WOLFGANG FRATZSCHER

Zur Energiewirtschaft des ländlichen Raumes

1 Historische Anmerkung

Reinhard Hüttl hat zur Motivation für das Projekt LandInnovation auf das *Noth- und Hülfsbüchlein für Bauersleute* von 1788 zurückgegriffen, um die historische Dimension der Aufgabe zu illustrieren. Dieser Umstand lässt es geboten erscheinen, auch für Teilthemen des Projektes nach ähnlichen Motivationshilfen zu suchen. Für energiewirtschaftliche Probleme kann ein Ansatz in dem Buch *Kraft und Wärme in der Landwirtschaft und in landwirtschaftlich industriellen Betrieben* von W. Leder gefunden werden. Dieses Buch ist 1930 in der Sammlung *Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen* erschienen, die in den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts veröffentlicht wurde und die explizite Begründung der Wärmewirtschaft oder, wie später gesagt wurde, der Energiewirtschaft markierte. Diese Disziplin bildete sich im Gefolge des 1. Weltkrieges, das durch eine Kohle- und Energiekrise gekennzeichnet war. Die Abschnitte des Buches von Leder können für mancherlei Probleme unseres aktuellen Projektes als historische Einleitung dienen. Schließlich hat die Sammlung einen Bezug zu unserer Akademie, war doch einer der Herausgeber – Walther Pauer (1887–1971) – Mitglied der Deutschen Akademie der Wissenschaften der DDR.

2 Energetische Grundbedürfnisse und der Gesamtbedarf

Der ländliche Raum hat von alters her die Aufgabe, die energetischen Grundbedürfnisse der Bevölkerung zu decken. Das ist zunächst die Befriedigung des Ernährungsbedarfs. Der Mensch benötigt zur Aufrecherhaltung seiner Körpertemperatur von etwa 37 °C ungefähr 100 W an Energie. Das erscheint nicht viel im Vergleich beispielsweise mit Leistungsangaben von Geräten, die die Gesellschaft heute tagtäglich umgeben und begleiten.

Da nach dem Satz der Erhaltung der Energie die aufgenommene Energie insgesamt wieder abgegeben werden muss, eignet sich der Mensch auch als Wärmequelle, da seine Körpertemperatur im allgemeinen weit über der Umgebungstemperatur liegt. Daraus resultiert die alte Heizungsregel: 7 Personen ersetzen einen Kachelofen. Tatsächlich hat man in früheren Zeiten das Militär abgeordnet, zum Beispiel am Nachmittag das Theater für den Abend zu temperieren.

Der Grundleistungsbedarf des Menschen führt in Verbindung mit der Bevölkerungszahl rasch zu Größenordnungen, die industrielle Dimensionen annehmen. Für Deutschland mit einer Bevölkerung von etwa 80 Millionen sind das dann heute schon 8 Gigawatt (GW), für die EU etwa 40 GW und für die derzeitige Weltbevölkerung 600 GW. Man muss sich vor Augen halten, dass 1 GW etwa die Leistung eines Großkraftwerkes als Kohle- oder Kernkraftwerk ist. Diese Leistung muss von der landwirtschaftlichen Produktion aufgebracht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die primäre Biomassenerzeugung, die damit verbunden ist, ein Vielfaches des angegebenen Wertes beträgt. Das ist bedingt durch die Verluste, die bei den vielen Umwandlungsstufen vom Primärprodukt bis zum Nahrungsmittel auftreten. Je nach den dabei durchlaufenen technologischen Ketten sind diese Verluste unterschiedlich groß. Besonders groß sind sie, wenn die Nahrungsgüterproduktion über die Tierproduktion erfolgt. In diesem Fall kann die erforderliche Primärenergie das Zehnfache und mehr der Endenergie betragen. Das führt dazu, dass die Energieproduktion der Landwirtschaft heute schon über der durch die Kohleverbrennung erzeugten im volkswirtschaftlichen Rahmen liegt.

Zur energetischen Einschätzung und Bewertung der Landwirtschaft ist die Angabe des volkswirtschaftlichen Gesamtbedarfes erforderlich. Er beträgt in Deutschland etwa 480 GW, das ist demnach das 60-fache des Ernährungsbedarfes. Damit liegt Deutschland etwa bei 50 % des entsprechenden nordamerikanischen Wertes und beim Zehnfachen des Durchschnittwertes von Afrika. Für die weitere Diskussion der Gegebenheiten des ländlichen Raumes sind Angaben für die landwirtschaftliche Produktion erforderlich. Der Anteil der Landwirtschaft selbst ist schwer zu bestimmen, da er in den zugänglichen Statistiken gewöhnlich nur unvollständig oder gar nicht angegeben wird. Man schätzt, dass er etwa bei 2 bis 3 % liegt und damit etwa ca. 10 bis 12 GW betragen könnte. Er setzt sich aus dem direkten und indirekten Energieverbrauch zusammen, die beide in der gleichen Größenordnung liegen. Im einzelnen wird angegeben (Heinloth 1997):

Direkter Energieverbrauch		49 %
davon	Kraftstoff	20 %
	Heizöl	23 %
	Elektroenergie	3 %
	Gas/ Kohle	1 %

Indirekter Energieverbrauch		51 %
davon für	Mineraldünger	20 %
	Pflanzenschutzmittel	1 %
	Futtermittel	23 %
	Saat-, Pflanzgut	2 %
	Maschinen, Anlagen	5 %

Diese Größenordnungen muss man sich vor Augen halten für die Einordnung und Einschätzung der folgenden Überlegungen, denn es sind einige quantitative Angaben erforderlich.[1]

3 Energetische Eigenschaften der Biomasseproduktion

Die sich abzeichnenden Strukturänderungen im ländlichen Raum erfordern im Hinblick auf eine künftige nachhaltige Entwicklung ein Nachdenken über neue Nutzungsmöglichkeiten. Die Funktion des ländlichen Raums als Nahrungsgüterproduzent sollte sicher erhalten bleiben. Die Effizienzsteigerung der landwirtschaftlichen Technologien führt aber zu einer ständigen Verminderung der hierfür erforderlichen Fläche sowie zu einer Arbeitskräfteabnahme. Hinzu kommen noch wirtschaftliche Einflüsse infolge der Globalisierung, die zu einer Veränderung der Erzeugerprodukte in Qualität und Quantität zwingen können. Das alles führt zu der angegebenen Aufgabenstellung. Als ein Lösungsvorschlag bietet sich die Biomassenproduktion als Basis für die Bereitstellung entsprechender Energieträger an. Die Erzeugung von

