



WBGU

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

materialien

**Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Dr. Dieter Merten,
Nicolle Fröhlich, Moritz Nill:**

Energiegewinnung aus Biomasse

**Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003
"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"**

Berlin, Heidelberg 2003

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003

"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"

Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

ISBN 3-540-40160-1

Verfügbar als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html

Autoren: Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Dr. oec. Dipl.-Ing. Dieter Merten, Dipl.-Ing. Nicole Fröhlich
und Dipl.-Phys. Moritz Nill

Titel: Energiegewinnung aus Biomasse

Leipzig: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, 2002

Veröffentlicht als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_ex04.pdf

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62, 8. OG.
10785 Berlin

Telefon (030) 263948 0
Fax (030) 263948 50
E-Mail wbgu@wbgu.de
Internet <http://www.wbgu.de>

Alle WBGU-Gutachten können von der Internetwebsite <http://www.wbgu.de> in deutscher und englischer Sprache herunter geladen werden.

© 2003, **WBGU**

Expertise

Energiegewinnung aus Biomasse



Auftraggeber: Alfred – Wegener – Institut für Polar- und Meeresforschung

Auftragnehmer: Institut für Energetik und Umwelt
gemeinnützige GmbH

Geschäftsbereich: Energie und Ökologie

Leiter: Dr. oec., Dipl. – Ing. Dieter Merten

Verantwortliche Bearbeiter:

Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Dipl.- Wirt.- Ing. Nicolle Fröhlich

Dipl.-Phys. Moritz Nill

Leipzig, den 22.08.2002



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	10
I Potenziale	11
1 Definitionen	11
2 Biomasse in Deutschland	13
2.1 Halmgutartige Biomasse, Rückstände und Nebenprodukte	13
2.1.1 Stroh	13
2.1.2 Landschaftspflegematerial	14
2.1.3 Gesamtes Potenzial an halmgutartiger Biomasse, Rückständen und Nebenprodukten	17
2.2 Holzartige Biomasse	17
2.2.1 Rückstände aus dem Bestand	17
2.2.2 Rückstände aus Weiterverarbeitung	21
2.2.3 Rückstände nach der Endnutzung	23
2.2.4 Gesamtes Potenzial an holzartiger Biomasse	23
2.3 Biogassubstrate	24
2.3.1 Exkrementen aus der Landwirtschaft	24
2.3.2 Ernterückstände aus der Landwirtschaft	25
2.3.3 Abfälle aus Gewerbe und Industrie	28
2.3.4 Landschaftspflegematerial	29
2.3.5 Organische Siedlungsabfälle	30
2.3.6 Gesamtes Potenzial	31
2.4 Klärgas	31
2.5 Deponiegas	32
2.6 Energiepflanzen	33
2.6.1 Pflanzenölgewinnung	33
2.6.2 Festbrennstoffgewinnung	34
2.6.3 Biogasgewinnung	34
2.6.4 Gesamtes Potenzial bei Energiepflanzenanbau	35
2.7 Zusammenfassung	36
3 Biomasse in Europa	38
3.1 Gesamtbetrachtung der Europäischen Union	38
3.2 Verteilung der Biomassepotenziale auf die einzelnen Länder der EU	40
4 Biomasse in den Schwellenländern Indien und Brasilien	43
4.1 Biomasse in Indien	43
4.2 Biomasse in Brasilien	44
5 Globale Abschätzung	46



II	Darstellung und Bewertung von Konversionstechnologien (Einzelverfahren und deren Nutzbarkeit) sowie deren Energie- und Emissionsbilanzen	50
1	Möglichkeiten der Energiewandlung von Biomasse	51
1.1	Bioenergieträger	53
1.2	Bereitstellung von Bioenergieträgern	54
2	Stand der Biomassenutzung im Energiesystem	56
3	Einsatzfelder und Anwendungsformen	57
3.1	Kleine Biomasseanlagen zur Wärmeversorgung	58
3.2	Nahwärmesysteme	60
3.3	Heizkraftwerke	62
3.4	Biogas-Blockheizkraftwerke	64
4	Energie- und Emissions-Bilanzen	66
4.1	Kleine Biomasseanlagen zur Wärmeversorgung	66
4.2	Nahwärmesysteme	70
4.3	Heizkraftwerke	76
4.4	Biogas-Blockheizkraftwerke	79
5	Sinnvolle Machbarkeiten und Nutzungsformen	82
5.1	Analyse der Systemtechnik	82
5.2	Analyse der Potenziale und deren Nutzung	92
III	Bewertung der energiewirtschaftlichen Nutzung von Biomasse	100
1	Umwelteffekte bei der Bereitstellung und Verwertung nachwachsender Rohstoffe	100
1.1	Biomasse- Brennstoffe	100
1.1.1	Rohstoffproduktion (Anbau)	100
1.1.2	Nachernteverfahren	109
1.1.3	Energetische Umwandlung (Festbrennstoffe)	113
1.1.4	Biogaserzeugung und -nutzung	121
2	Konkurrierende Interessenlagen bei der Nutzung von Biomasse	125
3	Ökonomischer und ökologischer Vergleich von energiewirtschaftlichen Nutzungsoptionen.....	130
3.1	Analyse ökonomischer Größen	130
3.2	Analyse ökologischer Größen	131
3.3	Zusammenfassung	133
4	Möglichkeiten und Grenzen der Biomassenutzung	137



Tabellenverzeichnis

Tabelle I-1:	Technisches Potenzial von Stroh auf der Basis des Jahres 2000 (/1/, /2/)	14
Tabelle I-2:	Technisches Potenzial an Landschaftspflegematerial (/1/,/2/).....	16
Tabelle I-3:	Technisches Potenzial halmgutartiger Biomassen in Deutschland (/1/, /2/)	17
Tabelle I-4:	Technisches Potenzial von Waldrest- und Schwachholz nach Baumartengruppen bei 8 cm Aufarbeitungsgrenze [24].....	20
Tabelle I-5:	Technische Potenziale von Landschaftspflegegehölzen (/1/, /2/).....	21
Tabelle I-6:	Technische Potenziale von Industrierestholz aus der Weiterverarbeitung (/1/, /2/)	22
Tabelle I-7:	Zusammenfassung der technischen Potenziale aus holzartiger Biomasse (/1/, /2/)	23
Tabelle I-8:	Technische Potenziale aus Exkrementen der Landwirtschaft (/1/, /12/).....	25
Tabelle I-9:	Technische Potenziale der (Ernte)rückstände der Landwirtschaft (/1/, /12/)	27
Tabelle I-10:	Technische Potenziale von Abfällen aus Gewerbe und Industrie (Daten aus /1/, /12/)	29
Tabelle I-11:	Technische Potenziale des Landschaftspflegematerials (Daten aus /1/, /12/).....	30
Tabelle I-12:	Zusammenfassung der Biogaspotenziale in Deutschland (Daten aus /1/, /12/) (gerundete Werte).....	31
Tabelle I-13:	Technisches Potenzial Klärgas (/1/, /12/)	32
Tabelle I-14:	Energieträgerpotenziale bei Anbau verschiedener Energiepflanzen auf 2 Mio. ha zur Festbrennstoffgewinnung (/1/, /2/)	34
Tabelle I-15:	Technisches Potenzial der Energiepflanzen auf der Basis eines Anbaumixes auf 2 Mio. ha (/1/, /2/)	35
Tabelle I-16:	Zusammenfassung der technischen Potenziale biogener Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (Daten aus /1/, /2/)	37
Tabelle I-17:	Biomassepotenziale in Europa (Eigene Berechnungen; Statistische Daten aus /5/ und /6/).....	39



Tabelle I-18:	Technische Biomassepotenziale 2000/2001 in der Europäischen Union (Eigene Berechnungen; Statistische Daten aus /5/ und /6/)	41
Tabelle I-19:	Biomassepotenziale in Indien (Daten aus /4, /7, /8/)	43
Tabelle I-20:	Biomassepotenziale in Brasilien (Daten aus /4/, /10/)	45
Tabelle I-21:	Weltweite technisch nutzbare Potenziale biogener Festbrennstoffe (Daten aus /4/)	48
Tabelle I-22:	Technische Potentiale der Biomasse der Welt /2/	48
Tabelle II-1	Technische Aspekte der Biomassenutzung für die einzelnen Anwendungsfelder	58
Tabelle II-2	Kenndaten der untersuchten Kleinanlagen für eine Wärmebereitstellung aus Holzpellets, Scheitholz und Waldhackgut	59
Tabelle II-3	Kenndaten der untersuchten Biomassenahwärmesysteme	61
Tabelle II-4	Kenndaten der untersuchten Biomasseheizkraftwerke	63
Tabelle II-5	Technische Kenngrößen der landwirtschaftlichen Biogasreferenzanlagen	65
Tabelle II-6	Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmebereitstellung für Warmwasser und Raumheizung aus Holzpellets, Waldhackgut und Scheitholz in Kleinanlagen (Zahlen gerundet)	67
Tabelle II-7	Energie- und Emissionsbilanzen einer Bereitstellung von Holzpellets, Waldhackgut und Scheitholz frei Verbraucher (Zahlen gerundet)	68
Tabelle II-8	Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmeerzeugung in Heizwerken aus Hackgut sowie Wärmeverteilung mit Nahwärmenetzen (Zahlen gerundet)	70
Tabelle II-9	Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmeerzeugung aus Waldhackgut und Heizöl Leicht (NW-II-HG/HL) sowie Wärmeverteilung mit Nahwärmenetzen (Zahlen gerundet)	73
Tabelle II-10	Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmeerzeugung aus Stroh und Heizöl Leicht (NW-II) sowie Wärmeverteilung mit Nahwärmenetzen (Zahlen gerundet)	75
Tabelle II-11	Energie- und Emissionsbilanzen einer Stromerzeugung aus Waldhackgut (HKW NW-II) sowie Industriehackgut und Rinde (HG/R-KW; Zahlen gerundet)	77



Tabelle II-12	Energie- und Emissionsbilanzen einer landwirtschaftlichen Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas (Zahlen gerundet).....	80
Tabelle II-13	Potenziale und Nutzung von Biomasse zur Stromerzeugung; Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas genutzt werden kann oder die vorhandene Fläche nur einmal (z. B. zur Produktion von Festbrennstoffen, Flüssigenergieträgern oder Biogas) genutzt werden kann (verschiedene Quellen, eigene Berechnungen)	92
Tabelle II-14	Potenziale und Nutzung von Biomasse zur Wärmebereitstellung; Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas genutzt werden kann oder die vorhandene Fläche nur einmal genutzt werden kann (verschiedene Quellen, eigene Berechnungen).....	93
Tabelle II-15	Potenziale und Nutzung von Biomasse zur Kraftbereitstellung; Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas genutzt werden kann oder die vorhandene Fläche nur einmal genutzt werden kann (verschiedene Quellen, eigene Berechnungen).....	95



