensystem besitzt eine Nennleistung von $P_{el} = 1,3$ kW bei einem elektrischen Nettowirkungsgrad von $\eta_{el} = 38$ Prozent. Mit der Anlage wird die technische Umsetzbarkeit des Verfahrens nachgewiesen und der Wirkungsgrad der einzelnen Stufen bestimmt.

Bei der stationären Anwendung können durch Stromerzeugung mittels konventioneller BHKW-Technologie auf Basis eines Gasmotors bei einer Anbaufläche von einem Hektar fünf Haushalte mit elektrischer Energie versorgt werden. Die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung wird neben den Kosten für die eingesetzten Substrate stark von der erzielten Gasausbeute sowie von der maximalen Kapazität der Anlage beeinflusst. Durch die verfahrenstechnische Optimierung der Biogaserzeugung konnte die Gasausbeute bezogen auf die Trockenmasse des Substrates um 30 Prozent erhöht werden. Die Verweilzeit konnte auf 30 Tage herabgesetzt werden, wodurch das Reaktorvolumen reduziert wird und die Anlagen bei gleicher Leistung kleiner gebaut werden können. Der neue Verfahrensansatz ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

Abbildung 1: Innovatives Verfahren zur Biogaserzeugung



Erhöhung Biogasanfall um 30 %
 Reduzierung der Faulzeit auf ca. 30 Tage

Quelle: Friedrich, E. (IKTS, UVT)

Im linken Teil des Verfahrensschemas ist die Vorbehandlung der Substrate dargestellt. In der Anlage wird zum großen Anteil Maissilage eingesetzt. Diese kann auf Grund der Konservierungsschicht nur schwer in der Fermentationsstufe durch die Bakterien umgesetzt werden. Daher erfolgt neben der erforderlichen mechanischen Zerkleinerung eine Wäsche der Maissilage zum Abtrag der Konservierungsschicht. Durch das Verfahren der Desintegration, welches ebenfalls am IKTS entwickelt worden ist, findet eine Aktivierung der eingesetzten Biomasse statt. Die mit diesen Verfahren vorbehandelten Einsatzstoffe werden dann einer Hydrolysestufe zugeführt. Durch diese Vorhydrolyse wird ebenfalls die Gasausbeute verbessert und die Verweilzeit reduziert. In dem Fermenter (Mitte) erfolgt dann die Umsetzung zum Biogas, welches nach einer Aufbereitung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) oder in der Brennstoffzelle (SOFC) genutzt werden kann. Für den Einsatz in der SOFC ist dabei zusätzlich eine Feinreinigung zur Entfernung von Schwefelwasserstoff (H_2S) durchzuführen. Zur Schließung des Stoffkreislaufs erfolgt eine Aufbereitung des Gärrestes zur Erzeugung festen und flüssigen Düngers, mit dem die Nährstoffe aus dem Substrat wieder auf die Felder gebracht werden können. Das ist ein nachhaltiges Konzept zur Energieversorgung.

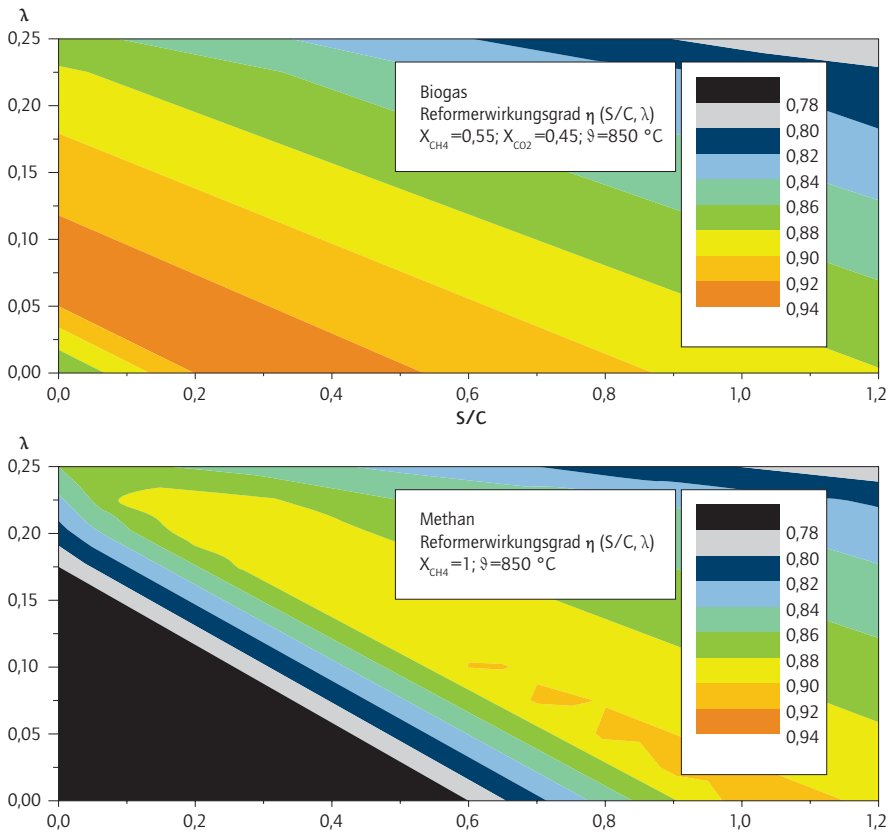
3 SYSTEMKONZEPT UND KONSTRUKTIVE UMSETZUNG

Die aufgebaute Brennstoffzellenanlage ist für den Einsatz von Biogas ausgelegt worden. Im ersten Prozessschritt erfolgt eine Feinreinigung des Biogases, bei der Schwefelwasserstoff durch Adsorption an Aktivkohle entfernt wird.

Die am Fraunhofer IKTS entwickelten planaren Brennstoffzellenstacks können elektrische Leistungen von bis zu $P_{el} = 1$ kW dauerhaft bereitstellen. Um die projektierte elektrische Leistung zu erreichen, wurden zwei Stacks mit jeweils $P_{el} = 0,75$ kW eingesetzt. Jeder Stack erhielt einen direkt an die Grundplatte angeflanschten Reformer.

Ausgehend von der durchschnittlichen Gaszusammensetzung des Biogases (Methan: 45 ... 70 %, CO_2 : 30 ... 55 %, Sauerstoff: 0,5 ... 2 %, Stickstoff: 2 ... 10 %) wurden Wirkungsgradbetrachtungen des Reformings von Biogas mithilfe thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen durchgeführt. Dabei wurden im Unterschied zum Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas, vergleichbar hohe Wirkungsgrade für Steam Reforming und partielle Oxidation ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 wiedergegeben.

Abbildung 2: Vergleich der Gleichgewichtsberechnung für Biogas- und Methanbetrieb



Auf dem Bild ist der Reformerwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Wasserdampf/Kohlenstoffverhältnis (S/C) und von der Luftzahl λ dargestellt, wobei die Luftzahl das Verhältnis vom zugeführten Luftstrom zum erforderlichen Luftstrom für die vollständige Verbrennung darstellt. Der Wirkungsgrad ist in dem Bild farblich gekennzeichnet, wobei die höchsten Werte in rot und die niedrigsten Werte in Schwarz dargestellt sind. Weiterhin kann beim Verhältnis von $S/C = 0$ im Reformier eine unerwünschte Kohlenstoffbildung auftreten. Beim Methanbetrieb ist das bei allen betrachteten Luftzahlen möglich. Beim Biogasbetrieb ist der Luftzahlbereich mit $\lambda > 0,1$ ohne Bildung von Kohlenstoff einstellbar. Darüber hinaus gibt es hier auch einen Bereich mit einem hohen Wirkungsgrad mit Werten über 90 Prozent.

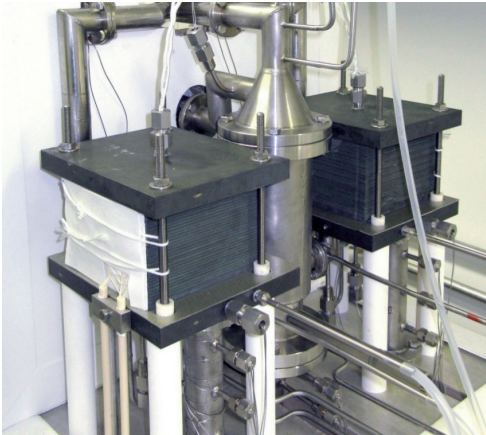
Die wichtige Schlussfolgerung aus der thermodynamischen Betrachtung lautet:

Biogas lässt sich mit einem einfachen Prinzip der partiellen Oxidation ohne Zufuhr von Wasserdampf zu einem Brenngas für die SOFC umsetzen. Eine aufwendige Abtrennung von CO und CO₂ ist nicht erforderlich.

Für die Nutzung von Biogas bietet sich der Einsatz der SOFC-Technologie an, da das Reformatgas ohne weitere Aufbereitung dem Brennstoffzellenstack zugeführt werden kann. Neben dem im Reformat enthaltenen Wasserstoff wird auch das Kohlenmonoxid direkt zur Stromerzeugung genutzt. Als Brennstoffzellenstacks werden im IKTS entwickelte und gefertigte 40-Ebener mit Elektrolyten aus Scandium-dotiertem Zirkonoxid und aktiven Flächen von 81 cm² pro Ebene eingesetzt, die in Zusammenarbeit mit der KERAFOIL GmbH entwickelt worden sind. Der im System eingesetzte Nachbrenner nutzt die positiven Eigenschaften der Verbrennung in porösen Medien, wobei insbesondere die Homogenisierung des Temperaturprofils, eine große Modulationsbreite der Leistung und die kompakte Bauweise hervorzuheben sind.

Das gesamte Systemabgas dient der Vorwärmung der Kathoden- und Reformierzuluft. Die weitere im Abgas enthaltene thermische Energie wird über einen Nutzwärmeübertrager an einen Warmwasserkreislauf übergeben.

Abbildung 3: Systemkonstruktion und Umsetzung des Brennstoffzellensystems. Die Brennstoffzellenstapel (Stacks) sind als Quader zu erkennen, darunter die Biogasreformer und in der Mitte der zylindrische Nachbrenner.



Das Brennstoffzellensystem ist in einem Laborcontainer installiert und wurde nach einer ersten Testphase am Fraunhofer IKTS in Dresden zur Kläranlage in Roßwein transportiert.