---

[1] Die quantitativen Angaben in der Literatur und vor allem in der öffentlichem Presse erfolgen im den unterschiedlichsten Einheiten, so dass ein Vergleich und damit eine Einschätzung nicht unmittelbar möglich ist. Der Leser hat den Eindruck, dass stets solche Einheiten gewählt werden, die möglichst große Zahlenangaben notwendig machen. Außerdem werden immer Jahresverbräuche und -erzeugungen angegeben. Physikalisch betrachtet sind dies nichts anderes als durchschnittliche Leistungen und hierfür gibt es eine schöne Einheit – das Watt. Deshalb soll im folgenden angestrebt werden, die energetischen Quantitäten als Leistungen in W bzw. in entsprechenden Vielfachen anzugeben. Als Umrechnungsfaktoren ergeben sich zum Beispiel

$$1\frac{tSKE}{a} = 929W \approx 1kW$$

$$1\frac{kWh}{a} = 0{,}11W \approx 0{,}1W$$

$$1\frac{MJ}{a} = 0{,}032W$$

Biomasse kann so als eine neue Energiequelle mit den Eigenschaften einer Einkommensenergie angesehen werden. Das bedeutet, dass ihr Leistungsangebot begrenzt ist, aber ihre Reichweite nach menschlichem Ermessen beliebig sein kann.
Die Verwendung der Biomasse als Energiequelle besitzt einige prinzipielle Vorteile, die in vielerlei Hinsicht in der aktuellen Diskussion von Bedeutung sind. Es sind dies vor allem:

- Die Produktion von Biomasse ist auf der Grundlage der historisch gewachsenen land- und auch forstwirtschaftlichen Technologien möglich. Erfahrungen aus diesen Bereichen können somit ohne weiteres einfließen und Arbeitskräfte Einsatzmöglichkeiten finden.
- Die Biomasse fällt, zumindest im Verlaufe ihrer Verarbeitung, im festen Aggregatzustand an. Das ist für den Ausgleich zeitlicher Unterschiede zwischen Energieangebot und -bedarf insofern von wesentlicher Bedeutung, als der feste Zustand außerordentlich günstige Speichermöglichkeiten eröffnen kann. Da sich andere Energieformen, insbesondere die Elektroenergie, nicht oder nur über Transformationen speichern lassen, kann diese Eigenschaft für die Gestaltung von Energieversorgungssystemen von großer Bedeutung sein.
- Die Verwendung von Biomasse ist CO2-neutral, da bei ihrer Umwandlung bestenfalls so viel CO_2 entstehen kann, wie die Pflanzen im Verlaufe ihres Wachstums gebunden haben. Man kann zu der Klimadiskussion sicher berechtigt unterschiedliche Positionen beziehen, der Versuch das CO_2-Niveau in der Atmosphäre zu halten, zwingt zu einer rationellen Energieanwendung. Aus energetischer Sicht ist dies sicher eine technisch und volkswirtschaftlich vernünftige Zielstellung.

Diese Eigenschaften haben dazu geführt, dass in der jüngsten Vergangenheit bereits eine unübersehbare Anzahl von Publikationen über die Möglichkeiten der Verwendung von Bioenergie in der Fachliteratur vorliegt. Viele davon entwerfen die phantastischsten Zukunftsbilder, da die Bioenergie in der allgemeinen Öffentlichkeit im erheblichen Maße von den scheinbar positiven Eigenschaften der Einkommensenergien partizipiert, als da sind: Ablösung der fossilen Energieträger und letzten Endes Ausnutzung der Sonnenenergie.
Jedoch haben auch schon viele Technologien der Bioenergienutzung, teilweise seit alters her, praktische Anwendung gefunden, wenn man an die Holzverbrennung, die Verwendung getrockneten Dungs oder den Einsatz von Biogasanlagen denkt.
All diese Umstände zwingen uns zu einer nüchternen Vorstellung von der Potenz der Bioenergie und ihren möglichen Verwendungsstrategien. Auch dazu liegt schon eine Vielzahl von Abschätzungen in der Literatur vor, auf die wir hier zurückgreifen. Da für die Verhältnisse in Deutschland die Flächen für mögliche Biomassenproduktionen sich recht gut abschätzen lassen, kann für die verschiedenen Pflanzen, die als

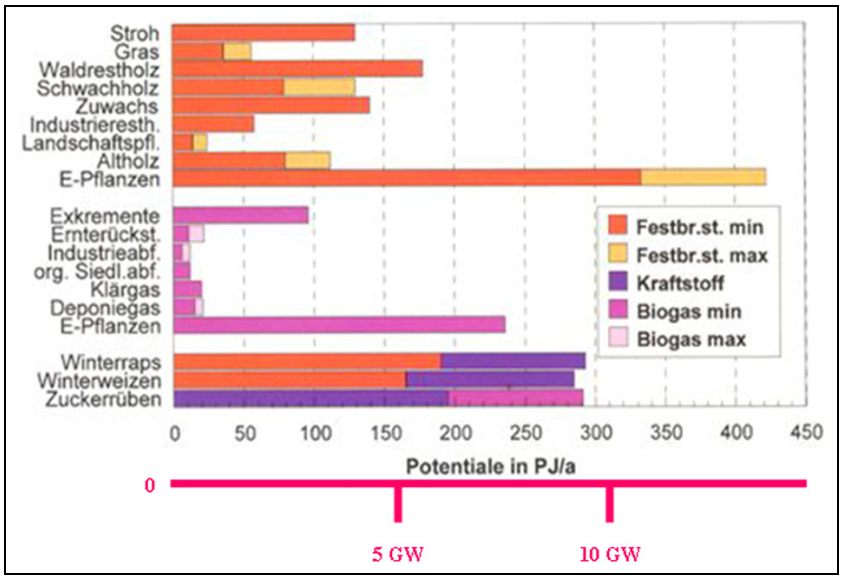

Abbildung 1
Biomassepotential

Energieträger in Frage kommen, die mögliche Energieproduktion angegeben werden. Das ist in Abbildung 1 für verschiedene Umwandlungstechnologien dargestellt (Kaltschmitt 2004). Diese Zahlen kennzeichnen aus heutiger Sicht mögliche Potentiale an Bioenergie. Wie schon angegeben, ist in einer 2. Abszisse die eigentliche Leistungsgröße vermerkt.
Auf der Grundlage solcher Überlegungen lassen sich dann auch Angaben über das mögliche Gesamtpotential machen, die gleichfalls in der Literatur zu finden sind (Heinloth 1997). Es sind dies in der Größenordnung