Abbildungsverzeichnis

Abb. I-1:	Verteilung des Primärenergieverbrauches an fossil biogenen, fossil mineralischen Primärenergieträgern, Wasserkraft und Biomasse	46
Abb. I-2:	Anteil der Energieträger am Primärenergieverbrauch	47
Abb. II-1:	End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse (gestrichelte Umrandung: Energieträger; durchgezogene Umrandung: Umwandlungsprozess; PME = Pflanzenölmethylester; nach /Kaltschmitt und Hartmann 2000/)	52
Abb. II-2:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Abriss.....	68
Abb. II-3:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen (links) und NO _x -Emissionen (rechts) einer Wärmebereitstellung mittels Pelletfeuerung für das Referenzsystem EFH-II (9 kW Feuerungsleistung)	69
Abb. II-4:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Abriss der in Tabelle 8 dargestellten Bilanzergebnisse (HG Hackgut).....	72
Abb. II-5:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen (links) und NO _x -Emissionen (rechts) einer Wärmebereitstellung aus Hackgut für das Referenzsystem NW-I, EFH-II (8 kW Anschlussleistung)	73
Abb. II-6:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen einer Wärmebereitstellung aus Hackgut und Heizöl Leicht (links) sowie Stroh und Heizöl Leicht (rechts) für die Referenzsysteme NW-II-HG/HL bzw. NW-II-Stroh/HL (jeweils Versorgungsaufgabe EFH-II mit 8 kW Anschlussleistung, HG Hackgut, HL Heizöl Leicht).....	75
Abb. II-7:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen einer Bereitstellung elektrischer Energie durch die in Tabelle definierten Referenzanlagen HKW NW-II (rechts) und HG/R-KW ₁₀₀ (links; HG Hackgut, HL Heizöl Leicht).....	78
Abb. II-8:	Aufteilung der CO ₂ -Äquivalent-Emissionen (links) und NO _x -Emissionen (rechts) einer Bereitstellung elektrischer Energie aus Biogas durch das Referenzsystem Co-Ferm 50 GVE (ohne Nutzung der Heizwärme).....	81
Abb. II-9:	(Heiz-)Kraftwerke auf der Basis biogener Festbrennstoffe einschließlich der derzeit geplanten Anlagen	97



Abb. II-10:	Biogasanlagenbestand einschließlich der derzeit absehbaren Entwicklung	99
Abb. III-1:	Kostenrelationen und Kostentendenzen einer Strom-, Wärme- und/oder Kraftbereitstellung aus Biomasse	131
Abb. III-2:	Vergleich ausgewählter Umwelteffekte einer Strom-, Wärme- und/oder Kraftbereitstellung aus Biomasse	132
Abb. III-3:	Qualitativer Vergleich der untersuchten Optionen einer Strom-, Wärme- und/oder Kraftbereitstellung aus Biomasse	134



Einleitung

Im Rahmen internationaler Klimaschutzbemühungen wird Biomasse oft als ein Hoffnungsträger im Hinblick auf die angestrebte Reduktion der anthropogenen CO₂ - Emissionen angesehen. U. a. auch deshalb unterstützt die Europäische Kommission eine verstärkte Nutzung nachwachsender holz- als auch halmgutartiger Energieträger.

Im Folgenden **ersten Teil** dieser Analyse wird eine Flächen- und Mengenverfügbarkeitsanalyse organischer Masse aus der Forstwirtschaft, aus Energiepflanzen, aus Nebenprodukten, aus Abfällen, aus Rückständen der Land- und Forstwirtschaft und der holzbe- und verarbeitenden Industrie, der Lebensmittelindustrie, aus organischen Siedlungsabfällen und sonstigen Quellen durchgeführt. Ausgehend davon werden die vorhandenen technischen Potenziale und der damit maximal mögliche Beitrag zur Deckung der Energienachfrage aus Biomasse im Energiesystem von Deutschland, Europa und der Schwellenländer Indien und Brasilien diskutiert. Abschließend erfolgt eine globale Abschätzung der vorhandenen Biomassepotenziale.

Im **zweiten Teil** der Expertise werden die bestehenden Möglichkeiten der Energieumwandlung von Biomasse zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung charakterisiert sowie die wichtigsten Konversionstechnologien ausführlich behandelt und bewertet.

Die Auseinandersetzung mit sinnvollen Machbarkeiten und Nutzungsformen schließt den zweiten Teil ab.

Der **Teil Drei** der Expertise beinhaltet die Bewertung einer energiewirtschaftlichen Nutzung von Biomasse.

An Hand ausgewählter Kriterien werden die Umwelteffekte von der Bereitstellung über Transport/Lagerung/Aufbereitung bis hin zur energetischen Umsetzung diskutiert. Konkurrierende Interessenlagen sowie die Bewertung der generellen Nutzungsoption aus ökonomischer und ökologischer Sicht schließt sich an.

Die Expertise endet mit einer Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen der Biomassenutzung.



I Potenziale

1 Definitionen

Die Möglichkeiten einer energetischen Biomassenutzung werden im Wesentlichen durch die verfügbaren Potenziale bestimmt. Deshalb werden nachfolgend zunächst die wesentlichen Potenzialbegriffe definiert. Dabei wird zwischen den theoretischen, den technischen, den wirtschaftlichen und den erschließbaren Potenzialen unterschieden /2/.

Theoretisches Potenzial. Das theoretische Potenzial beschreibt das in einer gegebenen Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot aus regenerativen Energien und stellt damit die Obergrenze des theoretisch realisierbaren Beitrages zur Energiebereitstellung dar. In der Praxis ist das theoretische Potenzial nicht von Relevanz, da einer praktischen Nutzbarmachung unüberwindbare technische, ökologische, strukturelle und administrative Schranken entgegen stehen.

Technisches Potenzial. Das technische Potenzial bezeichnet den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen sowie strukturellen und ökologischen Restriktionen und gesetzlichen Vorgaben nutzbar ist. Es beschreibt damit den zeit- und ortsabhängigen, technisch möglichen Beitrag zur Nutzung regenerativer Energien und ist geringen zeitlichen Schwankungen unterworfen.

Wirtschaftliches Potenzial. Das wirtschaftliche Potenzial ist der zeit- und ortsabhängige Anteil des technischen Potenzials, der im jeweils betrachteten Energiesystem wirtschaftlich erschlossen werden kann.

Erschließbares Potenzial. Das erschließbare Potenzial ist der Anteil des wirtschaftlichen Potenzials, der unter realen Bedingungen erschlossen werden kann. Es ist meist kleiner als das wirtschaftliche Potenzial.

Dabei können im Folgenden ausschließlich die technischen Potenziale der Biomasse diskutiert werden.

Auf Grund unsicherer Datenlage können nur grobe Größenordnungen der tatsächlich vorhandenen Potenziale abgegeben werden. Auch können nur die wesentlichen Biomassefraktionen analysiert werden, da auf Grund der Vielzahl unterschiedlicher



Biomasseströme und nur vereinzelt vorhandener belastbarer Daten eine vollständige Erhebung bisher nicht möglich ist.

Bei den Analysen der technischen Potenziale und der gegenwärtigen Nutzung wird bei der Biomasse unterschieden zwischen Holz und Halmgütern einerseits und Energiepflanzen andererseits. Dabei werden zunächst die Potenziale betrachtet, die sich aus der energetischen Nutzung von Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen ergeben. Unterschieden wird hier zwischen festen und gasförmigen Bioenergieträgern. Unter festen Energieträgern werden Industrierestholz, Altholz, Waldholz sowie Rückstände aus der Landwirtschaft subsummiert, die vorzugsweise im Rahmen von Verbrennungstechnologien zur Wärme- und/oder Strombereitstellung eingesetzt werden können. Unter gasförmigen Bioenergieträgern werden sämtliche Substrate erfasst, die primär zur Gewinnung von Biogas Verwendung finden können.



2 Biomasse in Deutschland

Im Kapitel 2.1 wird für Deutschland eine detaillierte Betrachtung durch die Analyse folgender Sortimente durchgeführt:

- Halmgutartige Biomasse, Rückstände und Nebenprodukte (Stroh- und Landschaftspflegematerial),
- Holzartige Biomasse (Waldrestholz, Schwachholz, Altholz, Industrierestholz, Landschaftspflegehölzer),
- Biogassubstrate (Exkrement und Ernterückstände aus der Landwirtschaft, Abfälle aus Gewerbe und Industrie), Landschaftspflegematerial, organische Siedlungsabfälle),
- Klärgas,
- Deponiegas und
- Energiepflanzen.

2.1 Halmgutartige Biomasse, Rückstände und Nebenprodukte

Zu halmgutartiger Biomasse zählen u. a. Stroh, Landschaftspflegematerial und Straßengrasschnitt.

2.1.1 Stroh

Strohliefernde Kulturarten wie Getreide, Mais und Ölsaaten, werden in Deutschland leicht schwankend auf 7,7 – 8,1 Mio. ha angebaut (im Jahr 2000 etwa 8,1 Mio. ha).

Eine energetische Nutzung des anfallenden Strohs erfolgt gegenwärtig nur in geringem Umfang.

Unter Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsanforderungen, wie Erhaltung des Nährstoffkreislaufs des Bodens, Einstreubedarf bei der Tierhaltung, Gärtnereibedarf etc. lassen sich für eine energetische Nutzung im Durchschnitt etwa 20 % des Gesamtstrohaufkommens als technisches Potenzial ableiten.



Tabelle I-1 vermittelt, ausgehend von den Kornerträgen des Jahres 2000 sowie dem mittleren Korn:Stroh-Verhältnis der berücksichtigten Kulturarten (bei Getreidestroh gewichtet) eine Übersicht zu den technischen Potenzialen.

Tabelle I-1: Technisches Potenzial von Stroh auf der Basis des Jahres 2000 (1/, /2/)

Strohart	Anbau- fläche	Kornertrag	Korn: Stroh- Verhältnis	Energetisch nutzbares Stroh ²⁾	Heizwert	Technisches Energieträger- potenzial
	Mio. ha	kt/a		kt/a	MJ/kg	PJ/a
Getreidestroh	6,65	41950	1:0,9	7600	14,4 ³⁾	108,8
Maisstroh	0,36	3325	1:1,5	500	7,0 ³⁾	3,5
Ölsaatenstroh	1,08	3585	1:1,7	1200	14,0	17,0
Sonstiger Strohanfall ¹⁾	0,02	62	1:2,0	38	14,0	0,5
Summe Stroh	8,1			ca. 9300	14,0⁴⁾	ca. 130

1) vor allem Ackerbohnen

2) Ansatz: Bei Getreide- und Ölsaatenstroh 20 %, bei Maisstroh 10 % und bei Sonstigem 30 % des Gesamtaufkommens

3) Mittelwert aller Getreidestrohartarten bei Feuchtegehalt von 15 %, bei Maisstroh 50 %

4) Mittelwert aller angegebenen Strohartarten bei Feuchtegehalt von 15 %

2.1.2 Landschaftspflegematerial

Unter dem Begriff Landschaftspflegematerial werden die organischen Rückstände aus der Landschaftspflege und der Pflege von öffentlichen Grünflächen zusammengefasst. Es handelt sich dabei um Pflegeabfälle von öffentlichen Parkanlagen und Sportplätzen, Friedhöfen, Straßenrändern sowie den eigentlichen Landschaftspflegeflächen (Flächen, die aus Landschafts- und Umweltschutzgründen gepflegt werden).

Bei einer möglichen Nutzung der anfallenden Pflegeabfälle ist generell abzuwägen, ob die sich dabei ergebenden Potenziale eher aerob (Kompostierung), anaerob (Vergärung), thermisch (Verbrennung) oder stofflich anderweitig verwertet werden.

Die Ermittlung des anfallenden organischen Materials bei der Landschaftspflege erfolgt auf der Basis der in Anspruch genommenen Flächen/Straßenlängen und den mittleren spezifischen Kennzahlen des Biomasseaufkommens.



Von dem ermittelten Gesamtaufkommen wird unterstellt, dass nur etwa 1/3 bis 2/3 als Potenzial für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen (bei den eigentlichen Landschaftspflegeflächen nur 25 - 50 %).

Öffentliche Grün- und Sportanlagen

Nach Angaben des Statistischen Jahrbuches der Bundesrepublik werden in Deutschland etwa 110 000 ha als städtische Grünanlagen sowie Sport- und Freizeitanlagen genutzt. Bei einem durchschnittlichen spezifischen Anfall von etwa 5 t / (ha·a) organischem Abfall könnte für die energetische Nutzung ein Potenzial von etwa 0,2 – 0,4 Mio. t/a zur Verfügung stehen.