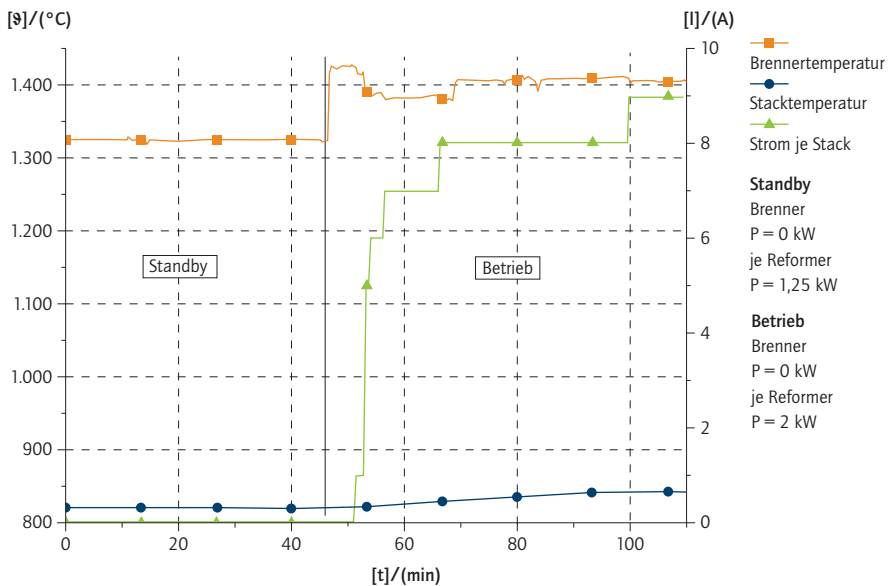
Abbildung 4: Laborcontainer mit Brennstoffzellensystem.



4 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

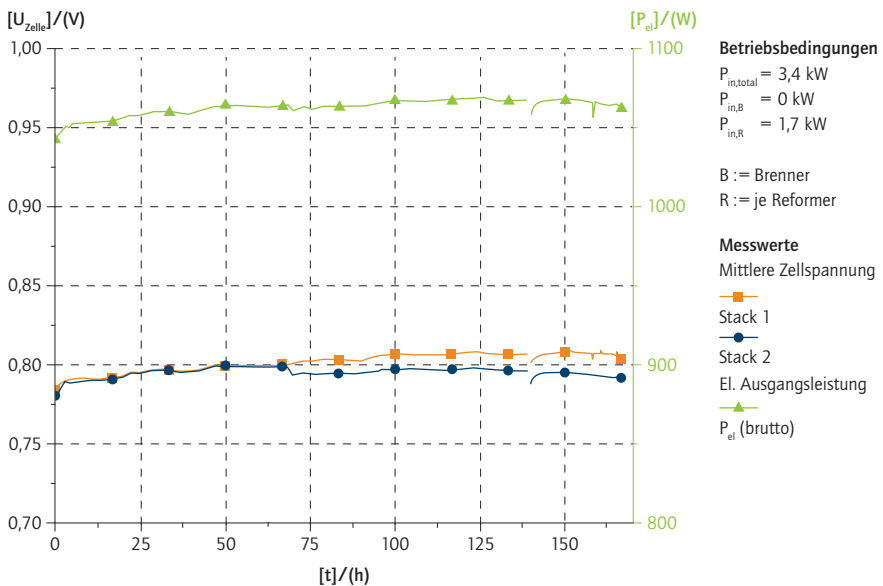
Besonders wichtig für einen stabilen Systembetrieb ist die Kenntnis eines definierten Standby-Zustands, in dem das Betriebstemperaturniveau gehalten wird. Im Fall eines Lastabwurfs kann durch regelungstechnische Automatismen in diesen Zustand umgeschaltet werden. Befindet sich das System im Standby-Zustand, kann somit direkt wieder auf Stackbetrieb umgeschaltet werden. In beiden Fällen wird der Nachbrenner nicht mehr durch externe Brenngaszufuhr versorgt, sondern durch das ungenutzte bzw. zum Teil genutzte Reformat (Abbildung 5).

Abbildung 5: Standby- und Stackbetrieb der Brennstoffzelle.



Bei einem Testbetrieb über 200 Stunden konnten die folgenden Leistungsdaten am System erreicht werden (Abbildung 6): $P_{el} > 1 \text{ kW}$, $\eta_{DC} = 27,8 \text{ Prozent}$ (brutto), $FU = 55 \text{ Prozent}$. Der Schwerpunkt der Entwicklung lag bei dem stabilen überwachungsarmen Betrieb. Daher wurden die maximalen Werte der Leistung nur kurzzeitig angefahren. Die hierbei erzielten Werte zeigen das vorhandene Potenzial auf: $P_{el} = 1,32 \text{ kW}$, $\eta_{DC} = 43,9 \text{ Prozent}$ (brutto), $FU = 85 \text{ Prozent}$.

Abbildung 6: Zellspannung und elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer im automatisierten Testbetrieb über 200 Stunden.



Nach Abschluss der ersten Versuchsreihe am IKTS wurde der Container mit dem Brennstoffzellensystem zur Kläranlage in Roßwein transportiert, wo die Pilotanlage zur Biogas-erzeugung aufgestellt ist (Abbildung 7).

Abbildung 7: Transport nach Roßwein



Am Standort Roßwein wurde das System gekoppelt mit der Biogaspilotanlage betrieben. Aufgrund der nicht zu allen Zeiten ausreichenden Gasproduktion und der stark schwankenden Gaszusammensetzung konnten nicht die möglichen Leistungswerte erreicht werden. Allerdings konnte ein unterbrechungsfreier Langzeitbetrieb von mehr als 500 Stunden des gesamten Systems einschließlich der Gasaufbereitung realisiert werden.

5 AUSBLICK UND WEITERES VORGEHEN

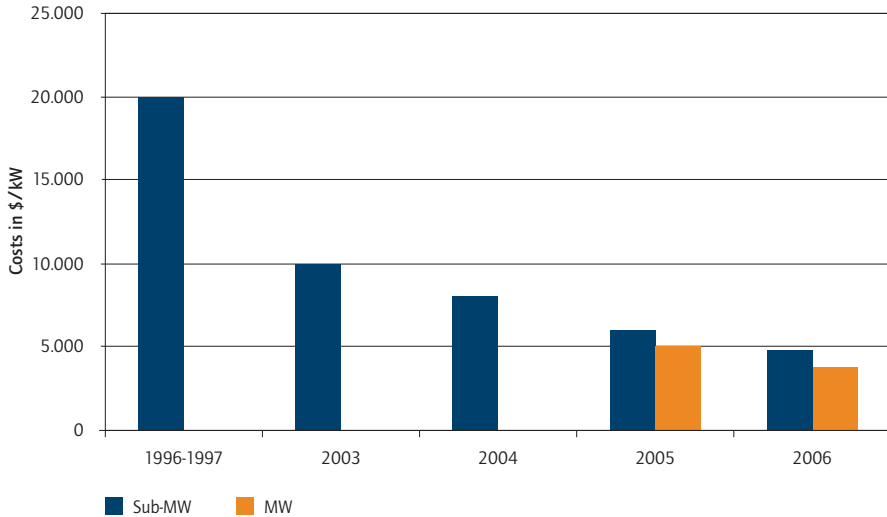
Die technische Machbarkeit konnte sowohl mit synthetischem als auch mit fermentativ erzeugtem Biogas nachgewiesen werden. Nach Abschluss der Testreihe wird das System zur Komponentenbeurteilung demontiert. Anschließend wird es wieder zusammgebaut, wobei eine Optimierung an einzelnen Komponenten hinsichtlich des Designs vorgenommen wird. Insbesondere wurde im Rahmen der Komponentenentwicklung eine Verbesserung der Durchmischung am Eintritt von Reformier und Brenner erreicht. Mit den optimierten Komponenten werden dann neue Tests durchgeführt. Weiterhin werden die Betriebsführung und die Regelung optimiert. Es sind darüber hinaus Tests an einer Biogasanlage mit größerem Speicher geplant.

6 WIRTSCHAFTLICHE UMSETZUNG

Zur Nutzung der Brennstoffzellentechnologie mit Biogas zur Stromerzeugung ist ein Upscaling anzustreben, damit ein wirtschaftlicher Betrieb erreicht werden kann. Heutige Biogasanlagen, die mit einem Blockheizkraftwerk gekoppelt betrieben werden, besitzen elektrische Leistungen im Bereich $100 \text{ kW} < P_{el} < 1 \text{ MW}$.

Da es für die SOFC-Technologie zurzeit keine belastbaren Zahlen gibt, wird hier die Kostenentwicklung bei der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell = MCFC) betrachtet (Abbildung 8).

Abbildung 8: Kostenentwicklung bei der MCFC



Seitdem in den Jahren 1996/97 die ersten Anlagen dieses Typs installiert wurden, konnten die Kosten in den darauffolgenden zehn Jahren auf etwa ein Viertel reduziert werden. Dies ist durch die erforderliche Lernkurve bei den Herstellungsprozessen begründet und kann bei entsprechenden Stückzahlen noch weiter verstärkt werden.

Da die Hochtemperaturbrennstoffzellen wie SOFC und MCFC keinen Gehalt an Edelmetallen erfordern, besteht die begründete Aussicht, dass die Kosten in den nächsten Jahren weiter deutlich sinken werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von Biogas in der Brennstoffzelle kann einen Beitrag zur biotechnologischen Energieumwandlung leisten und bietet die Möglichkeit der effizienten Bereitstellung von Strom und Wärme auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen. Um einen hohen Gesamtwirkungsgrad der Anlage zu erzielen und um die Wirtschaftlichkeitsziele zu erreichen, ist die Technologie der Biogaserzeugung zu optimieren. Ein wichtiger Schritt ist dabei die Optimierung der Substrataufbereitung, wozu im Rahmen eines Verbundprojektes ein neues Verfahren am IKTS entwickelt und in einer Pilotanlage getestet worden ist. Durch eine Optimierung der Reaktorbauform kann weiterhin die Verweilzeit im Fermenter gesenkt und damit das erforderliche Bauvolumen reduziert werden.

Für die Auslegung der Gesamtanlage zur Biogasproduktion und zur Biogasnutzung zur Bereitstellung von Strom und Wärme muss man den Wärmebedarf in der näheren Umgebung der Anlage ermitteln. Wenn ein Nahversorgungsnetz neben einer Biogas-

anlage aufgebaut wird, kann Biogas in unterschiedlichen Leistungsklassen ohne eine CO_2 -Abtrennung direkt in einem SOFC-System eingesetzt werden (z. B. zur Strom- und Wärmebereitstellung in einem Einfamilienhaushalt mit einer elektrischen Leistung von $P_{\text{el}} = 1 \text{ kW}$).

Dort, wo neben der Stromerzeugung auch ein großer Wärmebedarf besteht, ist es sinnvoll, größere Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung zu errichten. Zu diesem Zweck ist das erforderliche Upscaling der Brennstoffzellentechnologie durchzuführen. Wie bereits am Beispiel der MCFC-Technologie gezeigt werden konnte, gibt es noch ein großes Potenzial zur Kostenreduzierung bei den Systemen. Neben den Kernkomponenten wie dem Brennstoffzellenstack, dem Brenner und dem Reformer müssen auch alle BoP-Komponenten mit der erforderlichen Lebensdauer und bei Einhaltung der Kostenziele verfügbar sein.