Wald	3 GW
Landwirtschaft	27 GW
Abfälle	8 GW
	38 GW

Im Vergleich zum Gesamtbedarf entsprechen diese Angaben ca. 8 %. Das relativiert schon manche utopische Vorstellung; andererseits rechtfertigen die dahinter stehenden Absolutzahlen auf jeden Fall eine aktive Auseinandersetzung. Dies erfordert weitere Einschätzungen und Bewertungen.
Zunächst ein Überblick über die möglichen Umwandlungstechnologien für Biomasse. Biomasse besteht aus komplexen organischen Verbindungen, aus denen stofflich prinzipiell ein großer Teil der gesamten organischen Chemie erschlossen werden

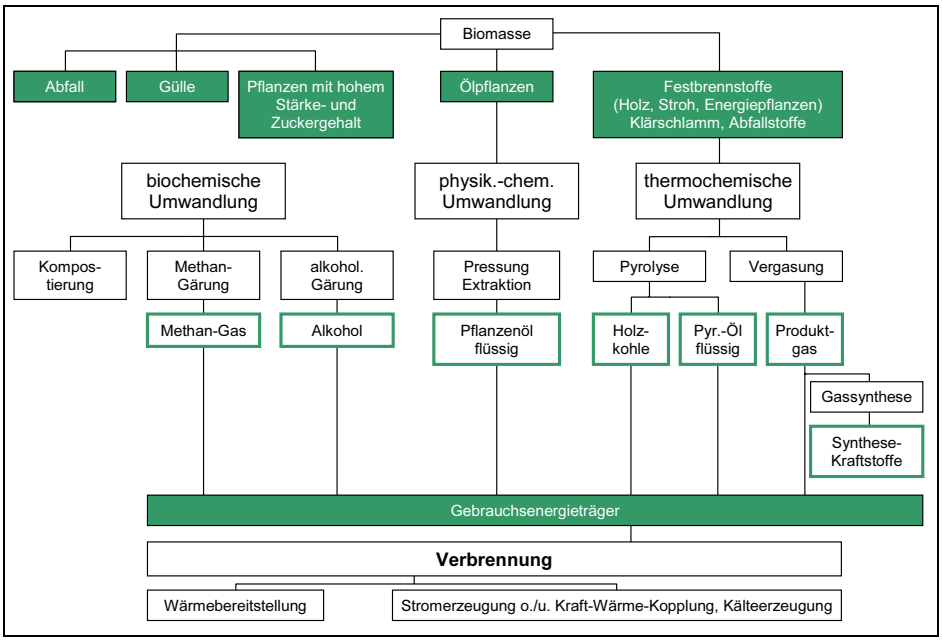

Abbildung 2
Umwandlungstechnologien für Biomasse

kann. Energetisch können theoretisch sämtliche wichtigen Gebrauchsenergieträger hergestellt werden. Als Biomasse werden nicht nur die verschiedensten Pflanzen und Festbrennstoffe bezeichnet sondern auch Abfälle und Gülle. Bei den Umwandlungstechnologien, die in Abbildung 2 (Hebecker et al. 2006) dargestellt sind, unterscheidet man zwischen biochemischen, physikalisch-chemischen und thermochemischen Verfahren. Zu den biochemischen Verfahren zählen die Biogasanlagen und die Verfahren zur Bioethanolherstellung; die repräsentativsten Vertreter der zweiten Gruppe sind die Verfahren zur Herstellung von Biodiesel. In der dritten Gruppe sind Verfahren zusammengefasst, die über die Prozesse der Pyrolyse oder Vergasung entweder gasförmige Gebrauchsenergieträger, die direkt der Nutzenergieumwandlung zugeführt werden, oder eine Art Synthesegas erzeugen, das über eine geeignete Synthese, zum Beispiel das Fischer-Tropsch-Verfahren, definierte flüssige Kraftstoffe produzieren. Sämtliche so erzeugten Gebrauchsenergieträger im flüssigen oder gasförmigen Zustand werden bei der energetischen Verwendung letzten Endes der Verbrennung zugeführt, die auf konventionellem Wege Wärme und/oder mechanische oder elektrische Energie bereitstellen kann. Natürlich können die festen Biobrennstoffe im einfachsten Fall der Verbrennung unmittelbar ohne Zwischenstufen zugeführt werden.

Aus diesem Schema wird deutlich, dass eine außerordentlich große Vielfalt von möglichen Umwandlungsverfahren für Bioenergie denkbar ist. Die bisherige Praxis und die Fachliteratur haben aus den unterschiedlichsten Gründen die Biogasanlagen und die Bioethanol- und Biodieselherstellung favorisiert. Das erscheint zunächst aus elementaren wirtschaftlichen Erwägungen heraus naheliegend, ist aber eine nicht notwendige Beschränkung, die die Vielfalt und Flexibilität einengt und im konkreten Anwendungsfall auf mögliche Effizienzsteigerungen verzichtet. Aus diesem Grund sollen für eine breitere Einschätzung der Nutzung von Bioenergie einige weitere prinzipielle Eigenschaften dieser Energieform quantitativ eingeschätzt werden.
An erster Stelle ist auf die Leistungsdichte der Bioproduktion zu verweisen. Angaben aus der Literatur kennzeichnen die zu erreichende Größenordnung. Übersetzt in eine technische Sprache wird ein Durchschnittswert von etwa 0,65 W/m^2 angegeben. Als Vergleichsmaßstab ist die Solarkonstante anzusehen mit 1,4 kW/m^2 an der äußeren Erdatmosphäre oder die Leistungsdichte der Sonnenstrahlung im Jahresmittel auf der Erdoberfläche von 140 W/m^2. Diese Werte muss man den Leistungsdichten konventioneller Verfahren der Energieumwandlung gegenüberstellen. So findet man für

Braunkohle-Tagebau	2400 W/m^2
Kohlekraftwerke	3300 W/m^2
oder für Einzelelemente	
Wärmerohr	10^3 kW/m^2
Kernreaktor	10^4 kW/m^2