Friedhofspflege

Etwa 33 500 ha werden in Deutschland als Friedhofsfläche genutzt. Nach [12/ ist von einem Abfallaufkommen auf Friedhöfen von etwa 2,7 kg / (EW·a) auszugehen. Aus den sich daraus ableitenden organischen Abfällen lässt sich für die energetische Nutzung ein Potenzial von etwa 0,07 – 0,15 Mio. t/a ableiten.

Straßenrandpflege

Das Statistische Jahrbuch weist ein Straßennetz in Deutschland von etwa 231 000 km Länge aus. Davon sind etwa 5 % Bundesautobahnen, 14 % Bundesstraßen, 58 % Land- und Kreisstraßen sowie 23 % Ortsdurchfahrten.

Auf der Basis eines durchschnittlichen Aufkommens an organischem Abfall bei der Straßenrandpflege von 3 – 5 t / (km·a) (je nach Straßenart) lässt sich ein energetisch nutzbares Potenzial von etwa 0,2 – 0,4 Mio. t/a ableiten.



Landschaftspflegeflächen

Aus ökonomischen Gründen werden in Deutschland viele ehemalige landwirtschaftliche Nutzflächen kommerziell nicht mehr genutzt (Wiesen in Mittelgebirgslagen, Nutzflächen mit hohem Grundwasserstand etc.). Aus Gründen des Landschafts- und Umweltschutzes werden diese Flächen jedoch nach wie vor, mit Unterstützung der öffentlichen Hand, in dem Zustand gehalten, in dem sie sich jeweils befinden bzw. sich entsprechend naturschutzfachlichen Vorgaben befinden sollten.

Verlässliche Angaben über die der Pflegenutzung unterliegenden Flächen liegen nicht vor. Ebenso liegen Angaben über anfallende Mengen beim Grasschnitt nicht vor, die als Teil der insgesamt anfallenden Biomasse (einschließlich holzartiger Biomasse) nutzbar wären.

In /12/ werden die aus ökonomischen Gründen ungenutzten Flächen in Deutschland, die der Pflegenutzung unterliegen, mit etwa 400.000 ha eingeschätzt. Unter Berücksichtigung klimatischer und bodenökologischer Aspekte wird von einem spezifischen Biomasseaufkommen von knapp 3,5 t/(ha·a) ausgegangen.

Damit ergibt sich ein Aufkommen an pflanzlichen Rückständen von etwa 1,4 Mio. t/a, von denen etwa 0,35 – 0,70 Mio. t/a potenziell für die Verbrennung bzw. Vergärung zur Verfügung stehen könnten /1/.

Tabelle I-2: Technisches Potenzial an Landschaftspflegematerial (/1/,/2/)

Anfallort	Fläche/Länge	spez. Anfall	Energetisch nutzbare Menge ¹⁾²⁾ Mio. t/a	Technisches Energieträgerpotenzial PJ/a
Öffentl. Grün-/Sportanlagen	110.000 ha	5 t/(ha·a)	0,2 – 0,4	2,4 – 4,8
Friedhofspflege	33.500 ha	2,7 kg/(Ew·a)	0,07 – 0,15	0,8 – 1,8
Straßenrandpflege	231.000 km	3 – 5 t/(km·a)	0,2 – 0,4	2,4 – 4,8
Landschaftspflegeflächen	400.000 ha	3,5 t/(ha·a)	0,35 – 0,7	4,2 – 8,4
Summe			ca. 0,8 – 1,6	9,8 – 19,8
Landschaftspflegematerial				

1) Heizwert von Landschaftspflegematerial $H_u = 12,0 \text{ MJ/kg}$ bei Feuchtegehalt von 15 %

2) Vom gesamten Anfall etwa 1/3 bis 2/3 energetisch nutzbar, bei Landschaftspflegeflächen etwa 25 – 50 %



2.1.3 Gesamtes Potenzial an halmgutartiger Biomasse, Rückständen und Nebenprodukten

Zusammenfassend ergeben sich für die halmgutartigen Biomassen, Rückstände und Nebenprodukte, unter der Prämisse der Verwendung der Biomasse als Festbrennstoff, die in Tabelle I-3 genannten technischen Potenziale.

Tabelle I-3: Technisches Potenzial halmgutartiger Biomassen in Deutschland (/1/, /2/)

	Nutzbare Menge Mio. t/a	Technisches Potenzial PJ/a
Stroh	9,3 ¹⁾	130
Landschaftspflegematerial	0,8 – 1,6 ²⁾	9,8 – 19,8
Summe halmgutartige Biomassen	ca. 10,0 – 11,0	ca. 140 – 150

¹⁾ Heizwert von Stroh (als gewichtetes Mittel der angesetzten Strohartens) mit einem Feuchtegehalt von 15 %: Hu=14,0 MJ/kg

²⁾ Heizwert von Landschaftspflegematerial mit einem Feuchtegehalt von 15 %: Hu= ca. 12,0 MJ/kg

2.2 Holzartige Biomasse

Holzartige Rückstände biogener Festbrennstoffe werden unterteilt in Rückstände aus dem Bestand, Rückstände aus der Weiterverarbeitung und aus der Endnutzung /3/. Die Ermittlung holzartiger Biomassefraktionen erfolgt u. a. auf der Basis vorhandener Waldflächen, den verfügbaren Einschlagszahlen sowie mittlerer, regional unterschiedlicher Holzzuwächse.

2.2.1 Rückstände aus dem Bestand

Insgesamt war innerhalb der Gebietsgrenzen Deutschlands im Jahr 2000 eine Fläche von ca. 10,7 Mio. ha bewaldet; davon sind rund 66 % mit Nadelwald und ca. 34 % mit Laubwald bedeckt. Die theoretisch nutzbare Menge an Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen, die in den Wäldern und bei deren Bewirtschaftung anfällt, ist dabei direkt abhängig von den vorhandenen und bewirtschafteten Waldflächen. Diese Gebiete sind innerhalb der Bundesrepublik Deutschland durch sehr große regionale Unterschiede gekennzeichnet.



In Deutschland gibt es, von wenigen Ausnahmen (z. B. Nationalpark Bayerischer Wald) abgesehen, praktisch keine naturbelassenen Wälder mehr. Vielmehr handelt es sich bei den Forsten (fast) ausschließlich um Kultur- und Nutzwald zur Erzeugung von Holz für die industrielle und damit stoffliche Verwendung /1/.

Während des Wachstums der Waldbäume, bei der Durchforstung und bei der Ernte des Stammholzes fällt Biomasse an. Dieses Biomasseaufkommen kann unterteilt werden in Biomasse, die aufgrund des natürlichen Wachstumsprozesses im ein- oder mehrjährigen Zyklus zur Verfügung steht, und in organische Stoffe, die bei der Durchforstung oder bei der Ernte des Stammholzes und damit beim eigentlichen Einschlag anfallen /1/.

Der Holzeinschlag lag in Deutschland in den letzten Jahren im Mittel bei etwa 38 Mio. m₃ (Statistisches Jahrbuch der BRD). Durch erhöhten Windbruch stieg er 1999/2000 auf knapp 50 Mio. m₃ an.

Jahr	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00
Holzeinschlag Mio. m ₃	28,3	34,6	34,0	37,0	38,2	39,0	37,6	49,0

Die holzartigen Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle unterteilen sich in periodische und anbau- und erntetechnisch bedingte Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle.

Die periodisch bedingten Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle beinhalten Blüten, Fruchtstände, Früchte und Schalen sowie Laub und Nadelmasse. Dieses Biomasseaufkommen ist energetisch kaum nutzbar und wird zur Erhaltung der Stoff- und Nährstoffkreisläufe benötigt /1/.

Anbau- und erntetechnisch bedingte Rückstände als direkte Folge der Waldbewirtschaftung sind Durchforstungsrückstände (z. B. Durchforstungsholz) und das bei der Stammholzernte anfallende Waldrestholz; beide Fraktionen können i. Allg. problemlos energetisch genutzt werden.



Schwachholz und Waldrestholz

Die Potenzialabschätzung umfasst sowohl Biomasse aus Schwachholz als auch Waldrestholz und basiert auf den Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft [24], der die aus unserer Sicht derzeit fundierteste und aktuellste Expertise zur Thematik Waldenergieholz darstellt.

Biomasse aus **Schwachholz** umfasst dabei das Schwachholz, das aus waldwirtschaftlichen Gründen eingeschlagen werden muss, aber gegenwärtig kaum stofflich genutzt wird. Es besteht i. Allg. aus der Masse des gesamten (dünnen) Stammes, den Ästen bzw. dem Reisig, der Rinde und im Falle einer vollmechanisierten Vollbaumnutzung mit Hilfe eines Hackschnitzel-Harvesters, auch den Nadeln bzw. den Blättern. Stöcke sind nicht enthalten.

Beim **Waldrestholz** handelt es sich um die bei der Stammholzernte verbleibenden erntetechnisch bedingten Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle; es umfasst u. a. das nicht aufgearbeitete Kronenderbholz mit Rinde sowie das Reisholz mit Rinde. Stöcke sind ebenfalls nicht enthalten.

Berücksichtigt werden nur die Flächen des Wirtschaftswaldes in Deutschland (d. h. ohne die Kernzonen der Nationalparks und der Biosphärenreservate). Auf diesen Flächen wird von einem jährlichen Zuwachs an Rohholz von 57,4 Mio. m₃ (entspricht etwa 28,7 Mio. t_{atro}) ausgegangen. Es wird unterstellt, dass bei einem Brusthöhendurchmesser (BHD) größer 16 cm eine stoffliche Verwertung erfolgt, darunter eine energetische [24]. Aus ökonomischen Gründen wird unterstellt, dass die untere Aufarbeitungsgrenze als Energieholz bei 8 cm liegt. Eine mögliche stoffliche Nutzung des Schwachholzes wird, da es dafür derzeit nur einen eingeschränkten Markt gibt, nicht unterstellt. Hier wird davon ausgegangen, dass das Schwachholz energetisch genutzt werden kann. Unter diesen Prämissen errechnen sich auf der Basis der Modellansätze aus [24] die in Tabelle I-4 dargestellten technischen Potenziale.



Tabelle I-4: Technisches Potenzial von Waldrest- und Schwachholz nach Baumartengruppen bei 8 cm Aufarbeitungsgrenze [24]

	Eiche	Buche	Fichte Tanne Douglasie in Mio. t _{atro}	Kiefer	Gesamt	Technisches Energieträger- potenzial in PJ/a
Schwachholz (> 8 cm)	0,35	1,49	3,16	2,00	7,00	130
Waldrestholz	0,59	3,17	4,09	1,75	9,60	178
Gesamt (> 8 cm)	0,93	4,66	7,25	3,75	16,60	308

^a mittlerer Heizwert der Baumarten 18,6 MJ/kg_{atro}

Zusätzlich zu diesem Schwachholz und dem Waldrestholz fällt auch vermarktbare Holz an. Es liegt in der Größenordnung von etwa 53 Mio. m₃/a. Von diesem Zuwachs an potenziell am Markt absetzbarem Holz werden derzeit aber im Mittel (d. h. Sturmereignisse und die daraus resultierenden Schwankungen auf den Märkten werden nicht berücksichtigt) nur etwa 38 Mio. m₃/a eingeschlagen und abgesetzt. Damit ergibt sich ein derzeit ungenutztes Potenzial an vermarktbarem Holz, das auch energetisch genutzt werden könnte, von etwa 15 Mio. m₃/a (entspricht etwa 7,5 Mio. t_{atro}/a = 140 PJ/a).

Landschaftspflegeholz

Landschaftspflegeholz beinhaltet das bei der Unterhaltung u. a. von Windschutzhecken, Ufergehölzen und Straßenrandhölzern anfallende Holz.

Die sich bei der Pflege ableitenden technischen Potenziale sind von Hartmann, H. u. a. in „Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht“ (Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 3, FNR 1995) eingeschätzt worden und zu insgesamt 4 PJ/a genannt.