Hier gibt es noch Entwicklungsbedarf bei den möglichen Lieferanten. Neben den erforderlichen Langzeittests auf der Systemebene mit dem Ziel, 40.000 Stunden Leistungsdauer nachweisen zu können, müssen auch Tests mit den einzelnen Komponenten erfolgen, um mögliche Degradationsmechanismen verstehen zu können.

Bei Umsetzung dieser Entwicklungsaufgaben stellt die Brennstoffzelle in Kombination mit der Biogaserzeugung eine gute Ergänzung zur Stromversorgung durch regenerative Energien wie Fotovoltaik und Windkraft in Aussicht, da bei ausreichender Dimensionierung des Gasspeichers eine zeitlich konstante Leistung zur Verfügung gestellt werden kann.

8 LITERATUR

Eder/Schulz 2006

Eder, B./Schulz, H.: Biogas Praxis, 3. Auflage, Freiburg: ökobuch Verlag, 2006.

Baaske/Trogisch 2004

Baaske, W. E./Trogisch, S.: Biogas Powered Fuel Cells, Linz: Trauner Verlag, 2004.

Larmienie/Dicks 2004

Larmienie, J./Dicks, A.: Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2003.

O'Hayre/Cha/Colella/Prinz 2006

O'Hayre, R./Cha, S.-W./Colella, W./Prinz, F. B.: Fuel Cell Fundamentals, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

> BIOMASSE HOLZ

ANDRÉ WAGENFÜHR

1 AUSGANGSSITUATION UND PROBLEMSTELLUNG

Die Kapazitätserweiterungen der deutschen Holzwirtschaft in den letzten Jahren, ein zunehmender Konkurrenzdruck aus dem Ausland und die gestiegene Nachfrage nach „Energieholz“ haben zu einer Ressourcenverknappung bei Holz geführt. Dadurch und infolge der begrenzten (regionalen) Verfügbarkeit der Biomasse Holz ist eine zunehmende Konkurrenz zwischen der stofflichen und energetischen Nutzung von Holz zu verzeichnen. Die öffentliche Förderung der energetischen Biomassennutzung hatte zudem in den letzten Jahren einen enormen Zuwachs an Anlagen zur Nutzung forstlicher Biomasse bzw. zur Nutzung von Koppelprodukten der Sägeindustrie (Säge-/Hobelspäne) für energetische Zwecke zur Folge.

2 POTENZIALE UND LÖSUNGSANSÄTZE

Im Interesse einer CO₂-neutralen Energiegewinnung ist generell die direkte Verwertung zu Bioenergie bei lignocellulösen Rohstoffen, die keiner stofflichen bzw. werkstofflichen Nutzung zugeführt werden können, sinnvoll. Vorzug sollte jedoch immer eine CO₂-bindende Verwertung haben. In Abhängigkeit von Nutzungsgrad und Dauer bleibt die energetische Nutzung am Produktkreislaufende immer erhalten (Kaskadennutzung). Die vorrangig stoffliche Nutzung des Rohstoffes Holz im Sinne von Nutzungskaskaden erlaubt auch den Aufbau eines Energiespeichers an Biomasse für die Zukunft. Die stoffliche Nutzung von Holz bzw. der Koppelprodukte (zum Beispiel Säge- und Hobelspäne etc.) im ersten Nutzungskreislauf entzieht daher nicht dem Stoffstrom einer möglichen späteren energetischen Nutzung, sondern baut vielmehr ein enormes energetisches Nutzungspotenzial für die Zukunft auf.¹

Ziel der stofflichen Holznutzung muss immer eine hohe Wertschöpfung und lange Nutzungsdauer sein. Bei allen Problemen und Konflikten der Energiegewinnung sollten aber auch auf der anderen Seite nicht die Energieeinsparung und -effizienz, so zum Beispiel beim ökologischen Bauen und Betreiben, bei der Holzbearbeitung und -verarbeitung sowie bei der Produktentwicklung, vernachlässigt werden.

¹ Teischinger 2007.

Auch die parallele Erzeugung von Produkten und/oder Energie aus Holz ist eine sinnvolle Art der Holznutzung. Hierzu zählt der integrierte Aufschluss lignocellulöser Rohstoffe in die Komponenten Cellulose, Hemicellulosen und Lignin sowie Inhaltsstoffe im Sinne einer lignocellulösen Bioraffinerie. Bis auf die chemische bzw. chemisch-technologische Polysaccharidnutzung werden die anderen Komponenten industriell kaum verwertet. Ein Potenzial wird in der Weiterverarbeitung der enthaltenen Chemierohstoffe zu Synthesebausteinen gesehen. Hier spielt die Ligninnutzung, zum Beispiel als Ersatz für petrochemische Klebstoffe, eine wichtige Rolle.

Der Wissenschaftliche Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz empfiehlt der deutschen Bioenergiepolitik, sich unter Klimaschutzaspekten auf Energielinien zu konzentrieren, bei denen sich CO₂-Vermeidungskosten von unter 50 Euro/t CO₂-Äquivalent erreichen lassen (BMELV 2007). Das wären unter anderem die kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung auf Basis von Hackschnitzeln (aus Waldrestholz oder Kurzumtriebsplantagen) und die Co-Verbrennung von Hackschnitzeln in bestehenden Großkraftwerken. Aufgrund des relativ geringen Heizwerts und der vergleichsweise geringen Energiedichte sollten vor allem kleine und dezentrale Anlagen zur unmittelbaren Energieumwandlung bevorzugt werden.

Der Anbau von schnellwachsenden Holzarten (Pappel, Weide) auf landwirtschaftlichen Nutzflächen gewinnt vor diesem Hintergrund der energetischen Verwertung zunehmend an Bedeutung. Ein Flächenpotenzial für diese Dendromassebereitstellung aus Kurzumtriebsplantagen könnten die sieben Prozent stillgelegten landwirtschaftlichen Nutzflächen sein², die aber in Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Biotreibstoffherzeugung stehen.

3 FAZIT

Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft, der Ressourcenschonung und der langfristigen CO₂-Bindung ist der Vorrang der stofflichen (insbesondere werkstofflichen) Nutzung von Holz vor der energetischen Verwertung zu fordern. Eine Nutzungskonkurrenzsituation erfordert Bilanzen für einen energetischen und ökonomischen Vergleich. Wegen des begrenzten Potenzials der einheimischen Biomasse Holz sollte man Holz zukünftig effizient und umweltfreundlich in Energie transformieren, den Verbrauch senken und die Energieeffizienz erhöhen.

² Hillemeier 2006.

4 LITERATUR

BMELV 2007

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung. Empfehlungen an die Politik (November 2007). URL: http://www.bmelv.de/cIn_045/nn_751706/SharedDocs/downloads/14-WirUeberUns/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenWBA,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/GutachtenWBA.pdf [Stand: 04.02.2009].

Teischinger 2007

Teischinger, Alfred: „Ressourcenverknappung und ihre Herausforderungen – Thesen für die Holzwirtschaft.“ In: Holztechnologie 48 (3), S. 5-8.

Hillemeier 2006

Hillemeier, Bernd (Hrsg.): Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen und Perspektiven für eine neue deutsche Energiepolitik. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006 (acatech diskutiert).

> MIKROALGEN ALS ENERGIETRÄGER DER ZUKUNFT

OTTO PULZ

1 EINLEITUNG

Nachwachsende Rohstoffe wurden in den letzten Jahren und Jahrzehnten als ein vielversprechendes Thema für die Energiegewinnung gehandelt. Zusammen mit Biodiesel und Bioethanol haben sie zudem bereits Einzug in den Energiemarkt gehalten. In jüngster Zeit kam die Bioenergie-Herstellung jedoch immer mehr in das Kreuzfeuer der Kritik, vor allem auch deshalb, weil sich abzeichnete, dass die Bioenergie-Produktion in immer stärkere Konkurrenz zur Nahrungsmittel-Produktion tritt. In der sehr kontrovers geführten Diskussion „Tank versus Teller“ wird, neben anderen Faktoren, auch die Produktion von Bio-Treibstoffen für den Anstieg der Weltmarkt-Preise für Grundnahrungsmittel, mit all seinen Folgewirkungen insbesondere für die Bevölkerung ärmerer Länder, verantwortlich gemacht.

Mit der zunehmenden Bedeutung von Nachwachsenden Rohstoffen für Prozesse der Energiegewinnung sind jetzt auch Mikroalgen als hocheffiziente Biomasseproduzenten in den Fokus des Interesses geraten. Vor dem Hintergrund der weltweiten Suche nach Alternativen für fossile Energieträger und der Notwendigkeit einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes gewinnen die Bemühungen, Mikroalgen industriell zu produzieren, eine völlig neue Bedeutung.

Erwiesen ist, dass Mikroalgen als stark chlorophyllhaltige Zellen gut fünfmal so effizient in der Fotosyntheseleistung, also der Umwandlung von Sonnenlicht in Biomasse, sind wie höhere Pflanzen. Der Ertrag je Hektar ist mit jährlich bis zu 150 Tonnen sechs Mal so groß wie jener des Elefantengrases oder Chinaschilfs und gut 50 Mal so groß wie der von Raps. Neben dem wesentlich geringeren Flächenbedarf ist darüber hinaus festzustellen, dass die Standortanforderungen an Algenproduktionsanlagen keine bzw. eine vergleichsweise sehr geringe Flächenkonkurrenz zu etablierten landwirtschaftlichen Kulturen nach sich ziehen. Eine industrielle Biomasseproduktion aus Mikroalgen könnte somit mit dazu beitragen, die Preise von landwirtschaftlichen Produkten und von Lebensmitteln auf dem Weltmarkt auf einem erträglichen Niveau zu halten.

2 MIKROALGEN

Fototrope Mikroorganismen stellen eine sehr vielfältige Mikroorganismengruppe dar. Aufgrund ihrer enormen physiologischen und morphologischen Diversität sind Mikroalgen auf der Erde allgegenwärtig.

Das Phytoplankton hat in seiner Funktion als Primärproduzent eine grundlegende Bedeutung für das irdische Ökosystem. In den Weltmeeren produzieren Mikroalgen 31,9 Prozent der Weltjahresprimärproduktion. Algen sind vorwiegend im Wasser lebende, einzellige oder vielzellige autotrophe Organismen von verhältnismäßig einfacher Organisation und unterschiedlicher Größe. Es wird geschätzt, dass die im Süß- und Salzwasser lebende Gruppe der Algen, die mikroskopisch kleine Einzeller (Mikroalgen), aber auch bis zu 30 m lange Riesentange umfasst (Makroalgen), jährlich etwa die gleiche Menge Kohlendioxid assimiliert und organische Substanzen biosynthetisiert wie die höheren Pflanzen an Land.