Ohne diese Angaben an dieser Stelle weiter zu vervollständigen, wird offensichtlich, dass sich die konventionellen Verfahren der Energieumwandlung von denen der Bioenergienutzung um Größenordnungen unterscheiden und zwar schon auf der Ebene der Primärenergiebereitstellung. Da die Leistungsdichte ein erstes Maß für den Umfang und die Größe der technischen Anlagen ist, die zu ihrer Gewinnung und Umwandlung erforderlich sind, ist für eine konzentrierte Energiebedarfsabdeckung somit für konventionelle Verfahren ein prinzipieller Vorteil gegenüber der Bioenergienutzung gegeben. Diese Zahlen charakterisieren naturwissenschaftliche Grenzwerte.
Zur Einschätzung weiterer Eigenschaften der Bioenergie werden im allgemeinen wirtschaftliche Vergleichswerte, wie beispielsweise der Erdölpreis oder geeignete Kosten, verwendet. Wie die Vergangenheit und auch die gegenwärtigen Erfahrungen zeigen, sind derartige Angaben außerordentlich subjektiv gefärbt und führen häufig zu technisch und volkswirtschaftlich unsinnigen Lösungen. Es sei nur auf die Wasserkraftwerke als sogenannte „Großbauten des Kommunismus“ erinnert, die scheinbar wirtschaftlich wurden, da man glaubte, im Sozialismus keinen Zins erheben zu müssen. Oder es sei auf die Festlegungen der DDR erinnert, dass die Rohbraunkohle überall im Lande den gleichen Preis haben sollte. Die Folge war ein entsprechender und teurer Wassertransport im Lande. In ähnlicher Weise verbiegt zum Beispiel

heute die Subventionierung des Solarstromes die technische Realität und führt zu volkswirtschaftlichen Verlusten. Aus jüngster Zeit sei auf die Spekulation an der Börse mit dem Getreidepreis verwiesen, die beispielsweise wirtschaftlich zu dem Ende der Biogasanlagen führen kann. Ohne die Liste derartiger Fehleinschätzungen weiter zu vervollständigen, ist festzustellen, dass wirtschaftliche Angaben offensichtlich nicht die Basis für die Ableitung einer langfristigen Strategie sein können. Deshalb wird im folgenden lediglich eine technische Bewertung der Eigenschaften der Bioenergie und der zugehörigen Energiesysteme mit Hilfe der Exergie vorgenommen. Die Exergie[2] ist eine Art Erweiterung des Energiebegriffes (Fratzscher et al. 1986).

Zu den technisch bedeutsamen Eigenschaften einer Energieform zählen neben der Leistungsdichte ihre Transporteigenschaften. Da im allgemeinen die Primärenergie nicht an dem Ort zur Verfügung steht, wo der Energiebedarf anliegt, muss ein Energietransport erfolgen, der je nach der Lage der Umwandlungsanlagen als Primär-, Gebrauchs- oder Nutzenergie durchzuführen ist. Zum Vergleich sind im folgenden für einige Energieträger Massenströme angegeben, die zu transportieren sind, um jeweils 100 kW Exergieleistung am Verbrauchsort zur Verfügung zu stellen:

Braunkohle	128 kg/h
Braunkohlenbriketts	53 kg/h
Steinkohle	35 kg/h
Heizöl	27 kg/h
Erdgas	22 kg/h
Mitteldruckdampf	322 kg/h
Warmwasser	9550 kg/h
Kältemittel	1720 kg/h

Für die verschiedenen Formen der Bioenergie standen keine Werte zur Verfügung. Es lässt sich aber leicht abschätzen, dass die entsprechenden Werte auf Grund des Dichteverhältnisses ein Mehrfaches der Rohbraunkohle betragen können. Aus diesen

---

[2] Unter Exergie versteht man die maximal gewinnbare Arbeit beim Ausgleich eines Systems mit der Umgebung. Danach gilt, dass jede Energie W sich aus Exergie E und Anergie A zusammensetzt

$$W = E + A$$

wobei A der Teil der Energie ist, der sich unter den gegebenen Umgebungsbedingungen prinzipiell nicht in Arbeit umwandeln lässt. Manche Energien bestehen nur aus Exergie, zum Beispiel Elektroenergie. Die Umgebungsenergie ist reine Anergie. Die Exergie besitzt Potentialcharakter. Abweichungen von der Umgebungstemperatur ergeben sowohl oberhalb davon als auch unterhalb positive Werte der Exergie.

Zahlenwerten lässt sich erkennen, dass Öl und Gas offensichtlich die besten Transporteigenschaften besitzen. Braunkohle wie auch die Bioenergie wesentlich schlechter abschneiden, da für die gleiche Leistung entsprechende größere Massenströme zu transportieren sind. Wärme- und Kälteenergie besitzen demnach nur sehr geringe Transporteigenschaften. Sie sind deshalb nur dezentral, das heißt am Ort des Verbrauches, zu erzeugen.
Ein weiteres Problem der Energieversorgung besteht darin, dass zeitliche Unterschiede zwischen Energiebedarf und -angebot auszugleichen sind. Sie sind primär durch den Tages- und durch den Jahresrhythmus verursacht, unterliegen aber auch den Lebens- und Arbeitsgewohnheiten und vielerlei stochastischen Einflüssen. Sie können durch organisatorische Maßnahmen ausgeglichen werden oder technisch durch Energiespeicher. Die verschiedenen Energieformen besitzen sehr unterschiedliche Speichereigenschaften. Die festen wie auch die flüssigen Energieträger besitzen die besten Speichereigenschaften. Sie haben nicht nur eine sehr hohe spezifische Speicherfähigkeit, sondern weisen auch die geringsten Speicherverluste auf. Die Qualität der Energie wird in diesen Formen durch die Speicherung kaum vermindert. Es ist nun interessant, dass einige der Bioenergieträger wie zum Beispiel Stroh, aber auch die Zuckerrübe und Pellets die gleiche Größenordnung aufweisen. Es wird angegeben (Hebecker et al. 2006)

Stroh Rundballen	420 kWh/m^3
Zuckerrübe	670 kWh/m^3
Holzpellets	2550 kWh/m^3

Bioenergie kann demnach in geeigneter Form sehr gute Speichereigenschaften besitzen. Das gilt natürlich auch für die aus primärer Bioenergie erzeugten flüssigen und gasförmigen Gebrauchsenergieträger wie Kraftstoffe und Synthesegas.
Zusammenfassend gilt festzuhalten, dass die Bioenergie in Form der Primärenergie durch eine im Vergleich zu anderen Energieträgern sehr geringe Leistungsdichte, durch einen hohen spezifischen Transportaufwand aber durch sehr gute Speichereigenschaften gekennzeichnet ist. Es sei nochmals betont, dass diese Einschätzung allein aus technischer Sicht abgeleitet wurde. Sie ist nicht belastet durch wirtschaftliche Betrachtungen.