Die Aufteilung wurde wie folgt vorgenommen:



Tabelle I-5: Technische Potenziale von Landschaftspflegegehölzen (/1/, /2/)

	Nutzbare Menge ¹⁾	Technisches Energieträgerpotenzial
	Mio. t/a	PJ/a
Verkehrswegerandgehölze	0,065	1
Gewässerrandgehölze	0,010	0,16
Windschutzhecken	0,195	3
gesamt	ca. 0,27	ca. 4

¹⁾ Ausgangsbasis der Einschätzung waren Frischmassen unterschiedlichen Feuchtegehaltes und die sich dabei ergebenden Energieinhalte. Hier wird die nutzbare Menge einheitlich bei einem Feuchtegehalt von 15 % auf $H_u = 15,5 \text{ MJ/kg}$ bezogen.

Ein zusätzliches energetisch nutzbares Biomasse-Aufkommen stammt auch aus den Rechenanlagen wasserbaulicher Einrichtungen (z. B. Wasserkraftwerke, Schleusen). Dieses sogenannte Schwemmholz stammt ebenfalls überwiegend aus naturbelassenem Landschaftsbewuchs. Aufgrund seiner Zusammensetzung ist es allerdings besser mit Altholz vergleichbar, da – je nach Gewässernutzung – eine Vielzahl von Fremdstoffen (z. B. Verpackungsmüll) an den Rechenanlage mit abgeschieden werden. Mengenabschätzungen zu diesem Biomasseaufkommen ergeben ein Potenzial von ca. $0,4 \text{ PJ/a /1/}$.

2.2.2 Rückstände aus Weiterverarbeitung

Unter Industrierestholz werden alle die Hölzer verstanden, die im Rahmen der Holzaufbereitung, der Produktion von Holzwerkstoffen und Holzprodukten sowie bei der Holzverarbeitung als Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle anfallen. Bedeutende Industrierestholzanfälle treten in der Sägewerksindustrie sowie in der Holzwerkstoffindustrie (insbesondere bei der Herstellung von Span-, MDF-, OSB-Platten) auf. Jedoch auch bei der Herstellung von Fertigprodukten aus Holz, in der Bauindustrie sowie bei der Herstellung von Möbeln und Holzverpackungen fallen in nicht unwesentlichem Maße Resthölzer an.

Nach /25/ liegt das Restholzaufkommen bezogen auf die Einschnittmenge in den Sägewerken bei etwa 8 Mio. m³. Es setzt sich zusammen aus Schwarten und Spreißel (ca. 35 %), Hackschnitzel und Säge-/Hobelspane (jeweils ca. 30 %) und Abschnitte/Stückholz (ca. 5 %). Bei einem Wassergehalt von 30 % und einem Heizwert von 12 MJ/kg ist das ein Energiepotenzial von ca. 65 PJ/a. Der größte Teil dieser Rückstände wird in der Papier- und



Zellstoffindustrie sowie der Holzwerkstoffindustrie stofflich genutzt. Betriebsintern erfolgt auch eine begrenzte energetische Nutzung. Nach dem aktuellen Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass etwa 30 PJ/a vom gesamten Rückstandspotenzial für energetische Zwecke als technisches Potenzial anzusehen sind.

In der Holzwerkstoffindustrie lässt sich auf Basis des Produktionsumfanges auf die Höhe des Anfalls an Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen schließen. Danach fallen in der Spanplattenindustrie etwa 950 000 t/a, in der Faserplattenindustrie etwa 450 000 t/a und in den Bereichen OSB-, Tischler- und Furnierplatten etwa 140 000 t/a an. Ein Teil davon wird wieder unmittelbar in den technologischen Prozess einbezogen, so dass nur etwa knapp 60 % für energetische Zwecke nutzbar sind. Das sind etwa 0,9 Mio. t/a (bei $H_u = 15,5 \text{ MJ/kg}$, $w = 15 \%$) bzw. 14 PJ/a.

Bei der Weiterverarbeitung von Produkten der Holzwerkstoffindustrie in der Bau-, Holz- und Möbelindustrie fallen etwa 10 – 20 % Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle an. Das sind 1,7 – 3,4 Mio. t Industrierestholz mit einem Energieinhalt von etwa 27 bis 54 PJ/a.

Bei konservativer Abschätzung dürften davon mindestens 12 PJ/a energetisch nutzbar sein.

In der Zellstoffindustrie werden jährlich etwa 4 Mio. m³ Rohholz eingesetzt. Dabei fallen die Rinden (etwa 10 %) in der Regel als Rückstände an. Sie repräsentieren einen Energieinhalt von etwa 2,6 PJ/a, von dem etwa 2 PJ/a als energetisch nutzbar eingeschätzt wird. Tabelle I-6 fasst die vorhandenen Potenziale zusammen.

Tabelle I-6: Technische Potenziale von Industrierestholz aus der Weiterverarbeitung (/1/, /2/)

	Anfallende Gesamtmenge Mio. t/a	Nutzbare Menge ¹⁾ Mio. t/a	Technisches Energieträgerpotenzial PJ/a
Restholz aus der Schnittproduktion	ca. 4,8	ca. 1,9	30
Holzwerkstoffindustrie (bei der Produktion)	ca. 1,55	ca. 0,9	14
Holzwerkstoffindustrie (bei der Verarbeitung)	1,7 – 3,4	ca. 0,75	12
Zellstoffindustrie	ca. 0,1	ca. 0,1	2
Summe Industrierestholz	8,1 – 9,8	ca. 3,65	58

¹⁾ Heizwert von Holz mit einem Feuchtegehalt von 15 %, $H_u = 15,5 \text{ MJ/kg}$



Insgesamt ist demnach in Deutschland aus gegenwärtiger Sicht mit einem technischen Industrierestholzpotenzial von rund 58 PJ/a zu rechnen /1/.

Bei der Herstellung von Cellulosebrei in der Papierherstellung fällt zusätzlich Schwarzlauge an (d. h. das Lignin des Holzes) /2/. Schwarzlauge wird in der Papierindustrie ausschließlich zur Deckung der innerbetrieblichen Energienachfrage als Brennstoff genutzt; deshalb wird hier keine Mengen- und Potenzialermittlung realisiert.

2.2.3 Rückstände nach der Endnutzung

Zu Rückständen nach der Endnutzung zählen unbehandeltes und behandeltes Altholz (bzw. Gebrauchtholz). Unter Gebrauchtholz wird Holz verstanden, welches aus dem Nutzungsprozess ausscheidet. Solche Gebrauchthölzer lassen sich nach der Herkunft in Bau- und Abbruchholz, Verpackungsholz sowie Möbel und sonstige Holzwaren unterteilen.

In Deutschland fällt nach Abzug des stofflich genutzten Anteils eine energetisch nutzbare Gebrauchtholzmenge von 5,1 – 7,2 Mio. t/a an. Das entspricht einem technisch nutzbaren Energiepotenzial von 80 bis 112 PJ/a /1/.

2.2.4 Gesamtes Potenzial an holzartiger Biomasse

Tabelle I-7 zeigt eine Zusammenfassung der technischen Potenziale aus holzartiger Biomasse.

Tabelle I-7: Zusammenfassung der technischen Potenziale aus holzartiger Biomasse (/1/, /2/)

	Nutzbare Menge Mio. t/a ¹⁾	Technisches Energiepotenzial PJ/a
Waldrestholz	11,5	178
Schwachholz	8,4	130
Zusätzlich nutzbares Waldholz	9,0	140
Landschaftspflegeholz	0,27	4
Industrierestholz	3,65	58
Altholz	5,1 – 7,2	80 - 112
Summe holzartige Biomasse	ca. 38 – 40	ca. 590 – 622

¹⁾ Heizwert von Holz mit einem Feuchtegehalt von 15 %, Hu= 15,5 MJ/kg



2.3 Biogassubstrate

Als potenzielle Substrate für die Biogaserzeugung werden – soweit möglich – sämtliche organischen Stoffströme in Deutschland, die grundsätzlich für eine Biogaserzeugung verwendet werden können, berücksichtigt.

Ausgehend von dem gesamten Aufkommen an organischer Substanz wird zunächst der grundsätzlich für eine Biogaserzeugung verfügbare Anteil – soweit möglich – quantifiziert. Darauf aufbauend wird dann auf Basis von Durchschnittswerten des spezifischen organischen Trockensubstanzgehaltes und des spezifischen Gasertrages die daraus technisch gewinnbare Gasmenge ermittelt /1/.

2.3.1 Exkreme aus der Landwirtschaft

Das insgesamt anfallende Aufkommen an tierischen Exkrementen ist aufgrund einer Vielzahl unterschiedlichster Restriktionen technisch nicht nutzbar. Eine Verfügbarmachung der organischen Masse für eine Umsetzung in einer Biogasanlage ist bei bestimmten Nutztierarten ausgeschlossen. Beispielsweise fallen bei Tieren, die im Regelfall nicht oder nur begrenzte Zeit in Ställen gehalten werden, die Exkremente auf der Weidefläche an; sie können damit – wenn überhaupt – nur unter großen Schwierigkeiten gewonnen werden.

Hier wird daher z. B. davon ausgegangen, dass die tierischen Exkremente der in Deutschland gehaltenen Schafe und Pferde nicht verfügbar sind. Dies gilt auch für die in Deutschland vorhandenen Gänse und Enten /1/.

Neben den Exkrementen der Tierarten, die insgesamt als nicht verfügbar angesehen werden können, ist ebenfalls ein Teil des Exkremenaufkommens der verbleibenden Nutztierarten technisch nicht verfügbar. Ein großer Teil der Rinder wird – z. T. auch nur zu bestimmten Jahreszeiten – in Weidewirtschaft gehalten. Die auf dem Grasland anfallenden organischen Stoffe sind – wenn überhaupt – nur zu einem (sehr) kleinen Teil technisch – praktisch jedoch kaum – gewinnbar. Dadurch kann sich das technisch nutzbare Aufkommen an organischen Stoffen aus der Rinderhaltung – in Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten und der Betriebsgröße – deutlich reduzieren. Bei der Schweine- und Hühnerhaltung spielt dieser Aspekt eine geringere Rolle /1/. Auch werden Betriebe mit Tierbestandszahlen unter 20 (Rinder), Schweine (unter 100) und Geflügel (unter 5 000) bei der folgenden Potenzialabschätzungen nicht berücksichtigt /1/.



Unter Berücksichtigung dieser einschränkenden Randbedingungen, des Tierbestandes nach Großvieheinheiten, der Excrementenverfügbarkeit und der spezifischen Biogasausbeute je Großvieheinheit lässt sich bei einer nutzbaren Excrementenmenge von etwa 159 Mio. t/a ein Biogaserzeugungspotenzial von etwa 3,9 Mrd. m₃/a ermitteln. Auf der Basis des Einstreubedarfes und einer Biogasausbeute von etwa 0,19 m₃/kg Frischmasse Stroh lässt sich ein Biogaserzeugungspotenzial aus Festmist von etwa 615 Mio. m₃/a ableiten.

Tabelle I-8: Technische Potenziale aus Excrementen der Landwirtschaft (/1/, /12/)

	Nutzbare Menge	Energetisch nutzbare Trockensubstanz	Biogaserzeugungspotential	Technisches Energieträgerpotenzial
	Mio. t/a	Mio. t/a	Mio. m ₃ /a	PJ/a
Exkreme Rind, Schwein, Huhn	159 ¹⁾	14,3	3.900	83,3
Festmist (Einstreu durch Getreidestroh)	Rind: 2,9 Schwein: 0,4	1,2	615	13,2
Summe Exkreme aus der Landwirtschaft		15,5	ca. 4.500	96,5

¹⁾ Rind: 9 – 10 % TS-Gehalt, Schwein: 6 – 7 % TS-Gehalt, Huhn: 19 – 21 % TS-Gehalt

Insgesamt ist in Deutschland ein Biogaspotenzial auf der Basis des verfügbaren und technisch nutzbaren Excrementenaufkommens der Nutztierhaltung sowie des Einstreustrohs von etwa 4,5 Mrd. m₃/a vorhanden. Das entspricht einem technischen Energieträgerpotenzial von ca. 96 PJ/a. Daran ist die Rinderhaltung mit etwa 82 %, die Schweinehaltung mit ca. 13 % und die Hühnerhaltung mit etwa 5 % beteiligt.