Einer biotechnologischen Nutzung sind kokkale Grünalgen wegen ihrer Fotosyntheseleistung und der Möglichkeit zur Massenzucht zugänglich.

Pragmatisch unter dem Begriff „Mikroalgen“ zusammengefasst, lassen sich für diese Organismengruppe einige strategische Expositionen aufzählen. Mikroalgen sind:

- die ersten Sauerstoff-Produzenten der Erde;
- die wichtigsten CO₂-Konsumenten;
- der Beginn der Nahrungskette in den Ozeanen;
- die wichtigsten Primärproduzenten der Welt;
- die ökologisch variabelste Organismengruppe.

Mikroalgen, die in über 35.000 wissenschaftlich beschriebene Spezies eingeteilt werden, besitzen abhängig von der Algenart und den Wachstumsbedingungen ein breites Spektrum an hochwertigen Inhaltsstoffen. Sie zeichnen sich aus durch:

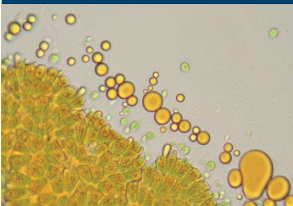
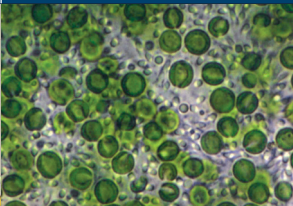
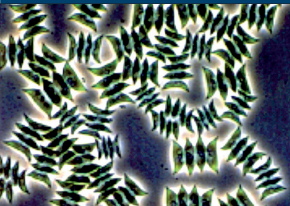
- hohe Proteingehalte mit dem kompletten Spektrum an essenziellen und nicht essenziellen Aminosäuren;
- Kohlenhydrate, insbesondere hochmolekulare und komplex zusammengesetzte Heteropolysaccharide;
- Fette und Fettsäuren wie Linol- und Linolensäure sowie Omega-3- und Omega-6-Fettsäuren;
- Mineralstoffe und Spurenelemente wie Kalzium, Phosphor, Eisen, Magnesium, Zink, Chrom und Selen;
- Pigmente wie Phycocyanin, Chlorophyll, Carotinoide und Xanthophylle;
- Vitamine wie Vitamin E, Vitamin C und die B-Vitamine B1, B2, B3, B6 und B12.

Der Markt für Mikroalgen wird gegenwärtig bestimmt durch Nahrungsergänzungsmittel, Futterzusätze, Grundstoffe für die chemische Industrie, pharmazeutische Produkte (zum Beispiel krebshemmende Medikamente) und Kosmetika. Aber auch Zusatzstoffe für die Landwirtschaft und für Aquakulturen (Düngemittel, Pestizide, Biostimulatoren)

oder die Rekultivierung von Industriebrachen können aus Mikroalgen gewonnen werden. Abwasserreinigung, CO₂-Recycling und die Biosorption von Schwermetallen sind weitere wichtige Einsatzgebiete. Der industrielle Algen-Markt ist also vielversprechend und wächst exponentiell.

Die wesentlichen Bestandteile von Mikroalgen sind Proteine und Aminosäuren, Fette und Fettsäuren, Mineralstoffe und Spurenelemente, Pigmente, Vitamine und antioxidative Schutzkomponenten.

Abbildung 1: Der Anteil von Proteinen, Kohlenhydraten und Fetten in Botryococcus, Chlorella und Scenedesmus

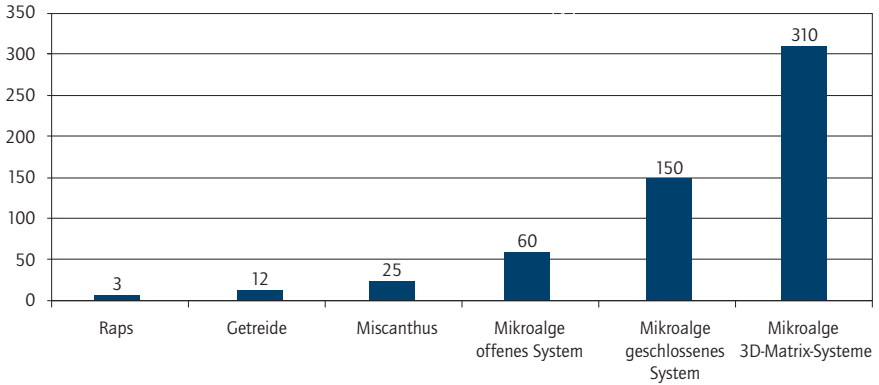
BOTRYOCOCCUS	CHLORELLA	SCENEDESMUS
		
10-16 % Protein	51-58 % Protein	8-12 % Protein
18-28 % Kohlenhydrate	12-17 % Kohlenhydrate	21-32 % Kohlenhydrate
30-62 % Lipide	14-25 % Lipide	16-40 % Lipide

3 BIOTECHNOLOGISCHE NUTZUNG

Der entscheidende Ansatzpunkt für eine biotechnologische Nutzung der Algen ist ihre ausnahmslos hohe Effizienz, die in entsprechenden Kultivierungssystemen zu einer Überlegenheit gegenüber den saisonal abhängigen Ackerpflanzen und anderen Biomasse-Rohstoffen führen kann. Denn Mikroalgen können das ganze Jahr über täglich geerntet werden. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese Tatsache. Die Produktivität von Algen für die Biomasseerzeugung ist bis zu 50 Mal höher als die von Getreide.

Abbildung 2: Mikroalgen als Energiepflanzen – Produktivität im Vergleich (Erträge)

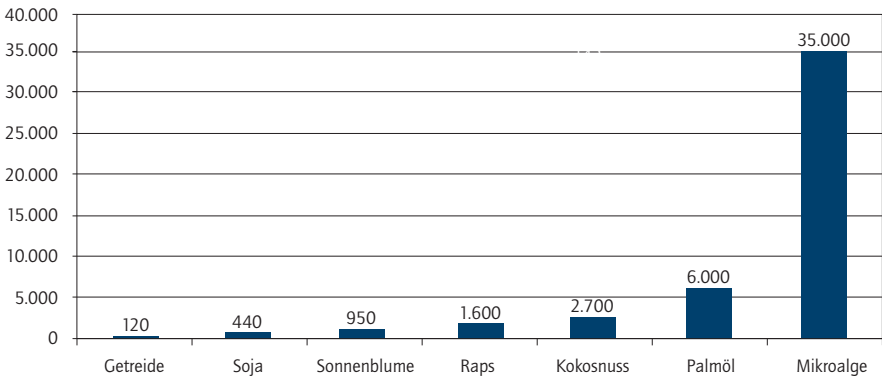
Jährlicher Ertrag Biomasse in Tonnen/Hektar*Jahr



Darüber hinaus beansprucht die (industrielle) Produktion von Algen keine landwirtschaftliche Nutzfläche. Die Kultivierung von Algen benötigt kein Trinkwasser und wird auf einen geschlossenen Wasserkreislauf geachtet, lässt sich auch der Wasserverbrauch auf ein Minimum reduzieren.

Abbildung 3: Mikroalgen als Energiepflanzen – Produktivität im Vergleich (Ölausbeute)

Jährliche Ölausbeute in Liter/Hektar*Jahr



Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil sind die Kapazitäten zur CO₂-Bindung und die Erzeugung von anderen wertvollen „Nebenprodukten“ wie Sauerstoff, Biogas, Syngas oder Biowasserstoff. Auch die Reststoffe etwa bei der Ölgewinnung aus Algen-

biomasse können noch weiter verarbeitet werden. Diese dienen zum Beispiel als Protein-Lieferanten oder als Grundlage für die Biowasserstoff-Gewinnung durch Fermentation. Eine ungefähre Stoffbilanz kann wie folgt aufgestellt werden: Aus ca. 2 Tonnen CO₂ entsteht 1 Tonne Biomasse, woraus 0,2 bis 0,5 Tonnen Biodiesel gewonnen werden können. Zusätzlich werden, sozusagen als Nebenprodukt, noch 1,6 Tonnen Sauerstoff produziert.

4 INDUSTRIELLE PRODUKTION VON TREIBSTOFFEN

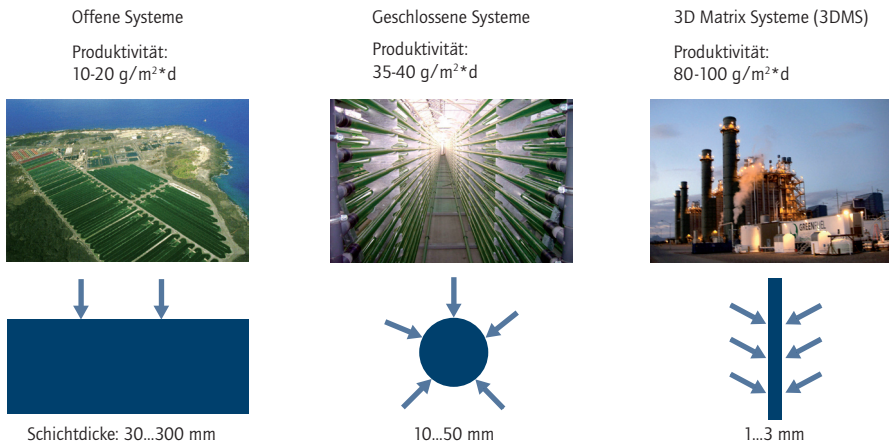
Im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung der Mikroalgen und dem damit verbundenen Konkurrenzdruck auf den Rohstoff Algenbiomasse gewinnt die Effizienz der Algenproduktion eine völlig neue Bedeutung. Bei der Produktion der Algen in Reaktorsystemen spielt unter anderem, wie auch bei den Landpflanzen, die je Mengeneinheit produzierter Algen erforderliche Kulturfläche eine entscheidende Rolle.

Die wichtigste Voraussetzung für das in der Suspension stattfindende Algenwachstum ist eine optimale Versorgung mit Licht. Dies kann nur über möglichst geringe Schichten der Kultursuspension erfolgen, da infolge des Algenwachstums und der zunehmenden Trübung in der Suspension eine rapide Verminderung des für die Algenzellen verfügbaren Lichts eintritt. Andererseits liefern aber nur hohe Zelldichten in der Kultur auch entsprechend hohe Zuwachsraten je Volumeneinheit.

4.1 ALGENKULTIVIERUNGSSYSTEME

Mikroalgen können prinzipiell in offenen, in geschlossenen und in 3D-Matrix-Systemen kultiviert werden.

Abbildung 4: Produktivität unterschiedlicher Algen-Kultivationsysteme am Beispiel von Chlorella



Unter „offenen Systemen“ werden natürliche oder künstliche Becken, Raceway Ponds und sogenannte Inclined Surface Systeme verstanden. Sie stellen die klassischen Methoden zur Produktion von Algenbiomasse dar und beanspruchen sehr große Flächen. Bei kostengünstiger Flächennutzung und unter guten klimatischen Bedingungen sind die Investitionskosten bis zu Anlagengrößen von einhundert Hektar vergleichsweise gering.