4 Energieversorgungssysteme auf der Grundlage von Bioenergie

Die vorgestellten Eigenschaften der Bioenergie lassen den Gedanken aufkommen, sie für die Energieversorgung des ländlichen Raumes selbst einzusetzen. Dafür spricht, dass der ländliche Raum gegenüber Ballungsgebieten durch eine sehr viel

	Ballungsraum - Veraltungs-großstadt	Ballungsraum - Industrie-großstadt	Mischraum-ländlich mit Zentren	ländlicher Raum
konkretes Beispiel	Düsseldorf	Duisburg	Versorgungs-gebiet Wesel	Spree-Neiße-Kreis
Charakteristische Daten				
Fläche in km^2	220	220	560	1650
Einwohner in 1000	600	500	250	150
Einwohnerdichte in Einw./km^2	2 700	2 300	450	90
Endenergieverbrauch[2] in MW	2 050	8 550	850	300
spez. Endenergieverbrauch[2] in kW/Einw.	3,4	17	3,4	2,0
Endenergiebedarfsdichte[2] in MW/km^2	9,3	39	1,5	0,18
spez. Endenergieverbrauch für Haushalte in kW/Einw.	1,1	0,8	1,3	1,4
Anteile am Endenergieverbrauch in %				
Industrie	30	90	44	11
Haushalte	25	4	29	46
Kleinverbraucher	23	2	5	11
Verkehr	22	5	22	32

Tabelle 1
Regionaler Energieverbrauch (Fratzscher & Stephan 2000)

geringere spezifische Energiebedarfsdichte ausgezeichnet ist. In der Tabelle 1 sind einige Energiebedarfskennzahlen von Ballungsgebieten und Regionen mit ländlichem Charakter gegenüber gestellt.

Die Unterschiede zeigen sich nicht nur im absoluten Energieverbrauch, sondern insbesondere in der Endenergieverbrauchsdichte, die in den Werten der Ballungsgebiete um ein bis zwei Größenordnungen differieren. Interessant ist, dass der spezifische Endenergieverbrauch der Haushalte keine Unterschiede zwischen dem ländlichen Raum und den Ballungsgebieten aufweist. Andererseits nehmen die Haushalte in den ländlichen Räumen den größten Anteil am Endenergieverbrauch ein. Allerdings ist dabei der indirekte Energieverbrauch der Landwirtschaft nicht berücksichtigt.

Die Zahlen für die spezifische Endenergiedichte liegen im ländlichen Raum bei 0,18 beziehungsweise 1,5 W/m^2 und entsprechen damit der Größenordnung der Leistungsdichte der Bioproduktion. Diese Übereinstimmung unterstreicht den eingangs geäußerten Gedanken quantitativ. Von dieser Seite lässt sich damit feststellen, dass es technisch sinnvoll erscheint, die Energieversorgung des ländlichen Raumes auf der Grundlage von Bioenergie als einer Einkommensenergie aufzubauen. Der Struktur des ländlichen Raumes angepasst empfehlen sich dann auch dezentrale, nach regionalen Gesichtspunkten angeordnete Anlagen zur Energieumwandlung. Eine zentrale

	Reaktionsgleichung	$\Delta_R h_0$ in kJ/mol		$\Delta_R s_0$ in J/mol K	$e^* = \frac{\Delta_R e}{\Delta_R h}$
Verbrennung	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-393,1		2,8	1,002
	$CO + ½ O_2 \rightarrow CO_2$	-284,2		-86,5	0,903
	$H_2 + ½ O_2 \rightarrow H_2O_{fl}$	-285,5	$\equiv H_O$	-163,0	0,82
	$H_2 + ½ O_2 \rightarrow H_2O_g$	-241,6	$\equiv H_U$	-44,7	0,944
	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O_{fl}$	-927,1	$\equiv H_O$	-242,4	0,92
	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O_g$	-802,6	$\equiv H_U$	-5,4	0,998
	$C_2H_2 + 2,5 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + H_2O_g$	-1.254,0		-54,3	0,99
	$C_6H_{6\,fl} + 7,5 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 3H_2O_g$	-3.131,2		137,9	1,013
	$C_{11}H_{22}O_{11} + 12 O_2 \rightarrow 12 CO_2 + 11 H_2O_{fl}$	-5.667,1	$\equiv H_O$	5.684,0	1,03
	$C_{11}H_{22}O_{11} + 12 O_2 \rightarrow 12 CO_2 + 11 H_2O_g$	-5.181,9	$\equiv H_U$	1.861,9	1,11
Vergasung	$C + ½ O_2 \rightarrow CO$	-110,4		89,0	1,25
	$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2 CO + H_2$	-447,3		119,5	1,08
	$CH_4 + ½ O_2 \rightarrow CO + 2 H_2$	-35,5		169,7	2,43
	$C_2H_6 + O_2 \rightarrow 2 CO + 3 H_2$	-136,1		355,3	1,77
	$C_6H_{6\,fl} + 3 O_2 \rightarrow$	-711,0		702,2	1,30
	$C_{11}H_{22}O_{11} + 12 O_2 \rightarrow 12 CO + 11 H_2$	898,0		3.385,2	-0,13
Pyrolyse	$CH_4 \rightarrow C_f + 2 H_2$	74,8		80,7	0,68
	$C_2H_2 \rightarrow 2 C_f + H_2$	-226,6		-58,5	0,92
	$C_6H_{6\,fl} \rightarrow 2 C_f + H_2$	-49,0		250,8	2,54
	$C_{11}H_{22}O_{11} \rightarrow C_f + 11 CO + 11 H_2$	857,6		2.802,7	0,02

Tabelle 2
Reaktionsverhalten von Kohlenwasserstoffverbindungen (Fratzscher & Stephan 2000)

Anordnung der Umwandlungsanlagen würde die quantitativ angepasste Größenordnung von Bedarf und Angebot auflösen und zu zusätzlichen Transformationen und entsprechenden Verlusten und Transportaufgaben führen. Für den konzentrierten Energieverbrauch von Ballungszentren sind dagegen die Vermögensenergien durch ihren hohen Wert der Leistungsdichte angemessen und ermöglichen so auch technisch und volkswirtschaftlich sinnvolle Lösungen. Eine solche Strategie der Energieversorgung könnte auch Energietransporte, zum Beispiel über elektrische Netze, in bestimmten Grenzen halten, die wohl heute durch die Liberalisierung der Netze technisch unnötig überschritten werden.