2.3.2 Ernterückstände aus der Landwirtschaft

Unter Ernterückständen aus der Landwirtschaft werden alle aus der Pflanzenproduktion resultierenden Stoffe verstanden, die als Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle anfallen und in Biogasanlagen genutzt werden können. Auch kann ein Teil des Grasschnitts, der auf Dauergrünland anfällt, als Ausgangsmaterial für eine Biogaserzeugung eingesetzt werden. Allerdings steht der Substrateinsatz in Biogasanlagen vielfach in Konkurrenz zur Ver-



brennung (z. B. Stroh und Energiepflanzen), durch die das energetische Potenzial vielfach effektiver genutzt werden kann.

Die nachfolgend dargestellten Potenziale wurden auf der Basis der Erntemengen, der einzelnen Korn:Stroh-Verhältnisse bzw. der Frucht:Reststoff-Verhältnisse sowie der spezifischen Biogaserträge ermittelt. Das mit Abstand größte Potenzial resultiert aus dem Einsatz von **Getreidestroh bzw. sonstigem Stroh**, das alternativ zum Einsatz in Feuerungsanlagen auch als Kofermentat in Biogasanlagen nutzbar wäre.

Das unter 2.1.1 ermittelte energetisch nutzbare Strohpotenzial von 130 PJ/a entspricht einer **Trockenmasse** von etwa 7,6 Mio. t/a (Hu wasserfrei 17,2 MJ/kg). Der spezifische Biogasertrag bezogen auf organische Trockensubstanz variiert in der Literatur je nach Strohart außerordentlich stark (z. B. Getreidestroh zwischen 0,17 – 0,5 m₃/kg oTS, Maisstroh zwischen 0,41 – 0,9 m₃/kg oTS).

Unter Berücksichtigung der Zusammensetzung des ermittelten Strohpotenzials wird eine mittlere Gasausbeute im Bereich von 0,24 – 0,4 m₃/kg oTS, d. h. mit einem Biogaspotenzial von etwa 1,8 – 3,1 Mrd. m₃/a gerechnet. Das entspricht einem technischen Energieträgerpotenzial von 38,5 – 66,4 PJ/a.

In Deutschland sind etwa 5,3 Mio. ha an Dauergrünland, Wiesen und Weiden vorhanden, davon etwa 4,1 Mio. ha **Wiesen und Mähweiden**. Wird unterstellt, dass davon etwa 8 – 12 % für eine Produktion von Ausgangsstoffen für eine Biogasproduktion verfügbar sind, mit einem mittleren Ertrag von 8 t_{FM} / (ha·a), so beträgt die jährlich verfügbare Frischmasse 2,6 – 4 Mio. t. Bei einem durchschnittlichen oTS-Gehalt von ca. 34 % und einem spezifischen Gasertrag von 0,8 m₃/kg oTS entspricht dies einem Biogaspotenzial von 0,75 – 1,1 Mrd. m₃/a bzw. 16,0 – 24 PJ/a.

In Deutschland wurden im Jahr 2000 auf einer Fläche von etwa 0,46 Mio. ha Rüben angebaut. Bei einem Rüben : Blatt-Verhältnis von 1 : 0,8 und einem Rübenenertrag von etwa 29 Mio. t/a fallen etwa 23 Mio. t **Rübenblätter** an. Unter Berücksichtigung einer Verwendung als Tierfutter und Gründünger wird unterstellt, dass 25 – 50 % für die energetische Nutzung verfügbar sind. Bei einem oTS – Gehalt von etwa 10 % und einem spezifischen Gasertrag von 0,475 m₃/kg oTS ergibt sich ein Biogasaufkommen von etwa 275 – 550 Mio. m₃/a bzw. ein technisches, energetisch nutzbares Potenzial von 5,9 – 11,8 PJ/a.

In Deutschland wurden im Jahr 2000 auf etwa 0,3 Mio. ha Kartoffeln mit einem Gesamtertrag von ca. 11 Mio. t angebaut. Bei einem Verhältnis Kartoffeln : Kraut von 1 : 0,4 fallen damit etwa 4,4 Mio. t/a an **Kartoffelkraut** an. Das Kraut bleibt gegenwärtig auf den



Feldern. Wird unterstellt, dass etwa 50 % dieser Rückstände technisch eingebracht werden kann und davon 1/3 bis 2/3 des Aufkommens als Biomasse energetisch nutzbar gemacht werden könnte, resultiert daraus eine Menge von 0,75 – 1,5 Mio. t/a. Bei einem oTS-Gehalt von etwa 20 % und einem spezifischen Biogasertrag von knapp 0,8 m₃/kg oTS resultieren daraus etwa 190 – 380 Mio. m₃/a Biogas bzw. ein technisches, energetisch nutzbares Potenzial von 4,1 – 8,2 PJ/a. Deutlich geringere Potenziale an energetisch nutzbarer Biomasse ergeben sich bei der Gemüse- und Zierpflanzenproduktion bzw. aus dem Wein- und Hopfenanbau in Deutschland. Die sich daraus ableitenden technisch nutzbaren energetischen Potenziale wurden ähnlich über Anbauflächen, anteiliger Nutzung der Abfälle bzw. organischer Trockensubstanz und spezifischen Biogaserträgen abgeleitet. Beim Weinanbau wurde allerdings berücksichtigt, dass die pflanzlichen Rückstände eher holzartiger Natur sind und für eine Vergärung weniger geeignet sind.

Tabelle I-9: Technische Potenziale der (Ernte)rückstände der Landwirtschaft (1/, /12/)

Rückstandsart	Anbaufläche	Anfallende Rückstandsmenge ¹⁾	Energetisch nutzbare Menge ¹⁾	Energetisch nutzbare Trockensubstanz ²⁾	Biogas-potenzial	Technisches Energieträger Potenzial
	Mio. ha	Mio. t _{FM} /a	Mio. t _{FM} /a	Mio. t TS/a	Mio. m ₃ /a	PJ/a
Stroh (Vergärung als Ko-Fermentat)	8,1	48,9	9,3	7,6	1800 - 3100	38,5 – 66,4
Gras aus Dauergrünland, Wiesen, Weiden	5,3 (dav. 4,1 Wiesen und Weiden)	32,8	2,6 – 4,0	0,9 – 1,4	750 - 1100	16,0 – 24,0
Rübenblatt	0,46	23,0	5,8 – 11,5	0,6 – 1,1	280 - 550	5,9 – 11,8
Kartoffelkraut	0,3	4,4	0,75 – 1,5	0,15 – 0,3	190 - 380	4,1 – 8,2
Gemüse- und Zierpflanzenprod.	0,1	1,4	0,13 – 0,26	0,01 – 0,03	7 - 13	0,1 – 0,2
Wein u. Hopfen	Hopfen: 0,02 Wein: 0,1	0,75	0,25 – 0,5	0,05 – 0,1	36 - 72	0,8 – 1,6
		nicht nutzbar für Vergärung				
Summe (Ernte)rückst. der Landwirtschaft. (gerundet)			19 - 27	9,3 – 10,5	3100 - 5200	65 – 113

1) bezogen auf Erntezustand

2) wasserfreie organische Substanz



Mit Abstand die größten Energiepotenziale bestehen bzgl. des Einsatzes bei Getreide- und anderem Stroh, das alternativ auch als Festbrennstoff genutzt werden kann (siehe Kapitel 2.1.1). Das Gesamtenergiepotenzial der Ernterückstände aus der Landwirtschaft bewegt sich demnach in einer Spannbreite von 65 bis 113 PJ/a/1/.

2.3.3 Abfälle aus Gewerbe und Industrie

Abfälle organischer Herkunft fallen in den verschiedensten Bereichen der Lebensmittel-, der chemischen und der pharmazeutischen Industrie sowie im Gewerbe an. Die nachfolgenden Abschätzungen beschränken sich auf solche Gewerbe- und Industriebereiche, bei denen einen nennenswerter Beitrag am Gesamtpotenzial erwartet werden kann.

Das sind die Wirtschaftszweige Bierherstellung, Produktion und Verarbeitung von Früchten, Weinkelereien, Brennereien, Milchproduktherstellung, Schlachthöfe und Fleischverarbeitung sowie die Zuckerindustrie. Das Biogaspotenzial des Klärschlammes, welches aus Abwässern von Betrieben der Lebens- und Genussmittelindustrie resultiert, wird im Abschnitt Klärgas betrachtet /1/. Tabelle I-10 gibt einen Überblick zu den entsprechenden Potenzialen. Der Potenzialberechnung liegen die Produktionsmengen und Abfallmengen der Jahre 1998 bzw. 1999, eine Einschätzung der davon energetisch nutzbaren Mengen, durchschnittliche Trockensubstanzgehalte sowie mittlere Gaserträge zugrunde. Danach kann insgesamt von einem Energiepotenzial aus Abfällen aus Gewerbe und Industrie von 6- 12 PJ/a ausgegangen werden /1/.



Tabelle I-10: Technische Potenziale von Abfällen aus Gewerbe und Industrie (Daten aus /1/, /12/)

Abfälle aus	Produktion	Rückstände ¹⁾	Energetisch nutzbare Menge ¹⁾	Energetisch nutzbare Trockensubstanz ²⁾	Biogas-potenzial	Technisches Energieträger Potenzial
	10 ⁶ hl/a	10 ³ t/a	10 ³ t/a	10 ³ t TS/a	10 ⁶ m ₃ /a	PJ/a
Bierherstellung	113	2800	600 - 1300	100 - 210	75 - 150	1,6 – 3,2
Fruchtsaftkellereien	3900	780	200 - 400	85 - 170	55 - 110	1,2 – 2,4
Weinkellereien	10,6	265	27 - 54	12 - 24	8 - 16	0,2 – 0,4
Brennereien	0,9	9,9·10 ⁶ hl/a	330 - 660	40 - 80	25 - 50	0,5 – 1,0
Milchverarbeitende Industrie		27·10 ⁶ hl/a (Abwässer)	1500	90	30	0,6
Schlachthöfe und Fleischverarbeitung		400	130 - 260	20 - 40	10 - 20	0,2 – 0,4
Zuckerherstellung	4,2 · 10 ⁶ t	1800 (Schnitzel) 900 (Melasse)	180 – 370 100 - 200	120 – 250 75 - 150	50 – 105 45 – 90	} 2,1 – 4,2
Summe (Ernterückst. der Landwirtschaft (gerundet))			3100 - 4700	540 - 1000	300 - 575	

- 1) bezogen auf den Anfallzustand
- 2) wasserfreie organische Substanz

2.3.4 Landschaftspflegematerial

Unter Punkt 2.1.2 wurde die energetisch nutzbare Menge an organischem Material, das vor allem in Form von Grünschnitt, Gras und Laub anfällt, bereits ermittelt.

Soll es energetisch genutzt werden, so ist stets zwischen Verbrennung oder Vergärung zu entscheiden.

Wird es als Substrat zur Biogasgewinnung genutzt, so ist damit ausgehend von der energetisch nutzbaren Menge über die Menge an organischer Trockensubstanz ein Biogaspotenzial bzw. technisches Energieträgerpotenzial erreichbar, wie es in Tabelle I-10 zusammengefasst dargestellt ist.