Natürliche und künstliche Becken werden im Allgemeinen zur Aufzucht mariner, natürlich vorherrschender bzw. extremophiler Spezies verwendet. Diese Bedingungen gewährleisten ein vergleichsweise geringes Kontaminationsrisiko. Beispiele hierfür sind die Kultivierung der extrem halophilen und starklichttoleranten Grünalge *Dunaliella salina* zur Beta-Carotinproduktion sowie die Produktion von Spirulina-Algen. Der Biomassezuwachs in Raceway Ponds hängt stark vom regionalen Klima und von den jeweiligen Anlagen ab. Prinzipiell kann man sagen, dass in tropischen Gebieten die besten Ergebnisse erreicht werden.

Die geringe Produktivität sowie die Anfälligkeit offener Systeme führten zur Entwicklung geschlossener Reaktoren, in denen fotobiologische Prozesse weitgehend unabhängig von störenden Umwelteinflüssen stattfinden können. Im Gegensatz zur Fermentation von heterotrophen Organismen wie zum Beispiel Bakterien, Pilzen oder tierischen Organismen, die reduzierte Kohlenstoffverbindungen wie Zucker, Fette etc. als Energiequelle verwenden, wird im Photobioreaktor die Fähigkeit fototropher Organismen zur Fotosynthese als Energiequelle genutzt.

Solche geschlossenen Reaktoren besitzen eine Reihe prinzipieller Vorteile:

- geringere CO₂-Verluste;
- geringere Wasserverluste;
- reduziertes Kontaminationsrisiko;
- optimale Temperaturregulation;
- kontrollierbare Hydrodynamik;
- reproduzierbare Kultivationsbedingungen;
- größere Flexibilität in Bezug auf Umwelteinflüsse;
- geringerer Platzbedarf.

Diese Photobioreaktoren ermöglichen durch transparente Reaktorwände (Röhren, Platten) einen Lichteintrag in die Kultursuspension, wobei etwa 90 Prozent des eingestrahelten Lichts die Zellen in diesem System erreichen. Die im Allgemeinen aus dem Photomodul (Glas- oder Kunststoffrohre bzw. Hohlkammerplatten), Ausgleichsbehältern, Verteilerrohren und Pumpen bestehenden Anlagen sind durch einen begrenzten Gasaustausch mit der Umgebung gekennzeichnet. Sie besitzen ein vergleichsweise geringes Kontaminationsrisiko und sind verfahrenstechnisch gut kontrollier- und steuerbar. Im

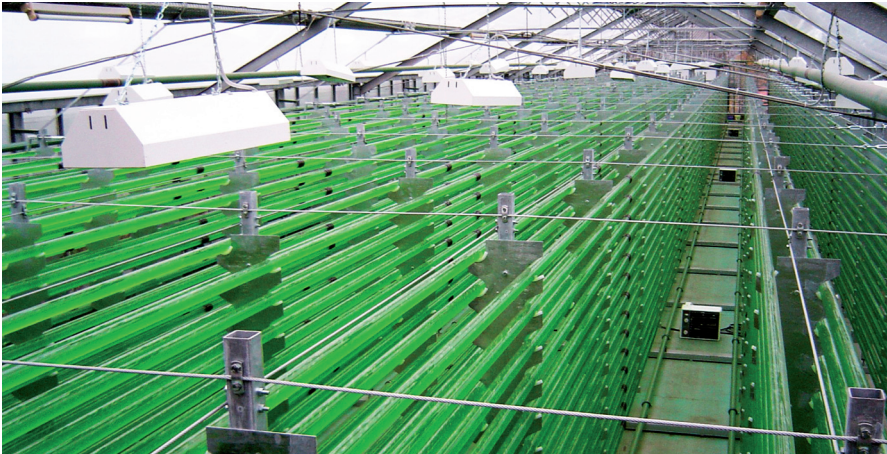
Zusammenhang mit den verschiedensten Zielstellungen der Kultivierung von Mikroalgen sowie den artspezifischen Anforderungen entstand weltweit eine Vielzahl von Reaktorvarianten, die in der Mehrzahl Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dienen. Bei großtechnischen Produktionsanlagen hat sich heute aber die prinzipielle Verwendung von Röhrenreaktoren durchgesetzt.

4.2 NEUE SYSTEME IN DER ERPROBUNGSPHASE

Die größte industrielle Algenproduktionsanlage Europas befindet sich in Klötze, Sachsen-Anhalt. Seit dem Jahr 2002 werden dort Algen des Stammes *Chlorella vulgaris* erzeugt. Die gesamte Produktion wird in 20 Teilanlagen realisiert, die autark voneinander arbeiten. Jede dieser Teilanlagen mit einem Nutzvolumen von 35.000 Litern und einer fotosynthetisch aktiven Rohroberfläche von 3.500 Quadratmetern ist mit einem eigenständigen Steuerungssystem ausgestattet. Durch diese miteinander verschalteten Bioreaktor-Module wird auf einer Grundfläche von 12.000 m² eine Produktionskapazität von insgesamt 150.000 kg pro Jahr erreicht; die produzierte Biomasse ist sowohl lebensmittelrechtlich als auch futtermittelrechtlich zugelassen.

Die modernsten Photobioreaktoren der IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH werden durch die Salata GmbH in Ritschenhausen, Thüringen genutzt.

Abbildung 5: Photobioreaktoranlage Salata GmbH in Ritschenhausen



Die offenen Systeme und auch die beschriebenen geschlossenen Glasrohrsysteme genügen aber nicht den Anforderungen an eine Massenproduktion von Algen-Biomasse etwa für die Produktion von Biodiesel. Beide Systeme weisen für die Erzeugung algaler Bioenergie sowohl hinsichtlich der Effizienz der Biomasseproduktion als auch bezüglich der Produktionskosten Defizite auf. Während bei den offenen Systemen Produktivitäten zwischen $10\text{-}20\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ erzielt werden können, liegt die Produktivität bei den hier beschriebenen geschlossenen Systemen bei $25\text{-}40\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Die Biomassen aus den invest- und betriebskostenintensiven geschlossenen Photobioreaktoren etwa der Anlagen in Klötze und Ritschenhausen werden jedoch erfolgreich unter anderem für Nahrungsmittel- und Futtermittelzusätze vermarktet. Für bioenergetische Applikationen sind die Kosten zu hoch.

Eine Neuentwicklung der Reaktortechnik stellt das sogenannte „3D Matrix System“ (3DMS) dar. Dieses Verfahren ist eine Weiterentwicklung des von der IGV GmbH entwickelten „Ultradünnschichtverfahrens“.

Die weiterentwickelte Verfahrenstechnologie ist in einer Pilotanlage in Arizona, USA positiv auf die Funktionsfähigkeit getestet worden.

Abbildung 6: APS Red Hawk Power Plant, Phoenix, Arizona



Im Jahr 2007 hat die IGV GmbH gemeinsam mit ihrem amerikanischen Partner Green-Fuel Technologies mittels einer Evaluierung im APS Red Hawk Power Plant in Arizona, USA nachgewiesen, dass die neue 3D Matrix System-Technologie nicht nur zu einem im

Vergleich mit anderen Systemen wesentlich höheren Ertrag von Biomasse führen kann. Die Qualität des aus der Algenbiomasse produzierten Kraftstoffes entspricht auch den hohen Anforderungen der Automobilindustrie.

Mit der 3DMS-Technologie kann die Produktivität von 10 bis 20 g pro Quadratmeter und Tag in offenen Systemen und 35 bis 40 g pro Quadratmeter und Tag beim geschlossenen System auf 80 bis 100 g pro Quadratmeter und Tag gesteigert werden. So ist der Ertrag beim 3D Matrix System mindestens fünf Mal so hoch wie beim offenen System.

5 AKTUELLER STAND DER TECHNIK

Seit einigen Jahren konzentriert sich die Forschung des Fachbereiches Biotechnologie der IGV GmbH unter anderem auf die industrielle Produktion von Mikroalgen und auf eine ökonomische Herstellung von Biotreibstoffen. Der gegenwärtige Arbeitsstand kann folgendermaßen beschrieben werden: Es wurde ein innovatives Prinzip zur Kultivierung von Mikroalgen entwickelt. Der Nachweis des Konzepts ist abgeschlossen und die Ergebnisse besagen, dass der ökonomisch tragfähige Bereich erreicht werden kann. Das IGV konzentriert sich deshalb gegenwärtig in seiner Tätigkeit auf das nun notwendige Scale-Up von einer Pilotanlage zur industriellen Produktion, die notwendigen Entwicklungsarbeiten in der Prozessgestaltung sowie auf die Demonstration der Langzeitstabilität und Verlässlichkeit des Prozesses.

Ziel ist also zuerst einmal die Errichtung einer Pilotanlage bis 2009 sowie, darauf aufbauend, die Entwicklung von Biomassennutzungsstrategien für die energetische Anwendung einerseits (zum Beispiel für die Gewinnung von Biodiesel, Ethanol, Biogas, Wasserstoff etc.) und für die Nutzung der Reststoffe, die bei der Produktion von Biotreibstoff anfallen, andererseits (zum Beispiel als Proteinquelle oder zur Gewinnung anderer wertvoller Inhaltsstoffe).

6 FAZIT

Sonne, Algen und Pflanzen liefern die Rohstoffe für die Erneuerbare Energie – und das in ausreichenden Mengen, um den menschlichen Bedarf zu decken. Wenn ausreichend Mittel zur Verfügung gestellt werden, damit die noch notwendige Entwicklungsarbeit geleistet werden kann, stehen die Voraussetzungen gut, dass die Produktion von Biodiesel aus Mikroalgen in Mitteleuropa in den nächsten zwei bis drei Jahren auch in größerem Maßstab unter ökonomisch sinnvollen Bedingungen technisch verwirklicht werden kann. Wenn das Rennen um die Vorherrschaft auf dem globalen Energiemarkt für Mitteleuropa entschieden werden soll, sind jedoch schnelle Entscheidungen gefragt. Die notwendigen Schlüsselkompetenzen und das fachliche Know-how sind derzeit schon vorhanden.

> „BIOMASSENUTZUNG IN MITTELDEUTSCHLAND“: EIN PROJEKT DER SÄCHSISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

ULRICH STOTTMEISTER

1 ZIELE DES PROJEKTNETZWERKES

Im Vorhaben „Technikbewertung und -gestaltung“ der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig wird die Bearbeitung eines Projektnetzwerkes „Biomassenutzung in Mitteldeutschland“ vorbereitet. Unter fachübergreifenden Aspekten soll in einem interdisziplinär angelegten Forschungsverbund im Rahmen einer Technikfolgenabschätzung untersucht werden, welche komplexen Wirkungen auf die unterschiedlichen Funktionen von Kulturlandschaften durch einen verstärkten Anbau nachwachsender Rohstoffe mit jeweils andersartigen Nutzungskonzepten (energetische oder stoffliche Verwertung) zu erwarten sind. Es ist somit das Ziel des Projektverbundes, konkret auf denkbare langfristige Chancen, aber auch auf Risiken einer verstärkten Nutzung nachwachsender Rohstoffe hinzuweisen.