Zur Einschätzung des so anzustrebenden Energieversorgungssystems sind nun die Umwandlungstechnologien im einzelnen quantitativ zu bewerten. Entsprechend der in diesem Beitrag angewandten Methode soll dies wiederum ausschließlich aus technischer Sicht unter Benutzung des Exergiebegriffes erfolgen. Die Bioenergieträger bestehen im weitesten Sinn aus einem Gemenge von Kohlenwasserstoffverbindungen, die im einzelnen recht interessantes Reaktionsverhalten besitzen können. In Tabelle 2 sind die Reaktionsgleichungen einiger Kohlenwasserstoffverbindungen für

Verbrennungsprozesse, für Prozesse unter Vergasungs- und Pyrolysebedingungen zusammen mit einigen quantitativen Angaben enthalten. $\Delta_R h$ ist ein Maß für die Reaktionswärme, $\Delta_R e$ der Wert für die Exergieänderung bei der Reaktion.
Für eine Reihe von Reaktionen ist das Verhältnis

$$\frac{\Delta_R e}{\Delta_R h} > 1,$$

was bedeutet, dass bei dieser Reaktion die maximal abgegebene Arbeit größer sein kann als die Reaktionswärme und, wie die Zahlenwerte zeigen, teilweise sogar recht erheblich. Das ist natürlich energetisch eine außerordentlich bedeutsame Eigenschaft. Sie kann aber nur dann ausgewertet werden, wenn von der üblichen Art der Reaktionsführung – die gewöhnlich isobar-adiabat erfolgt – abgewichen wird. Beispielsweise ist eine isobar-isotherme Führung des Reaktionsprozesses bei der Gleichgewichtstemperatur anzustreben. Hierzu liegen bisher kaum Erfahrungen vor. Zu ihrer Realisierung wäre echte Grundlagenforschung erforderlich. Der Verfolgung dieser Möglichkeit widerspricht von der praktischen Seite her die Tatsache, dass die Bioenergieträger stets als ein Gemisch der verschiedensten Kohlenwasserstoffverbindungen vorliegen. Wen man sich aber überlegt, welche Anstrengungen an anderer Stelle zur Durchsetzung bestimmter Maßnahmen der Energieeinsparung unternommen werden, ist es sicher richtig, den angegebenen Umstand nicht aus dem Auge zu verlieren.
Zur Einschätzung der praktischen Möglichkeiten sind einige Umwandlungstechnologien der primären Bioenergieträger in Gebrauchsenergien exergetisch untersucht worden. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt.
Die bereits weiter oben als marktreif bezeichneten Prozesse der Bioethanol- und Biodieselherstellung liegen bei einer exergetischen Güte von etwa 50 %. Dagegen schneidet die Biogaserzeugung mit ca. 70 % doch recht gut ab. Auch die Verfahren, die Biokraftstoffe der 2. Generation erzeugen können, liegen aus exergetischer Sicht in der gleichen Größenordnung. Von besonderer Bedeutung scheint das Ergebnis eines Vergasungsprozesses zu sein, der ähnlich wie die Biogaserzeugung bei etwa 70 % des exergetischen Wirkungsgrades liegt. Obwohl bis zur praktischen Reife eines solchen Prozesses noch Anwendungsforschung notwendig ist und Erfahrungen aus Versuchs- und Pilotanlagen vorliegen müssen, rechtfertigt ein solches Ergebnis derartige Aufwendungen.
Für die Komplettierung der Energieversorgungssysteme sind als nächste Stufe Anlagen zur Umwandlung der Gebrauchsenergie in Nutzenergien erforderlich. Die Struktur dieser Umwandlungsstufe könnte je nach dem Aggregatzustand der Gebrauchsenergie der Abbildung 4 folgen.

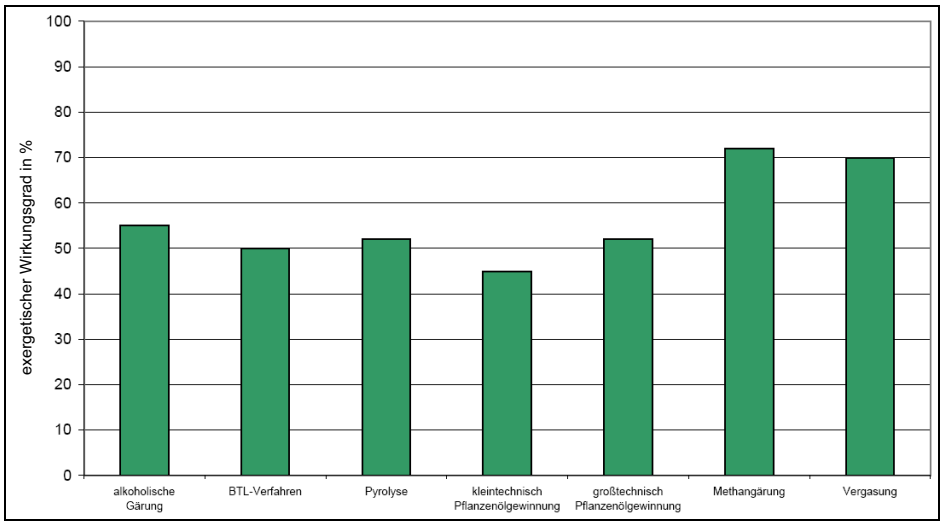

Abbildung 3
Exergetische Wirkungsgrade verschiedener Umwandlungsverfahren (Hebecker et al. 2006)

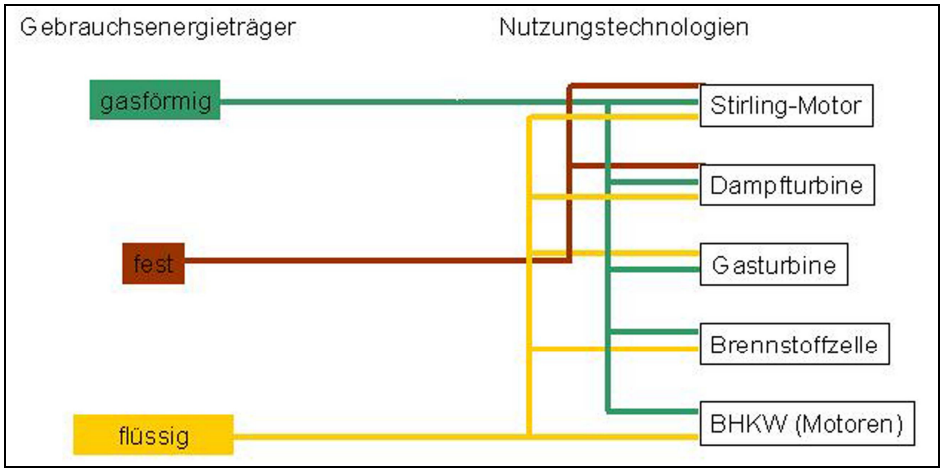

Abbildung 4
Struktur der Gebrauchsenergiebereitstellung (Hebecker et al. 2006)