Tabelle I-11: Technische Potenziale des Landschaftspflegematerials (Daten aus /1/, /12/)

Anfallort	Energetisch nutzbare Menge ¹⁾	Energetisch nutzbare Trockensubstanz ²⁾	Biogaspotenzial	Technisches Energieträger Potenzial
	10 ³ t/a	10 ³ t TS/a	10 ⁶ m ₃ /a	PJ/a
Abfälle aus:				
Öffentl. Grün-/Sportanlagen	470 - 950	200 - 400	120 - 240	2,6 – 5,2
Friedhofspflege				
Straßenrandpflege				
Landschaftspflegeflächen	350 - 700	250 - 500	160 - 320	3,4 – 6,8
Summe	820 - 1650	450 - 900	280 - 560	6,0 – 12,0
Landschaftspflegematerial				

1) aus Tabelle I-2

2) wasserfreie organische Substanz

2.3.5 Organische Siedlungsabfälle

Organische Abfälle aus privaten Haushalten und Kommunen können im Rahmen der Kreislaufwirtschaft sowohl kompostiert, verbrannt oder vergärt werden.

Eine gezielte Biogasproduktion durch Vergärung der Bioabfälle ist im Vergleich zur herkömmlichen Kompostierung ein relativ neues Gebiet, wobei in der Regel die Bioabfälle als Kosubstrat zur Gülle oder zum Klärschlamm mitvergoren werden. Zur Bestimmung der Bioabfallmengen wird von einem mittleren Bioabfallaufkommen von etwa 100 kg / (EW·a), d. h. etwa 8,2 Mio. t/a ausgegangen. Wird unterstellt, dass davon etwa 90 % für eine energetische Nutzung in Anaerobverfahren zur Verfügung stehen, so ergeben sich ca. 7,4 Mio. t/a organische Abfälle.

Organische Abfälle aus Wochen- und Großmärkten, bei denen ein verfügbarer Anteil von etwa 50 % als Gärsubstrat unterstellt wird, kämen dann in einer Größenordnung von 0,2 – 0,3 Mio. t/a hinzu.

Bei einem organischem Trockensubstanzgehalt von etwa 20 % und einem spezifischen Biogasertrag von ca. 0,38 m₃/kg oTS liegt die Biogaserzeugung bei etwa 580 Mio. m₃/a bzw. das technische Energieträgerpotenzial derartiger organischer Stoffströme bei etwa 12,5 PJ/a.



2.3.6 Gesamtes Potenzial

In Deutschland sind zwischen 186 und 246 PJ/a an Biogas aus den untersuchten organischen Stoffströmen verfügbar /1/ (Tabelle I-12). Deutlich wird dabei die Dominanz der Biogasgewinnung der Bereiche tierische Exkrememente und Einstreu sowie Ernterückstände der Landwirtschaft. Demnach stammt der wesentliche Anteil der technischen Biogaspotenziale aus der Landwirtschaft /1/.

Tabelle I-12: Zusammenfassung der Biogaspotenziale in Deutschland (Daten aus /1/, /12/) (gerundete Werte)

	Energetisch nutzbare Menge Mio. t/a	Energetisch nutzbare Trockensubstanz Mio. t/a	Biogaspotenzial Mio. m ₃ /a	Technisches Energieträgerpotenzial PJ/a
Tierische Exkrememente und Einstreu	162	15,5	4500	96,5
(Ernte)rückstände der Landwirtschaft (einschl. Stroh)	19 - 27	9,3 – 10,5	3100 - 5200	65 – 113
Abfälle aus Gewerbe und Industrie	3,1 – 4,7	0,5 - 1	300 - 575	6,4 – 12,2
Landschaftspflegematerial	0,8 – 1,6	0,4 – 0,9	280 - 560	6 – 12
organische Siedlungsabfälle	7,65	1,5	580	12,5
Summe				
Biogassubstrate mit Stroh	192 - 203	27 - 29	8800 - 11400	186 - 246
Biogassubstrate ohne Stroh	183 - 194	20 - 22	7000 - 8300	148 - 180

2.4 Klärgas

Das technische Klärgaspotenzial lässt sich als Summe aus dem Abwasseraufkommen bzw. dem Klärschlammaufkommen der öffentlichen und industriellen Abwasserreinigung ermitteln. Das Energiepotenzial der öffentlichen Abwasserbeseitigung ergibt sich unter der Voraussetzung, dass sämtliche Kläranlagen Deutschlands, ab 10 000 angeschlossenen Einwohnern, mit einer anaeroben Klärschlammstabilisierung ausgerüstet sind. Auf Basis des Abwasserdurchsatzes dieser Anlagen lässt sich somit ein Klärgaspotenzial von etwa 1900 Mio. m³ (bei $H_u = 10,0 \text{ MJ/m}_3$) bzw. 19 PJ/a ableiten; unter Berücksichtigung der Verluste (z. B. abgepackeltes Klärgas) liegt dieses Potenzial bei 17 PJ/a /1/. Die zusätzliche Klärgasgewinnung aus der Abwasserbeseitigung der Ernährungs- und Genussmittelindustrie



beträgt, unter Berücksichtigung der Verluste, rund 2,5 PJ/a /1/. Insgesamt ergibt sich damit im Rahmen der Abwasserbeseitigung ein Energiepotenzial von ca. 19,5 PJ/a /1/.

Tabelle I-13: Technisches Potenzial Klärgas (/1/, /12/)

	Klär- schlammauf- kommen	Energetisch nutzbare organ. Trockensubstanz	Nutzbares Biogas- potenzial ¹⁾	Technisches Energieträger- potenzial
	Mio. m ₃ /a	Mio. oTS/a	10 ⁶ m ₃ /a	PJ/a
Öffentliche Abwasserbehandlung	69	1,75	1700	17
Abwasserbehandlung der Ernährungs- und Genuss- mittelindustrie	1,1	0,25	250	2,5
Summe Klärgas	70	2	1950	19,5

¹⁾ Für Klärgas wird mit einem Heizwert von etwa 10 MJ/m₃ gerechnet

2.5 Deponiegas

Beim Deponiegas wird, im Unterschied zu den anderen Energieträgern, nicht das technische Potenzial dargestellt, sondern eine Abschätzung der zukünftigen Nutzung vorgenommen. Diese Betrachtungsweise ist angeraten, da aufgrund der bestehenden abfallrechtlichen Rahmenbedingungen und bereits weitgehend existierender bzw. sich in Planung befindlicher Anlagentechnik, die Nutzungsverläufe der nächsten Jahre sich weitestgehend voraussagen lassen.

Nur ein Teil des gefassten Gases wird momentan energetisch eingesetzt bzw. kann energetisch verwertet werden. Im Jahr 2000 dürften u. a. deshalb nur ca. 70 % des gefassten Gases auch energetisch genutzt worden sein. Dieser Wert erhöht sich zukünftig zunächst deutlich (2005 ca. 80 %) und sinkt danach durch zunehmende Schwachgasanteile wieder ab (2010 ca. 70 %, 2020 ca. 40 %) /1/.

Insgesamt resultiert daraus ein energetisch nutzbares Aufkommen im Jahr 2000 von jeweils 15 bis 21 PJ/a, im Jahr 2010 von 11 bis 15 PJ/a und im Jahr 2020 von etwa 2 bis 4 PJ/a /1/.



2.6 Energiepflanzen

Unter dem Begriff "Energiepflanzen" werden ein- oder mehrjährige Kulturen verstanden, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zur ausschließlichen energetischen Verwertung angebaut werden. Die erzeugte Biomasse kann als Festbrennstoff, als flüssiger Energieträger oder als Kosubstrat zur Biogasgewinnung eingesetzt werden /1/.

Die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland wird primär zur Nahrungsmittelproduktion genutzt. Die letztlich verbleibende Fläche, die für eine Energieproduktion zur Verfügung steht, ist direkt abhängig vom Flächenbedarf für die Nahrungsmittelerzeugung bzw. anderer konkurrierender Flächennutzungsansprüche.

Als Folge der Überproduktion innerhalb der EU werden schon langjährig Maßnahmen mit dem Ziel durchgeführt, landwirtschaftliche Nutzflächen der Nahrungsmittelproduktion zu entziehen. Diese Flächen stünden – da sie für die Lebensmittelerzeugung nicht genutzt werden dürfen – u. a. für einen Energiepflanzenanbau zur Verfügung. Im Jahr 2000 betrug die gesamte Stilllegungsfläche in Deutschland ca. 1,1 Mio. ha. Unter Berücksichtigung, dass bereits jetzt insbesondere Stilllegungsflächen schwerpunktmäßig zum Anbau von Raps zur energetischen Verwendung genutzt werden, lässt sich eine Gesamtfläche von 2 Mio. ha für den Energiepflanzenanbau ableiten /1/.

Es werden nachfolgend jeweils separat die technischen Energiepotenziale im Rahmen eines Anbaus von Raps oder Getreideganzpflanzen, Miscanthus und Kurzumtriebsplantagen oder eines Energiepflanzenanbaus für den Einsatz in Biogasanlagen für die unterstellte Fläche von 2 Mio. ha ermittelt. Das Gesamtpotenzial wird dann auf Basis eines Anbaumixes abgeleitet /1/.

2.6.1 Pflanzenölgewinnung

Das gesamte Energieaufkommen durch den Anbau von Winter- bzw. Sommerraps ergibt sich aus den Energieinhalten des Pflanzenöls, des nach der Ölextraktion zurückbleibenden Schrots und des nach der Pressung verbleibenden Presskuchens und des anfallenden Rapsstrohs.

Zur Potenzialermittlung wird der Anbau von Winterraps unterstellt, welcher gegenüber Sommerraps deutlich höhere spezifische Erträge aufweist.



Von folgenden Ansätzen wird ausgegangen:

- 3,5 t Rapssaat/ha,
- Ausbeuten bei Pflanzenölgewinnung: 0,41 t Rapsöl je t Rapssaat
0,59 t Schrot je t Rapssaat
- Heizwerte: Pflanzenöl = 35,8 MJ/kg
Schrot = 15,8 MJ/ kg bei einem Wassergehalt von 15 %
- Korn-Stroh-Verhältnis 1:1,7, Bergequote 75 %, Hu = 14,0 MJ/kg bei Wassergeh. v. 15 %

Damit ergibt sich ein jährliches Energiepotenzial (bei einer Anbaufläche von 2 Mio. ha) von etwa 292 PJ/a (Öl 102 PJ/a, Schrot 65 PJ/a und Stroh 125 PJ/a) /1/.

2.6.2 Festbrennstoffgewinnung

Die ermittelten technischen Potenziale in Tabelle I-14 zeigen die Bandbreite der Energiepotenziale des Energiepflanzenanbaus auf Basis fester Biomassen auf.

Tabelle I-14: Energieträgerpotenziale bei Anbau verschiedener Energiepflanzen auf 2 Mio. ha zur Festbrennstoffgewinnung (/1/, /2/)

Kulturen	Trockenmasseertrag t TM/(ha·a)	Trockenmasse Mio. t/a	Hu MJ/kg TM	Energieträgerpotenzial PJ/a
Getreidepflanzen	10	20	17,0	340
Energiegräser	12	24	17,6	422
Kurzumtriebsplantagen	9	18	18,5	333
Mittelwert aus Mischenbau festbrennstoffliefernder Kulturen		20,7		365

Da ein Mischenbau wahrscheinlich ist, kann von einem Energieträgerpotenzial bei der Festbrennstoffgewinnung ausgegangen werden, der zwischen dem unteren und oberen Potenzial bei etwa 365 PJ/a liegt.