Die Notwendigkeit derartiger Untersuchungen wird unter anderem deutlich vor dem Hintergrund der durchaus berechtigten aktuellen Diskussionen zur Problematik des Anbaus nachwachsender Rohstoffe für die Energiegewinnung versus Nahrungsmittelproduktion sowie der damit verbundenen ethischen Aspekte. Für Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft sollen wissenschaftlich fundierte Handlungsoptionen und Alternativen zur Verfügung gestellt werden, um aktuelle Planungsprozesse im Kontext einer nachhaltigen Bodennutzung, Landschaftsentwicklung und Raumnutzung zu unterstützen.

2 HANDLUNGSBEDARF UND POTENZIALE

Aus Sicht des Projektnetzwerkes „Biomassenutzung in Mitteldeutschland“ der Sächsischen Akademie der Wissenschaften besteht Untersuchungs- und Handlungsbedarf auf folgenden Gebieten:

- Analyse des tatsächlich verfügbaren Potenzials nachwachsender Rohstoffe und Erschließung von bislang nicht genutzten Flächenressourcen;
- Potenzialanalysen zur energetischen und stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe;

- Ausbau der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe unter der Zielsetzung einer hohen Wertschöpfung und einer möglichst langfristigen CO₂-Bindung. Diese kann als nicht-energetische Nutzung durch die Verwendung der nachwachsenden Rohstoffe als Materialien im Sinne einer Kaskadennutzung erfolgen (vgl. den Beitrag von Wagenführ in diesem Band). Es ist aber auch möglich, aus nachwachsenden Rohstoffen einfach zu gewinnende Massenprodukte (Zucker, Stärke, Öle, aber auch Lignine, vgl. den Beitrag von Wagenführ) als Ausgangsstoffe für eine Nutzung in der chemischen Industrie bereitzustellen, indem sie biotechnologisch oder chemisch modifiziert werden (vgl. die Arbeitsfelder der „Weißen Biotechnologie“ und „Grünen Chemie“).

In jedem genannten Themenfeld sind Potenziale vorhanden, fossile Rohstoffe schrittweise zu ersetzen.

In diesem Kontext sollen im Projektnetzwerk Alternativen für die Bereitstellung potenzieller Produktionsflächen erarbeitet werden, die nicht direkt in Bereichen der intensiven Land- und Forstwirtschaft liegen und somit die gegenwärtig absehbaren Nutzungskonkurrenzen entschärfen helfen. Hierbei geht es vorrangig um Flächenpotenziale aus der Forstwirtschaft (zum Beispiel Flächen im Bereich des technischen Feinerschließungssystems und im Bereich von Versorgungsleitungen). Von Interesse sind in der Landwirtschaft unter anderem die Flächen im Bereich ehemaligen Weidelandes. Weiterhin bietet sich die Nutzungsanalyse von Brachflächen der Industrie, von ehemaligen Bergbauflächen und von früheren militärischen Liegenschaften oder Flächen ehemaliger Wohn- bzw. Verkehrsnutzung an.

Für die zukünftige Energiepolitik, die sich weiterhin an der Nutzung des heimischen Rohstoffes Braunkohle orientiert, ist eine nachhaltige Gestaltung der Bergbaufolgelandschaften notwendig. Ein Konzept, in welchem eine Nutzung zur Gewinnung nachwachsender Rohstoffe mit einer Rekultivierung und Neubildung von Böden verbunden wird, könnte helfen, Akzeptanzprobleme des Braunkohlebergbaus in der Öffentlichkeit abzubauen.

3 KOOPERATIONEN UND REGIONALE VERANKERUNG DES PROJEKTNETZWERKES

Im Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ¹ wird in einem aktuellen Projekt die kombinierte Rekultivierung und Bodenbildung nach dem Prinzip der „Insellösung“ bearbeitet. Die entsprechenden Arbeitsgruppen sind in das Netzwerk einbezogen worden.²

Die besten technologischen Lösungen zur energetischen Nutzung von Biomasse (Biogasgewinnung, thermische Vergasungsprozesse) basieren auf homogenen Biomassen wie zum Beispiel Mais. Bei der Erschließung neuer Flächen aus der Forstwirtschaft

¹ <http://www.ufz.de>.

² <http://www.rame.vn/index.php?page=4&id=22>.

wie auch bei der Nutzung von Brachflächen fallen in der Regel Mischbiomassen an. Diese haben erfahrungsgemäß ein deutlich geringeres Ertragspotenzial und benötigen spezielle Modifikationen der Energiegewinnungstechnologien. Damit zusammenhängende Fragestellungen werden gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ und dem Deutschen BiomasseForschungsZentrum (DBFZ)³ bearbeitet.

Um die derzeitigen wirtschaftlichen, infrastrukturellen und natürlichen Gegebenheiten der drei mitteldeutschen Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen unter dem Aspekt „nachwachsende Rohstoffe“ zu nutzen und deren nachhaltige Entwicklung zu beeinflussen, ist es ein weiteres Ziel des Projektverbundes, eine Referenzregion auszuwählen. In dieser Referenzregion sollen beispielhaft Detailuntersuchungen wie zum Beispiel Energie- und Stoffbilanzen vorgenommen werden. Mit diesem Ziel bietet sich das Dreiländereck an, das die genannten Bundesländer in der Region Zeitz-Altenburg bilden. Alle erwähnten Themenfelder (Bergbauregion, Holznutzung, Weiße Biotechnologie) sind dort vertreten.

4 ZUKUNTSWEISENDE FRAGESTELLUNGEN

Die zentralen Fragestellungen des Netzwerkes, die auf der Grundlage von Projekten zur Flächenerschließung, zur zusätzlichen Biomassebereitstellung und zu neuen stofflichen Nutzungskonzepten erarbeitet werden sollen, sind:

- Welche Arten von nachwachsenden Rohstoffen und – damit im Zusammenhang stehend – welche Technologien sind im mitteldeutschen Raum für eine zukünftig verstärkte Nutzung zu empfehlen?
- In welchem Umfang und auf welchen Flächen ist diese Nutzung unter Nachhaltigkeitsaspekten zu berücksichtigen?
- Wie beeinflussen regionale Standortbedingungen und Konkurrenzbeziehungen zur Nahrungsgüterproduktion diese Auswahl?
- Welche Auswirkungen auf die Kulturlandschaft in der Gesamtheit ihrer Nutzungsfunktionen sind zu erwarten?

³ <http://www.dbfz.de>.

> POTENZIAL DER BIOTECHNOLOGISCHEN ENERGIE- UMWANDLUNG IN DEUTSCHLAND: EIN RESÜMEE DER DISKUSSION

THOMAS BLEY

Die Angaben über die Menge an Biomasse, die weltweit für eine energetische Nutzung zur Verfügung steht, differieren außerordentlich. Unstrittig ist aber, dass in Deutschland, einem Netto-Importeur bei Nahrungs- und Futtermitteln, Flächen zum Anbau von Energiepflanzen nur in sehr geringem Umfang zur Verfügung stehen und auch zukünftig zur Verfügung stehen werden. Es sind im Wesentlichen Flächen, die eine ökonomische Erzeugung von Nahrungsmitteln nicht erlauben, sowie Wälder. Unstrittig ist ebenso, dass Biomasse die einzige verfügbare regenerative Kohlenstoffquelle für eine stoffliche Nutzung unter anderem in der chemischen Industrie und zur Erzeugung von Werkstoffen darstellt.

Aus den Beiträgen zu dem hier dokumentierten acatech Workshop wird klar, dass die biotechnologische Umwandlung von Biomasse in Ethanol in Mitteleuropa gegenwärtig nicht wirtschaftlich durchgeführt wird (vgl. die Beiträge von Villela und Koltermann in diesem Band). In tropischen Ländern, die über große Flächenreserven verfügen, kann Bioethanol aber auch schon heute einen nennenswerten Beitrag zur Versorgung mit Treibstoffen leisten. Für Biokraftstoffe der zweiten Generation, die wesentliche Innovationen für dieses Gebiet versprechen, wird sich die Nutzung von biotechnologischen Prozessschritten im Vergleich zu rein thermischen Verfahren als der nachhaltigere Weg herausstellen. Die dafür notwendige enzymatische Hydrolyse von Lignocellulosen ist technisch aber noch nicht ausgereift, sodass hier erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Biogas (Biomethan) ist hierzulande eine echte Alternative (vgl. die Beiträge von Weiland und Jahn). Die zurzeit vorrangig betriebene Umwandlung in elektrische Energie in Blockheizkraftwerken ist freilich nicht der ökonomisch und ökologisch beste Weg. Biogas kann aber ohne große Probleme als Erdgassubstitut oder als Treibstoff genutzt werden. Für den Transport von Biogas steht eine geeignete Infrastruktur zur Verfügung und Biogas kann gut – viel besser als Elektroenergie – gespeichert werden.¹ Für die Biogasherstellung kann eine Vielzahl unterschiedlicher Ausgangsstoffe eingesetzt werden, die zeitlich und örtlich in sehr veränderlichen Mengen anfallen. Bioverfahrenstechnische Forschung und Entwicklung ist in großem Umfang nötig, um dafür kompakte Minianlagen zu entwickeln, in denen dezentral alle verfügbaren Abfall- und Reststoffe

¹ Thauer 2008.

durch eine biotechnologische Umwandlung einer energetischen Nutzung zugeführt werden können. Das gilt besonders für eine geschickte Kombination von verschiedenen verfahrenstechnischen Grundoperationen für eine schnelle und vollständige Hydrolyse der Lignocellulosen.

Wasserstoff als ein möglicher Energieträger der Zukunft hat eine interessante Perspektive. Da aber die offenen Fragen zur Speicherung und Distribution des Wasserstoffs noch nicht ansatzweise gelöst sind, sollten keine kurzfristigen Hoffnungen in eine biotechnologische Wasserstoffproduktion gesetzt werden. Es ist keineswegs entschieden, ob die Wasserzerlegung mit Solarstrom oder die mikrobielle Wasserstoffproduktion das wirtschaftlichere und Ressourcen schonendere Verfahren ist. Dabei sollte man zunächst keine allzu großen Erwartungen in neu konstruierte Mikroorganismen (Designer Bugs) oder biotechnologisch in ihrer Leistungsfähigkeit gesteigerte Biokatalysatoren (Synzyme) setzen. Viel entscheidender wird es sein, technische Systeme und Verfahren zu entwickeln, in denen die Leistungsfähigkeit mikrobieller Systeme wirtschaftlich genutzt wird.