Der Einsatz als Kraftstoff ist dabei einbezogen und der Verwendung in einem Blockheizwerk gleichgesetzt. Die exergetischen Wirkungsgrade der entsprechenden Umwandlungsprozesse sind in Abbildung 5 dargestellt.
Besonders schlecht schneidet der reine Heizkessel ab, da bei dieser Technologie eine große Abwertung der Energie erfolgt mit der Bereitstellung der Heizwärme bei etwa 20 °C. Im Vergleich zur 1. Stufe der Umwandlung liegen alle Werte der exergeti-

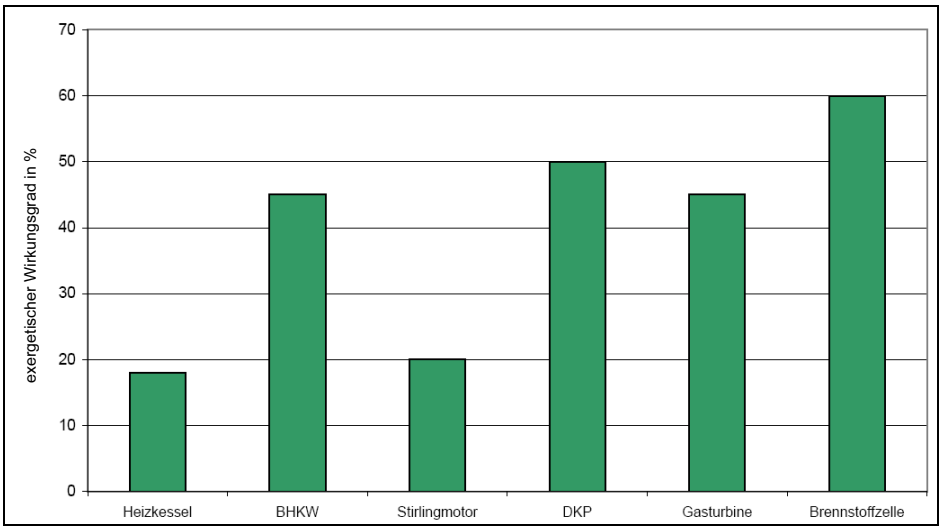

Abbildung 5
Exergetische Wirkungsgrade der Bereitstellung von Nutzenergie (Hebecker et al. 2006)

schen Wirkungsgrade bei dieser Umwandlung niedriger, da hierbei Arbeit aus Wärme erzeugt wird. Diese Umwandlung unterliegt bekanntlich den Carnotgrenzen. Dass die Werte trotzdem an die 50 %-Grenze heranreichen, liegt an der gleichzeitigen Bereitstellung von Wärme, also an der Realisierung der Kraft-Wärme-Kopplung, die für die lokale Energieversorgung aus vielerlei Gründen sinnvoll erscheint. Die reine Verbrennung der Kraftstoffe in Motoren reduziert den angegebenen Wert des BHKW um die Hälfte bis zu einem Drittel. Der Vollständigkeit halber ist der Stirlingmotor in die Betrachtung einbezogen, da er verschiedentlich aus technologischen Gründen in dem vorliegenden Zusammenhang vorgeschlagen wurde. Der damit erreichte Wert des exergetischen Wirkungsgrades ist relativ gering und liegt in der Größenordnung der reinen Motorenverbrennung. Von besonderer Bedeutung ist natürlich die Brennstoffzelle. Mit ihr erreicht man einen Höchstwert des exergetischen Wirkungsgrades. Allerdings ist sie zur Zeit noch nicht in Gänze marktreif und stellt besondere Anforderungen an die vorgeschalteten technologischen Prozesse.
Aus diesen Einzeluntersuchungen ergeben sich dann die in Abbildung 6 dargestellten Gesamtergebnisse für den exergetischen Wirkungsgrad der Bereitstellung von Nutzenergien aus Bioenergieträgern.
Der technologische Vorteil des Heizkessels besteht darin, dass in ihm auch feste Bioenergieträger zum Einsatz kommen können. Die Ergebnisse lassen sich nach den vorhergehenden Diskussionen im einzelnen nachvollziehen. In der Gesamtschau erscheint wesentlich, dass die exergetische Güte bei der Bereitstellung von gasförmigen Gebrauchsenergienträgern prinzipiell höher ist im Vergleich zu den flüssigen.

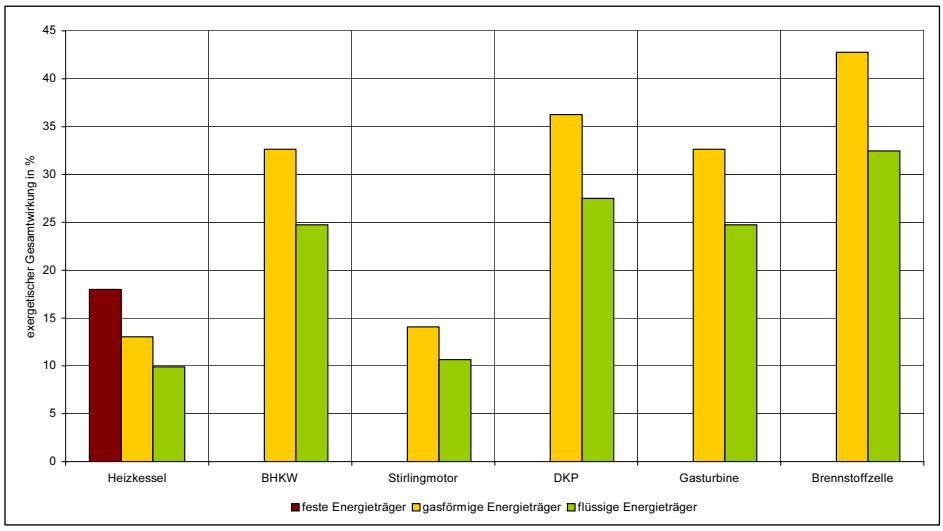

Abbildung 6
Exergetische Gesamtwirkungsgrade der Bereitstellung von Nutzenergien aus Biomasse (Hebecker et al. 2006)

Diese Erkenntnis ist für die Weiterentwicklung der Bioenergieumwandlung von grundsätzlicher Bedeutung. Bisher wurde zu ausschließlich, im wesentlichen aus wirtschaftlichen Gründen, die Erzeugung von flüssigen Energieträgern – eben Kraftstoffe – als Substitute von Erdölimporten in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. Wenn der Gesichtspunkt der lokalen Energieversorgung im ländlichen Raum stärker einbezogen wird, ist die Erzeugung gasförmiger Gebrauchsenergieträger aus technischer Sicht günstiger. Und die technische Sicht sollte für strategische Entscheidungen letztendlich eine Leitlinie darstellen.