2.6.3 Biogasgewinnung

Um eine alternative Flächennutzung mit Energiepflanzen als Substrat für die Biogasgewinnung unter Potenzialgesichtspunkten beurteilen zu können, wird der Anbau von Zwei-



Kulturen-Systemen angenommen. Wiederum unter der Annahme einer für den Energiepflanzenanbau verfügbaren Fläche von 2 Mio. ha errechnet sich ein insgesamt verfügbares Biomasseaufkommen von ca. 26 Mio. t TM. Daraus lässt sich ein technisch, jährlich verfügbares Gasaufkommen bei einem spezifischen Gasertrag von 0,42 m₃/kg TM von rund 11,2 Mrd. m³ ableiten. Das entspricht einem Energiepotenzial von knapp 236 PJ/a /1/.

2.6.4 Gesamtes Potenzial bei Energiepflanzenanbau

In der Praxis wird es beim Energiepflanzenanbau zu einem Anbaumix kommen. In Tabelle I-15 wird daher das Gesamtpotenzial des Energiepflanzenanbaus auf Basis des Mixanbaus auf 2 Mio. ha zusammengestellt. Es ergibt sich unter diesen Annahmen ein Energiepotenzial bei der Pflanzenölgewinnung von etwa 97 PJ/a, beim Anbau von Energiepflanzen zur Festbrennstoffgewinnung von 122 PJ/a und beim Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung von 79 PJ/a. Insgesamt beträgt das Energiepotenzial damit ca. 298 PJ/a /1/.

Tabelle I-15: Technisches Potenzial der Energiepflanzen auf der Basis eines Anbaumixes auf 2 Mio. ha (/1/, /2/)

Energiepflanzen zur	Anbaufläche in Mio. ha	Energetisch nutzbare Mengen	Technisches Energiepotenzial PJ/a
Pflanzenölgewinnung (Raps)	0,67	2,3 Mio. t/Raps	34,2
		1,4 Mio. t/a Schrot	21,8
		2,8 Mio. t/a Stroh	<u>41,6</u>
			97,6
Festbrennstoffgewinnung	0,67	6,9 Mio.t/a ¹⁾	122
Biogasgewinnung	0,67	8,7 Mio. t/a ²⁾	79
Summe aus Anbaumix	ca. 2		ca. 298

1) Trockenmasse aus Anbau von Getreidepflanzen, Energiegräsern und Kurzumtriebsplantagen mit Hu wf = 17,6 MJ/kg

2) Trockenmasse mit 0,42 m₃/kg TM = 3650 Mio. m₃ Biogas



2.7 Zusammenfassung

Die nachfolgende Tabelle I-16 gibt einen zusammenfassenden Überblick zu den energetischen Potenzialen aus biogenen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen. Dabei ist **zu beachten, dass die Potenziale z. B. von Stroh entweder nur als Festbrennstoff oder als Substrat für den Betrieb einer Biogasanlage genutzt werden können**. Deshalb werden die folgenden Rahmenannahmen getroffen:

- Holz (d. h. Waldholz, Industrierestholz, Alt- bzw. Gebrauchtholz) und Stroh (Getreide-, Ölsaaten-, Maisstroh, Körnerleguminosen) werden ausschließlich als Festbrennstoffe thermisch genutzt; eine Nutzung in Biogasanlagen findet nicht statt /1/.
- Rübenblätter, Kartoffelkraut, Rückstände aus der Gemüse- und Zierpflanzenproduktion, dem Wein- und Hopfenanbau sowie Biomasse von Dauergrünland, Wiesen und Weiden werden ausschließlich zur Biogasgewinnung eingesetzt /1/.
- Abfälle von Friedhöfen, Straßenrandpflege, Parks und Sportplätzen sowie Landschaftspflegematerial (ohne holzartige Biomasse) werden ausschließlich zur Biogasgewinnung eingesetzt /1/.
- Landschaftspflegeholz wird ausschließlich verbrannt /1/.
- Energiepflanzen werden jeweils zu einem Drittel als Biogassubstrate, Pflanzenölsubstrate und Festbrennstoffe bereitgestellt.

Insgesamt ergibt sich bei den biogenen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen ein Energiepotenzial von 1.200 bis 1.270 PJ/a (Tabelle I-16). Die Festbrennstoffe (einschließlich des Anteils aus dem Energiepflanzenmix) tragen mit einem Anteil von nahezu 80 % wesentlich zum Gesamtaufkommen bei. Die Potenziale von Klär- und Deponiegas sind sehr gering.



Tabelle I-16: Zusammenfassung der technischen Potenziale biogener Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (Daten aus /1/, /2/)

Rohstoff/ Substrat	Energetisch nutzbare Menge ¹⁾ Mio. t/a	Energetisch nutzbare Trockensubstanz Mio. t oTS/a	Biogas- ³⁾ erzeugung Mio. m_/a	Technisches Energieträger potenzial PJ/a
Festbrennstoffe:				
Stroh	9,3	7,6	-	130
Waldrestholz	11,5	9,6	-	178
Schwachholz	8,4	7,0	-	130
Zusätzlich nutzbares Waldholz	9,0	7,5	-	140
Altholz	5,1 – 7,2	4,3 – 6,0	-	80 – 112
Industrierestholz	3,65	3,1	-	58
Landschaftspflegeholz	0,27	0,2	-	4
Summe Festbrennstoffe	47,2 – 49,3	39,3 – 41	-	720 – 752
Biogassubstrate:				
Tierische Exkrememente und Einstreu	162	15,5	4500	96,5
Ernterückstände der Landwirtschaft (ohne Stroh)	9,7 – 17,7	1,7 – 2,9	1300 – 2100	26,5 – 46,6
Abfälle aus Gewerbe und Industrie	3,1 – 4,7	0,5 – 1	300 – 575	6,4 – 12,2
Landschaftspflegematerial	0,8 – 1,6	0,4 – 0,9	280 – 560	6 – 12
Organische Siedlungsabfälle	7,65	1,5	580	12,5
Summe Biogassubstrate	183 – 194	20 – 22	7000 – 8300	148 – 180
Klärgas		2	1950	19,5
Deponiegas ²⁾ 2000 (2020)			1500 - 2100	15 – 21 (2-4)
Summe biogener Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle				902 – 972
Energiepflanzenmix				298
Summe technische Potenziale				1200 - 1270

1) Festbrennstoffe bei Wassergehalt von 15 %, Biogassubstrate im Anfallzustand

2) Das Potenzial des Jahres 2000 ist Bestandteil der Summe

3) Bei Biogas wurde mit einem mittleren Heizwert von etwa 21,4 MJ/m_g gerechnet, bei Klär- und Deponiegas mit etwa 10 MJ/m_g



3 Biomasse in Europa

In Anlehnung an die bisherige Vorgehensweise wurden die technischen Potenziale für die Europäische Union ermittelt.

3.1 Gesamtbetrachtung der Europäischen Union

Die folgende Tabelle zeigt eine Unterteilung der technischen Brennstoffpotenziale biogener Festbrennstoffe in der Europäischen Union. In Kapitel 3.2 wird anschließend für die einzelnen Länder der EU ein detaillierterer Überblick zu den einzelnen Energieträgerpotenzialen gegeben.

Datengrundlage der Berechnung waren statistische Angaben, jeweils angegeben für die einzelnen EU-Länder. Herangezogen wurden Daten der Jahre 2000/2001 (/5/, /6/) u.a. zur Bodennutzung, zum Holzeinschlag sowie Getreideanbauflächen und Erträge.



Tabelle I-17: Biomassepotenziale 2000/2001 in der Europäischen Union (Eigene Berechnungen; Statistische Daten aus /5/ und /6/)

Biogener Festbrennstoff	Verwendeter Heizwert Hu (wf) (Durchschnittswerte)	Nutzbare Menge in Mio. t/a	Technisches Energiepotenzial in PJ/a
Holz und holzartige Rückstände			
Waldrestholz	18,6 MJ/kg	25,12	467
Industrierestholz	18,6 MJ/kg	67,04	1247
Altholz	18,6 MJ/kg	26,82	499
Brennholz	18,6 MJ/kg	19,35	360
Landschaftspflegehölzer und andere Hölzer	18,6 MJ/kg	8,29	154
Zusätzlich nutzbares und verfügbares Schwachholz (keine bisherige Nutzung)	18,6 MJ/kg	24,97	465
Summe Holz	-	171,60	ca. 3192
Stroh und landwirtschaftliche Nebenprodukte			
Stroh	17,2 MJ/kg	53,2	915
Früchte, Schalen, Hülsen und weitere landwirtschaftliche Nebenprodukte	17,0 MJ/kg	10,6	183
Summe Stroh- und landwirtschaftliche Nebenprodukte	-	63,84	ca. 1098
Energiepflanzen	17,7 MJ/kg	52,81	ca. 935
Gesamtbiomassepotenzial Europäische Union	-	-	ca. 5224

Holz und holzartige Rückstände. In der Europäischen Union sind ca. 108 Mio. ha an Waldfläche vorhanden /5/. Die Biomasse aus Holz und holzartigen Rückständen besteht aus Waldrest-, Industrierest-, Gebraucht-, Brenn- und Landschaftspflegeholz.



Das zusätzlich verfügbare Schwachholz wird derzeit nicht genutzt und ergibt ein Potenzial von rund 465 PJ/a. Für Holz und holzartige Rückstände ist ein Gesamtholzpotenzial von ca. 3190 PJ/a verfügbar.

Stroh- und landwirtschaftliche Nebenprodukte. In der Europäischen Union wurden im Jahr 2001 rund 200 Mio. t Getreide auf ca. 36 Mio. ha Anbaufläche produziert /6/. Unter der Annahme, dass 30 % des Getreidestrohs als technisches Potenzial zur Verfügung steht, ist ein Strohpotenzial von ca. 915 PJ/a erreichbar. Landwirtschaftliche Rückstände, beispielsweise aus Früchten, Schalen und Hülsen, sind mit 183 PJ/a energetisch nutzbar. Daraus ergibt sich für Stroh und landwirtschaftliche Rückstände ein Gesamtpotenzial von ca. 1100 PJ/a.

Energiepflanzen. Für den Anbau von Energiepflanzen werden hier 10 % der Ackerfläche zugrunde gelegt, damit wären gegenwärtig in der EU 7,4 Mio. ha an landwirtschaftlicher Fläche für den Anbau von Energiepflanzen nutzbar. Daraus ergibt sich für Energiepflanzen ein technisches Potenzial von etwa 935 PJ/a.

Dung. Dung besitzt in Europa als Festbrennstoff keine Bedeutung und wurde in der Zusammenstellung nicht näher betrachtet.

Zusammengenommen können damit biogene Festbrennstoffe mit ca. 5224 PJ/a zur Deckung der gegebenen Energienachfrage beitragen.

3.2 Verteilung der Biomassepotenziale auf die einzelnen Länder der EU

Die Verteilung der Biomassepotenziale aus Tabelle I-17 auf die einzelnen Mitgliedsländer der Europäischen Union stellt Tabelle I-18 dar. Eine Unterteilung der Biomasse wurde in Holz und holzartige Rückstände, Stroh und landwirtschaftliche Nebenprodukte sowie Energiepflanzen vorgenommen:



Tabelle I-18: Biomassepotenziale 2000/2001 in den Mitgliedsländern der Europäischen Union (Eigene Berechnungen; Statistische Daten aus /5/ und /6/)

Technische Potenziale in PJ/a				
EU – Land	Holz und holzartige Rückstände	Stroh und landwirtschaftliche Nebenprodukte	Energiepflanzen	Gesamt
Belgien und Luxemburg	44	14	15	73
Dänemark	21	54	35	110
Deutschland	440	276	171	887
Finnland	578	20	16	615
Frankreich	621	336	295	1.252
Griechenland	50	14	17	82
Irland	23	12	17	51
Italien	191	98	98	387
Niederlande	13	9	17	39
Österreich	150	25	16	191
Portugal	109	7	11	127
Schweden	642	30	28	700
Spanien	228	95	104	427
Großbritannien	80	109	96	284
Summe EU	3192	1098	935	5.224

Das Potenzial an Holz und holzartigen Rückständen der Europäischen Union (Stand 2000/2001) beinhaltet Waldrestholz und zusätzlich nutzbares Schwachholz, Industrierestholz, Altholz, Landschaftspflegeholz und andere Hölzer.