Wenn die maximal mögliche Biomasseproduktion auf der Welt berechnet wird, beziehen wir uns üblicherweise auf Landpflanzen und auf die Landfläche. Man kommt schnell zu dem Ergebnis, dass nur ein kleiner Teil oder – bei zunehmendem Fleischkonsum – gar keine Fläche zum Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehen wird.² Mikroorganismen, die Zellfabriken der (Weißen) Biotechnologen, haben Wachstumsraten, die ein Vielfaches der Wachstumsraten auch von schnell wachsenden Pflanzen betragen. Die gesamte Biomasse der Erde besteht etwa zur Hälfte aus Mikroorganismen (Bakterien, Pilzen, Mikroalgen). Die Produktivität der Biomassebildung zum Beispiel durch Mikroalgen liegt (nach unterschiedlichen Schätzungen) mindestens beim 30fachen gegenüber der Produktivität von Pflanzen³ und die Fläche der Meere ist praktisch unbegrenzt. Algen eignen sich zur Synthese von Lipiden, die als Biodiesel genutzt werden können. Ihre Biotrockenmasse kann bis zu 70 Prozent Lipide enthalten.⁴ Algen sind aber auch geeignet, biotechnisch Wasserstoff herzustellen. Und nicht zuletzt kann mit Algen CO₂ aus anthropogenen Quellen sequestriert werden. Die Techniken dazu sind nicht ausgereift, in vielen Fällen noch nicht einmal erdacht oder in den Grundlagen entwickelt. Aber sind sie wirklich exotischer oder unrealistischer als andere breit diskutierte und in der Entwicklung öffentlich geförderte Verfahren?

Weißer Biotechnologie nutzt das enorme biokatalytische Potenzial von Mikroorganismen. Ein Kilogramm Holz (ein Ast zum Beispiel) hat eine Oberfläche von einem Quadratmeter, ein Kilogramm Blätter vielleicht eine von zehn Quadratmetern. Im Vergleich dazu hat ein Kilogramm grüne Mikroalgen eine Oberfläche von 4.000 m²; auf die Berechnung der Oberfläche von einem Kilogramm Cyanobakterien soll verzichtet werden.

² Pfennig 2007.

³ Muffler/Ulber 2008.

⁴ Chisti 2008.

Damit erreicht an um Größenordnungen höhere Stoffwechsel-, Synthese- und Wachstumsraten bei Mikroorganismen als bei normalen Pflanzen. Die Nutzung dieses Potenzials ist nur möglich in größeren technischen Systemen. Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg bei der Maßstabsübertragung ist die Entwicklung geeigneter leistungsfähiger Mess- und Regelungstechnik. Die mathematische Modellierung der komplexen, hochgradig nichtlinearen Prozesse in großen Bioreaktoren unterstützt eine erfolgreiche Prozessoptimierung.⁵ Deutschland hat auf diesen Gebieten eine führende Position inne. Der Anteil der Bioenergie und der biotechnologischen Energieumwandlung an der Energieversorgung zeichnet sich weltweit durch große Wachstumsraten aus. Hier bieten sich sehr gute Marktchancen für deutsche Anlagen- und Apparatebauer sowie für Unternehmen, die auf den Gebieten der Verfahrensentwicklung und der Herstellung von Mess- und Sensortechnik tätig sind.

Die Technikwissenschaften sind gefragt und werden gebraucht, um das Potenzial der biotechnologischen Energieumwandlung in Deutschland und in der Welt nutzbar zu machen. Auf diesem Wege leisten sie einen wichtigen Beitrag zu einer umweltverträglichen, nachhaltigen Energieversorgung.

LITERATUR

Behrendt/Dinjus 2006

Behrendt, F./Dinjus, E.: „Die Bedeutung der regenerativen Energien für die Energieversorgung“, in: Hillemeier, B. (Hrsg.): Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen – Perspektiven – Lösungswege, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006 (acatech diskutiert), S. 79-90.

Chisti 2008

Chisti, Y.: „Biodiesel from microalgae beats bioethanol“, in: Trends in Biotechnology 26 (2008), S. 125-131.

Grötschel/Lucas/Mehrmann 2008

Grötschel, M./Lucas, K./Mehrmann, V. (Hrsg.): Produktionsfaktor Mathematik. Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 (acatech diskutiert).

Gwehenberger et al. 2007

Gwehenberger, Gernot/Narodoslawsky, Michael/Liebmann, Bettina/Friedl, Anton: „Ecology of scale versus economy of scale for bioethanol production“, in: Biofuels, Bioproducts & Biorefining 1 (2007), S. 264-269.

⁵ Grötschel/Lucas/Mehrmann 2008.

Muffler/Ulber 2008

Muffler, K./Ulber, R.: „Use of Renewable Raw Materials in the Chemical Industry – Beyond Sugar and Starch“, in: Chemical & Engineering Technology 31 (2008), S. 638-646.

Pfennig 2007

Pfennig, A.: „Globale Bilanzen als Wegweiser für nachhaltiges Wirtschaften“, in: Chemie-IngenieurTechnik 79 (2007), S. 2009-2018.

Sell/Puls/Ulber 2007

Sell, D./Puls, J./Ulber, R.: „Weiße Biotechnologie – Energielösungen für die Zukunft“, in: Chemie in unserer Zeit 41 (2007), S. 108-116.

Thauer 2008

Thauer, R. K.: „Biologische Methanbildung: Eine erneuerbare Energiequelle von Bedeutung?“ In: Gruss, P./Schüth, F. (Hrsg.): Die Zukunft der Energie, München: Verlag C. H. Beck, 2008, S. 119-137.

Widdel 2008

Widdel, F.: „Erneuerbare Energieträger aus Mikroorganismen: Möglichkeiten und Grenzen“, in: Gruss, P./Schüth, F. (Hrsg.): Die Zukunft der Energie, München: Verlag C. H. Beck, 2008, S. 138-169.

> AUTORENVERZEICHNIS

Prof. Dr. rer. nat. habil. **Thomas Bley** ist Professor für Bioverfahrenstechnik am Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik der TU Dresden. Bis 1975 absolvierte er sein Studium der Mathematik an der TU Dresden, promovierte 1981 und habilitierte 1990 an der Universität Leipzig. Nachdem er in der Zeit von 1975 bis 1990 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biotechnologie (IBT) der Akademie der Wissenschaften der DDR in Leipzig tätig war, wurde er 1990 für ein Jahr Leiter der Abteilung „Biosignale“ am IBT. Auf weitere Leitungsfunktionen an der Fakultät für Biowissenschaften, Pharmazie und Psychologie der Universität Leipzig 1992 bis 1996 folgte dann 1996 seine Berufung zum Universitätsprofessor und zum Leiter der Studienrichtung Bioverfahrenstechnik an der TU Dresden. Thomas Bley ist Gutachter diverser Fachzeitschriften und Editor-in-Chief des Wiley-Journals „Engineering in the Life Sciences“. Darüber hinaus ist er Mitglied zahlreicher Organisationen wie dem VDI-GVC Fachausschuss „Bioverfahrenstechnik“, dem DECHEMA-Arbeitsausschuss „Messen und Regeln in der Biotechnologie“ und der Deutschen Gesellschaft für Zytometrie e.V. 2002 wurde Thomas Bley zum Ordentlichen Mitglied in die Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig berufen und im gleichen Jahr Mitglied von acatech. 2007 wurde er zum Fachkollegiaten der DFG für das Gebiet Bioverfahrenstechnik gewählt. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen Biomonitoring und Biosignale (Flow Cytometry), die Modellierung und Steuerung von Bioprozessen, Biokatalyse in heterogenen Systemen, die Weiße Biotechnologie und Pflanzenzellen in Bioreaktoren.

Marc-Philipp Heddrich ist seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme. 1998 bis 2002 studierte er an der FH Nordakademie und wurde Diplom-Wirtschaftsingenieur (FH), begleitet durch eine Anstellung bei der Unimatic GmbH im Zuge der dualen Ausbildung an der FH Nordakademie. In den nachfolgenden zwei Jahren war er als Innendienstingenieur bei der Unimatic GmbH für die technische Betreuung der Kunden und Projekte der Außendienstmitarbeiter sowie für die Bearbeitung sämtlicher technischer Reklamationen zuständig. Mit einem zweiten Studium erwarb er 2006 den Grad eines Diplom-Ingenieurs für Energiesystemtechnik an der Technischen Universität Clausthal. Am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme ist Marc-Philipp Heddrich mit dem Ziel der Promotion im Bereich SOFC-Systementwicklung tätig.

Dr.-Ing. **Matthias Jahn** ist seit 2006 Projekt- und Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme im Bereich Brennstoffzellensysteme. Er studierte Energie- und Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Berlin und promovierte dort 1999 im Fachgebiet Reaktionstechnik. 1994 bis 1995 war er Projektingenieur bei Rode + Schulze, Beratende Ingenieure, gefolgt von einer fünfjährigen Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik, Fachgebiet Reaktions-technik der TU Berlin und am Institut für Technische Chemie der TU Dresden. An der TU Berlin war er darüber hinaus 1998 bis 2002 Lehrbeauftragter im Fachgebiet Reaktionstechnik (Studiengang Verfahrenstechnik). 2001 wurde Matthias Jahn Assistent am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, wo er ein Jahr im Bereich Gasaufbereitung für Brennstoffzellen tätig war. Im Anschluss daran war er bis 2006 als Entwicklungs-/Projektingenieur bei der Webasto AG mit der Reformer- und Brennerentwicklung betraut. Über seine Tätigkeit am Fraunhofer IKTS hinaus ist Matthias Jahn seit 2007 Lehrbeauftragter für das Fach Reaktionstechnik an der Fachhochschule Zittau/Görlitz sowie der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH).

Dipl.-Ing. **Claudia Kirsten** ist seit 2008 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutschen BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) in Leipzig im Bereich Biomasseverbrennung. 2001 bis 2007 studierte sie chemisch-biologische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Bergakademie in Freiberg und erwarb den Abschluss Dipl.-Ing. für Verfahrenstechnik. Von 2007 bis 2008 war Claudia Kirsten als Mitarbeiterin am Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik der TU Dresden in den Bereichen Kultivierung unterschiedlicher Zelltypen in Bioreaktoren, Aufbereitung lignocellulöser Trägermaterialien und enzymatische Behandlung von Textilabwässern tätig. Ihre Arbeitsschwerpunkte am DBFZ liegen in der Aufbereitung von Naturstoffen und Herstellung von Biomassebrennstoffen sowie in der Entwicklung und Verbesserung der Eigenschaften von Agrar- und Mischbrennstoffen.