5 Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse ist eine Versuchsanlage entworfen worden, mit der seit einigen Jahren Betriebsergebnisse gesammelt werden konnten. Sie besteht aus einem Vergasungsreaktor, in dem die unterschiedlichsten Bioprodukte zum Einsatz gekommen sind, aus einem Blockheizkraftwerk mit Wärmeauskopplung und einer Kälteerzeugung. Auf diese Weise können das Zusammenspiel der Untersysteme studiert und die theoretischen Ergebnisse experimentell verifiziert werden. Insofern stellt die Versuchsanlage gleichzeitig eine Referenzanlage dar. Da von dem Hintergrund einer dezentralen Energieversorgungsanlage ausgegangen wurde, ist bewusst nicht nur die Wärmebereitstellung, sondern auch die von Kälte in die

Betrachtung einbezogen worden. Nach den Überlegungen zu den Transporteigenschaften der verschiedenen Energieformen erfordert die Kälteerzeugung und -verteilung gleichfalls dezentrale Lösungen. Wenn sie darüber hinaus mittels Absorptionsprozessen erzeugt wird, ist so auch für die Sommerperiode ein kontinuierlicher Wärmeverbrauch gegeben.

Noch weitergehende Vorstellung sind von H. Spindler in der Fördergemeinschaft Ökologische Stoffverwertung e. V. (FÖST-Halle) (Spindler 2006) entwickelt worden. Neben ein Energieversorgungssystem, wie es eben vorgestellt wurde, sollte im stofflichen und energetischen Verbund eine Bioethanol- und eine Biodieselanlage sowie eine Biogasanlage angeordnet werden. Das könnte zum Beispiel dadurch zu Synergieeffekten führen, indem die Biogasanlage und vielleicht auch die Vergasungseinrichtungen Rückstände der Ethanol- und Dieselproduktion aufarbeiten und der Energieverbrauch der Destillationsanlagen von der Wärmebereitstellung aus dem eigentlichen Kraftwerkskomplex gedeckt wird. Das vorliegende Konzept könnte so als eine Mini-Bioraffinerie bezeichnet werden. Die erforderliche Komplexität der Gesamtanlage würde in jeder Hinsicht eine hohe Flexibilität sichern. Das gilt sowohl für die einzusetzenden Biomassen, die keine reinen Monokulturen erforderten, und natürlich für die Anpassung an die unterschiedlichen energetischen Bedürfnisse. Darüber hinaus wird deutlich, dass durch entsprechende Nachfolgetechnologien eine Art Düngemittelproduktion angeschlossen werden könnte. Für eine abgerüstete Variante bei Beibehaltung der Grundstruktur – Ethanol- und Dieselanlage sowie Biogas- und Vergasungsanlage – ist rein rechnerisch ein möglicher wirtschaftlicher Betrieb aufgezeigt worden.

Soweit zwei erste beispielhafte Konzepte. Zusammenfassend soll nochmals betont werden, dass sich bei vielen Problemen, insbesondere aus energiewirtschaftlichen Erfahrungen heraus, als jeweils optimale Lösungen stets ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Varianten ergeben hat. Insofern erscheint die ausschließliche Orientierung der Biomassenutzung auf die Erzeugung flüssiger Gebrauchsenergieträger als Kraftstoffe, wie sie derzeit in der Literatur häufig allein vertreten wird, eine Einengung, die zur unvollständigen Ausschöpfung der möglichen positiven Eigenschaften der Biomasse führt. Damit werden mögliche Reserven für eine rationelle und effiziente Gestaltung der gesamten Energieversorgung verschenkt. Als Ergebnis der vorliegenden Zahlenabschätzung für die mögliche Entwicklung der Bioenergienutzung könnte deshalb die folgende Grundstruktur vorgeschlagen werden:

Neben der Absicherung der Ernährung könnten die darüber hinaus möglichen Kapazitäten der Bioproduktion über die dezentrale Erzeugung von Gebrauchsenergie für die Bereitstellung flüssiger Energieträger, vordergründig als Kraftstoffe, und zum Beispiel über gasförmige Energieträger für die Absicherung der dezentralen Energieversorgung eingesetzt werden. Damit wäre eine nahezu autarke Energieversorgung

des ländlichen Raumes zu erreichen und darüber hinaus noch ein erheblicher Export flüssiger Energieträger möglich. Auf diese Weise könnten in technischer Hinsicht aber sicher auch für volkswirtschaftliche Dimensionen sinnvolle Lösungen angestrebt werden.

Da wir uns im vorliegenden Beitrag auf die quantitative Diskussion naturwissenschaftlicher und technischer Kategorien beschränkt haben, können wir als Leitmotiv über alle diese Überlegungen und Diskussionen den energetischen Imperativ von Wilhelm Ostwald stellen:

Vergeude keine Energie, verwerte sie!

Literatur

Fratzscher, W. & K. Stephan (Hg.) (2000): Abfallenergieverwertung – Ein Beitrag zur Entropiewirtschaft, Braunschweig, Wiesbaden.

Fratzscher, W. et al. (1986): Exergie – Theorie und Anwendungen, Leipzig.

Hebecker, D. et al. (2005): Hierarchically structured exergetic and exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion processes. In: Energy 46, S. 1247–1266.

Hebecker, D., Purr, I. & K. Purr (2006): Konversions-, Speicher- und Versorgungstechnologien für die energetische Biomassenutzung. Materialien der IAG Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften 8, Berlin.

Heinloth, K. (1997): Die Energiefrage, Braunschweig, Wiesbaden.

Kaltschmitt, M. (2004): Energetische Nutzung von Biomasse. Technik, Potentiale, Kosten, Umweltaspekte. In: Energie, Nova Acta Leopoldina 339, Bd. 91, S. 305–329

Leder, W. (1930): Kraft und Wärme in der Landwirtschaft und in landwirtschaftlich-industriellen Betrieben. Band IX der Sammlung „Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen“, Dresden, Leipzig .

Spindler, H. (2006): Bericht „Mini-Bioraffinerie“, Fördergemeinschaft Ökologische Stoffverwertung e. V., Halle/Saale.