Dr. **Andre Koltermann** leitet seit 2006 als Group Vice President die Strategische Forschung und Entwicklung der Süd-Chemie AG. Sein Studium der Biotechnologie absolvierte er an der Technischen Universität Berlin. 1995/96 war er bei Berlex Biosciences, Inc. in Richmond, USA beschäftigt. 1998 schloss er seine Promotion am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen ab und war dort bis 2000 als Forschungsgruppenleiter tätig. 2000 gründete er die Direvo Biotech AG und war bis 2005 deren Präsident und CEO. Andre Koltermann hat zahlreiche Publikationen in verschiedenen Fachzeitschriften veröffentlicht und mehrere Auszeichnungen erhalten, unter anderem den Preis des Technology Review Magazins für die 100 „top innovators“ (TR 100). Darüber hinaus war er Finalist des „Entrepreneur of the Year-Awards“ von Ernst & Young und des WTN Awards in der Kategorie „Biotechnology from the World Technology Network“.

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. **Otto Pulz** ist seit 1975 Leiter der Abteilung „Biotechnologie“ des Instituts für Getreideverarbeitung (IGV). Nach seinem Studium der Biologie promovierte er 1973 an der Universität Rostock, worauf eine zweijährige Tätigkeit bei der IMG Engineering Company in Gotha folgte. 1996 erlangte er die Ehrendoktorwürde an der Pannon University (Ungarn) und seit 2002 ist er Professor für Phototropie Biotechnologie an der Fachhochschule Lausitz. Darüber hinaus ist Otto Pulz als Präsident der European Society of Microalgal Biotechnology und des Biotechnologieverbundes Berlin-Brandenburg (bbb) tätig sowie Mitglied des Advisory Board/Executive Committee der International Society of Applied Phycology und des Institute for Food and Environment Research (ILU). Zu seinen Arbeitsschwerpunkten am IGV gehören unter anderem die Rheologie und Funktionen von Phycocolloids in Nahrungsmitteln, Trockenprozessen für mikrobielle und wärmeempfindliche Biomasse, Food and Feed Microbiology und Hygienic Process Design sowie die Biotechnologie der Mikroalgen.

Dr. habil. **Ulrich Stottmeister** ist seit 1996 Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften und Prof. i. R. für Technische Chemie/Biotechnologie an der Universität Leipzig. Nach seinem Studium der Chemie und einer anschließenden vierjährigen Mitarbeitertätigkeit promovierte er 1968 zum Dr. rer. nat. an der Universität Leipzig. In den darauffolgenden Jahren war er unter anderem wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biotechnologie in Leipzig, wo er 1985 bis 1990 als Abteilungsleiter „Mikrobielle Produktbildung/Mikrobieller Abbau“ und 1990 bis 1991 als Abteilungsleiter „Biodegradation“ sowie als Sprecher der Sektion „Umweltbiotechnologie“ tätig war. 1992 bis 2003 war er Leiter der Sektion „Sanierungsforschung“ des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle (UFZ), woran sich bis 2004 eine Leitungsfunktion beim Department „Umweltbiotechnologie“ des UFZ anschloss. 1995 folgte er einem Ruf auf eine Professur für Technische Chemie/Biotechnologie an die Universität Leipzig, bis er 2004 in den Ruhestand trat. Unter seinen weiteren Berufungen sind unter anderem seine Ernennung zum Adjunct Professor an der Universität Saskatoon, Kanada im Jahr 2000, seine Aufnahme als Mitglied bei acatech 2002 sowie seine Ernennung zum Mitglied der Strukturbezogenen Kommission „Technikfolgenabschätzung“ der Sächsischen Akademie der Wissenschaften 2004 und zum Vizepräsidenten der International Society of Environmental Biotechnology (ISEB) 2004 zu erwähnen, die er 2006 bis 2008 auch als Präsident vertrat. Zu seinen Arbeitsschwerpunkten zählen nach einer langjährigen Beschäftigung mit mikrobiellen Transformationen und der Anwendung mikrobieller Produkte in der chemischen Synthese sowie mit dem mikrobiellen Abbau und der Stickstoffelimination in industriellen Abwässern seit 1992 die Grundlagen der Altlastsanierung und Umweltbiotechnologie.

Dr. **Murillo de Oliveira Villela Filho** ist Projektmanager im Bereich Nachwachsende Rohstoffe am Science to Business Center Bio der Evonik Degussa GmbH. Er studierte Chemie an der São Paulo University und an der Universität Bonn, wo er diplomierte und im Jahr 2003 als Doktorand des Forschungszentrums Jülich im Fach Biotechnologie promovierte. Es folgte ein Post-Doc-Aufenthalt an der Universität Freiburg (Pharmazeutische Chemie). 2004 bis 2006 war er Projektmanager am Projektthaus Proferm der Degussa GmbH im Bereich fermentativer Prozesse.

Prof. Dr.-Ing. **André Wagenführ** ist seit 1999 Professor für Holz- und Faserwerkstofftechnik am Institut für Holz- und Papiertechnik der TU Dresden, das er seit 2002 geschäftsführend leitet. Er studierte 1980 bis 1984 an der TU Dresden Verfahrenstechnik und promovierte 1988 nach vierjähriger Assistenzzeit am Lehrstuhl für Holz- und Faserwerkstofftechnik. Nach zweijähriger wissenschaftlicher Tätigkeit am ehemaligen WTZ Holz (heute ihd Dresden) war er als Produktionsleiter in der Möbelherstellung und Technischer Berater in der Klebstoffindustrie tätig. 1993 bis 1999 arbeitete André Wagenführ am Institut für Holztechnologie (ihd) Dresden, wo er ab 1994 die Leitung des Ressorts Rohholz (jetzt Holzbiologie/Holzschutz) übernahm. Am Institut für Holz- und Papiertechnik der TU Dresden ist er unter anderem für die Studienrichtung Holz- und Faserwerkstofftechnik verantwortlich. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der biotechnologischen Holzmodifizierung, der Furnierverarbeitung und -veredelung und in der Entwicklung effizienter Leichtbaustrukturen, nicht selten in engem Bezug zu Vorbildern der Natur. Er ist Sprecher der „Dresdner Interessengemeinschaft Holz“, Mitglied in zahlreichen Beiräten und Kuratorien, Fachgutachter, Autor vieler Veröffentlichungen und Mitinhaber mehrerer Patente. Neben seiner Mitwirkung an diversen Fachbüchern (wie „Pilze auf Bauholz“, „Holz-Lexikon“ und „Taschenbuch der Holztechnik“) ist er seit 2005 Mitherausgeber der Zeitschrift „holztechnologie“. André Wagenführ wurde 2006 zum Ordentlichen Mitglied in die Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig berufen und 2008 zum Mitglied von acatech.

Prof. Dr.-Ing. **Peter Weiland** ist Direktor und Professor am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des Bundesforschungsinstituts für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (früher FAL) und leitet dort seit 1983 die Abteilung Umweltbioverfahrenstechnik. Seinen beruflichen Werdegang begann er als Verfahreningenieur mit dem Arbeitsschwerpunkt Bioverfahrenstechnik. Er war als Leiter verschiedener biotechnischer Arbeitsgruppen tätig, bevor er am Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) Abteilungsleiter wurde. Peter Weiland ist Mitglied und teilweise Vorsitzender diverser wissenschaftlicher Gremien im In- und Ausland, wissenschaftlicher Beirat verschiedener Organisationen und Mitglied diverser Editorial Boards. Darüber hinaus ist er als Gutachter verschiedener Bundes- und Landesministerien sowie als Lehrbeauftragter tätig. Zur

Würdigung seiner herausragenden Verdienste um die Entwicklung und Verbreitung von Biogastechnologie wurde er 2007 vom Fachverband Biogas e.V. mit der Heinz-Schulz-Ehrenmedaille ausgezeichnet.

Dr. **Marc-Denis Weitze** ist seit 2007 wissenschaftlicher Referent im Projektzentrum der acatech Geschäftsstelle in München und betreut dort die Themennetzwerke Biotechnologie, Nanotechnologie und Werkstoffe. Er studierte Chemie und Philosophie und promovierte 1997 an der TU München in Chemie. Anschließend arbeitete er am Deutschen Museum in München und nebenberuflich als Wissenschafts- und Technikkommunikator.

> acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech vertritt die Interessen der deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu erleichtern und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um die Akzeptanz des technischen Fortschritts in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft deutlich zu machen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten aus Industrie, Wissenschaft und Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland; das Präsidium, das von den Akademiemitgliedern und vom Senat bestimmt wird, lenkt die Arbeit. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de

> acatech DISKUTIERT

Die Reihe „acatech diskutiert“ dient der Dokumentation von Symposien, Workshops und weiteren Veranstaltungen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Darüber hinaus werden in der Reihe auch Ergebnisse aus Projektarbeiten bei acatech veröffentlicht. Die Bände dieser Reihe liegen generell in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

BISHER SIND IN DER REIHE „acatech DISKUTIERT“ FOLGENDE BÄNDE ERSCHIENEN:

Joachim Milberg (Hrsg.): *Förderung des Nachwuchses in Technik und Naturwissenschaft. Beiträge zu den zentralen Handlungsfeldern* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Norbert Gronau/Walter Eversheim (Hrsg.): *Umgang mit Wissen im interkulturellen Vergleich. Beiträge aus Forschung und Unternehmenspraxis* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Martin Grötschel/Klaus Lucas/Volker Mehrmann (Hrsg.): *Produktionsfaktor Mathematik. Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt*, Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2008.

Thomas Schmitz-Rode (Hrsg.): *Hot Topics der Medizintechnik. acatech Empfehlungen in der Diskussion* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Hartwig Höcker (Hrsg.): *Werkstoffe als Motor für Innovationen* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Friedemann Mattern (Hrsg.): *Wie arbeiten die Suchmaschinen von morgen? Informati-onstechnische, politische und ökonomische Perspektiven* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Klaus Kornwachs (Hrsg.): *Bedingungen und Triebkräfte technologischer Innovationen* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Hans Kurt Tönshoff/Jürgen Gausemeier (Hrsg.): *Migration von Wertschöpfung. Zur Zukunft von Produktion und Entwicklung in Deutschland* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Andreas Pfingsten/Franz Rammig (Hrsg.): *Informatik bewegt! Informationstechnik in Verkehr und Logistik* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Bernd Hillemeier (Hrsg.): *Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen und Perspektiven für eine neue deutsche Energiepolitik* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Günter Spur (Hrsg.): *Wachstum durch technologische Innovationen. Beiträge aus Wissenschaft und Wirtschaft* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Günter Spur (Hrsg.): *Auf dem Weg in die Gesundheitsgesellschaft. Ansätze für innovative Gesundheitstechnologien* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

Günter Pritschow (Hrsg.): *Projektarbeiten in der Ingenieurausbildung. Sammlung beispielgebender Projektarbeiten an Technischen Universitäten in Deutschland* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.