Eine Vergleichbarkeit der ausgewiesenen Holzpotenziale in Tabelle I-17 und Tabelle I-18 (EU) mit Tabelle I-16 (Deutschland) ist nicht möglich. Die aktuell ermittelten Potenziale für Deutschland in Tabelle I-16 enthalten neben dem gesamten Schwachholzaufkommen das zusätzlich nutzbare Waldholz, das sich weitgehend aus der Differenz von potenziell nutzbarem Rohholzaufkommen und tatsächlichem Einschlag ergibt und dabei sowohl Stammholz als auch Schwachholz beinhaltet.



Die technischen Potenziale von Holz und holzartigen Rückständen sind in den Ländern Finnland, Frankreich und Schweden besonders hoch und bilden zusammen fast 58 % des gesamten technischen Potenzials von Holz und holzartigen Rückständen in der Europäischen Union. Dänemark und Irland sowie die Niederlande bieten demgegenüber ein vergleichsweise geringes technisches Potenzial an Holz und holzartigen Rückständen mit 0,7 bzw. 0,4 %.

Die Potenzialermittlung für landwirtschaftliche Nebenprodukte in Europa in Tabelle I-17 und Tabelle I-18 erfolgte ausschließlich auf der Basis von Festbrennstoffen, die für Verbrennungs- bzw. Vergasungsanlagen geeignet sind. Das sind Früchte, Schalen, Hülsen und Kerne. Diese Potenziale spielen in Deutschland nahezu keine Rolle. Es wurden keine Materialien für die Erzeugung von Biogas betrachtet.

Für die Potenzialermittlung von landwirtschaftlichen Rückständen in Tabelle I-16 für Deutschland wurden die Materialien Gras aus Dauergrünland, Wiesen und Weiden, Rübenblätter, Kartoffelkraut, Rückstände aus Gemüse-, Zierpflanzenproduktion, Hopfen und Wein für die ausschließliche Erzeugung von Biogas verwendet. Somit ist das in Tabelle I-16 angegebene Biogaspotenzial für Deutschland nicht vergleichbar mit dem Potenzial der landwirtschaftlichen Rückstände in Tabelle I-18, welches ausschließlich für die Verbrennung/Vergasung ermittelt wurde.

Frankreich und Deutschland weisen im EU-Vergleich ein hohes technisches Potenzial an Stroh und landwirtschaftlichen Rückständen auf. Frankreich verfügt beispielsweise über fast 31 % des technischen Potenzials an Stroh und landwirtschaftlichen Rückständen innerhalb der EU, Deutschland über 25 %. Der geringste Anteil am technischen Potenzial von Stroh und landwirtschaftlichen Rückständen wird von Portugal bereitgestellt.

Den größten Anteil am Energiepotenzial von Energiepflanzen stellt Frankreich mit fast 32 % des EU - Energiepflanzenpotenzials bereit, gefolgt von Deutschland (18 %) und Spanien (11 %). Portugal trägt nur 1,2 % zum technischen Potenzial bei. Das jeweilige Biomassepotenzial an Energiepflanzen hängt von der spezifischen Flächenverfügbarkeit in den einzelnen Ländern ab, daher unterscheiden sich die jeweiligen Beiträge der Energiepflanzen – vergleichbar dem technischen Strohpotenzial – erheblich.

Frankreich und Deutschland sind mit einem technischen Gesamtbiomassepotenzial von ca. 1252 bzw. 887 PJ/a führend bei den Biomassepotenzialen. Die Niederlande, Belgien und Luxemburg weisen die geringsten technischen Gesamtpotenziale innerhalb der Europäischen Union auf.



4 Biomasse in den Schwellenländern Indien und Brasilien

In Entwicklungsländern, beispielsweise in Indien und Brasilien, ist eine große Menge an nicht genutzter Biomasse vorhanden. Die nicht genutzte Biomasse ist jedoch regional sehr unterschiedlich verfügbar. In den folgenden Kapiteln wurde eine Betrachtung der Biomasse, -speziell in Form von Holz- und holzartigen Rückständen, halmgutartiger Biomasse, Rückständen und Nebenprodukten, Tierdung und Energiepflanzen - in den Ländern Indien und Brasilien vorgenommen. Sie entspricht der Vorgehensweise des Kapitels 3, Biomasse in Europa.

4.1 Biomasse in Indien

Indien gehört zu einem der größten und bevölkerungsreichsten Länder der Welt. Die Nutzung der Biomasse hat in Indien eine sehr große Bedeutung, nicht zuletzt durch die Gründung des Ministeriums für Nicht - Konventionelle Energieressourcen.

Indien besitzt eine Gesamtfläche von 3288 Mio. km², wovon 63,3 Mio. ha von Waldgebiet und 181 Mio. ha durch landwirtschaftliche Fläche belegt werden /7/, /4/.

Im Folgenden werden die auf der Wald- und landwirtschaftlichen Fläche nutzbare Menge und die daraus resultierenden technischen Potenziale gegenübergestellt.

Tabelle I-19: Biomassepotenziale in Indien (Daten aus /4, /7, /8/)

Rohstoff	Fläche	Menge in Mio. t/a	Technisches Potenzial in PJ/a
Holzartige Biomasse	63,3 Mio. ha	Brennholz: 201	900
Halmgutartige Biomasse, Rückstände und Nebenprodukte	181 Mio. ha	540	2 600
Energiepflanzen			0
Dung	1,76 Mio. Stück Vieh *)	5,3 *)	1 100
Summe			4 600

*) Datenangabe nur für die 3 Gebiete Jalpaiguri, Darjeeling und Cooch Bihar ermittelbar



Das bedeutendste Biomassepotenzial in Indien stellen die halmgutartige Biomasse, Rückstände und Nebenprodukten mit einem technischen Potenzial von 2600 PJ/a dar. Das sind fast 57 % des Gesamtpotenzials biogener Festbrennstoffe.

Eine Nutzung von Energiepflanzen als biogener Festbrennstoff ist in Indien auf Grund fehlender nutzbarer Flächen noch nicht möglich. Im 6. Fünfjahresplan Anfang der 80iger Jahre wurden jedoch Prioritäten für den Ausbau der Biomassenutzung gesetzt. Dazu gehören beispielsweise eine allgemeine Brennholzaufforstung, die Entwicklung des Energiepflanzenanbaus und eine Verbesserung der Technologie zur Verbrennung biogener Festbrennstoffe.

Das Potenzial an Holzbrennstoffen mit 900 PJ/a ist vergleichsweise gegenüber halmgutartigen Rückständen und Nebenprodukte sehr gering, bedingt dadurch, dass die Entnahme des Holzes den jährlichen Zuwachs bedeutend überragt.

Der bei der Nutztierhaltung anfallende Dung ist im getrockneten Zustand als Festbrennstoff nutzbar. Eine Ermittlung des Dunggorkommens erwies sich als äußerst schwierig, da nur Mengendaten aus den 3 Gebieten Jalpaiguri, Darjeeling und Cooch Bihar verfügbar waren. Eine Berechnung des technischen Potenzials war daher nicht möglich. Zur Bestimmung des technischen Potenzials von Dung wurde auf die Studie „Bioenergieträger in Entwicklungsländern“ /4/, zurückgegriffen.

Das technische Gesamtpotenzial von biogenen Festbrennstoffen in Indien beträgt 4 600 PJ/a, vergleicht man das technische Potenzial mit der derzeitigen Biomassenutzung von 7 900 PJ/a /4/, so wird deutlich, dass die verfügbaren Potenziale bereits durch die Nutzung deutlich überschritten werden.

4.2 Biomasse in Brasilien

Die Bedeutung der biogenen Festbrennstoffe in Brasilien soll im Folgenden näher betrachtet werden. Brasilien hat eine Fläche von 8,5 Mio. km² und gliedert sich in 6 Regionen. Das Amazonasgebiet umfasst ca. 45 % der Gesamtfläche Brasiliens und sichert durch das tropisch feuchte Klima, einen schnellen Biomassezuwachs. Die Landesfläche Brasiliens gliedert sich in ca. 5 % Ackerland, 1 % permantes Feldfruchtland, 22 % Weideland, 58 % Waldland und 14 % Siedlungsgebiete /4/.



Tabelle I-20 stellt die technischen Potenziale der biogenen Festbrennstoffe Brasiliens dar:

Tabelle I-20: Biomassepotenziale in Brasilien (Daten aus /4/, /10/)

Rohstoff	Nutzbare Fläche	Menge in Mio. t	Technisches Potenzial in PJ/a
Holzartige Biomasse	731 Mio. ha		2 500
Halmgutartige Biomasse, Rückstände und Nebenprodukte		317,6 Zuckerrohr (Jahr 2000)	1 000
Energiepflanzen		1 013	6 400
(durchschnittliche Werte aus den Jahren 1992 - 1994)			
Dung			900
Summe			10 800

Brasilien verfügt über weitreichende Biomassereserven, die für die energetische Nutzung verfügbar gemacht werden können. Dies wird deutlich am technischen Potenzial von Energiepflanzen mit 6 400 PJ/a, welches fast 60 % des gesamten brasilianischen Energiepotenzials ausmacht. Über 1 Mrd. t/a an Avocado, Baumwolle, Erdnuss, Kokosnuss, Palmen, Mamona (lat. *Rhizinus Communis*, eine Heilpflanze), Mais, Soja und Urucum (lat. *Bixa Orellana*, ein Annatostrauch) standen durchschnittlich zur Verfügung. Außerdem eignen sich ein Drittel der Fläche Nordostbrasiliens für Energiepflanzungen, diese Flächen werden aber im Moment nicht genutzt /10/.

Im Jahr 2000 wurden ca. 317,6 Mio. t Zuckerrohr geerntet, jedoch verbleibt ein Großteil der Rückstände aus der Zuckerrohrproduktion ungenutzt auf den Feldern und wird dort verbrannt /4/.

Das technische Gesamtpotenzial an biogenen Festbrennstoffen beträgt ca. 10 800 PJ/a. Dabei sind die bedeutendsten Biomassefraktionen Brennholz und Bagasse aus der Zuckerrohrverarbeitung. Mit einer derzeitigen Nutzung von 1 200 PJ/a ist demnach in Brasilien ein erhebliches Potenzial an biogenen Festbrennstoffen bisher ungenutzt /4/.

5 Globale Abschätzung

Der überwiegende Teil der Nachfrage nach Energie wird primär durch die Nutzung fossiler Energieträger gedeckt, die Biomasse trägt weltweit zur Deckung der Energienachfrage nur zu einem kleinen Teil bei /2/.

Der weltweite Primärenergieverbrauch an fossil biogenen, fossil mineralischen Primärenergieträgern und Wasserkraft lag 1998 bei ca. 355 000 PJ/a (mit Biomasse etwa 397 000 PJ/a) und hat sich damit in den letzten 30 Jahren mehr als verdoppelt. So lag der weltweite Primärenergieverbrauch an fossilen Energieträgern und Wasserkraft beispielsweise 1965 bei ca. 156 000 PJ/a. Die Zuwächse sind allerdings nicht stetig verlaufen, sondern wurden durch die Ölpreiskrisen 1973 und 1979/80 beeinflusst. Ebenfalls verlangsamte sich der Anstieg des weltweiten Primärenergieverbrauchs durch die schlechte konjunkturelle Lage der Weltwirtschaft und die Umstrukturierungsprozesse im ehemaligen Ostblock. Im asiatischen Raum hingegen ist ein deutlicher Anstieg des fossilen Primärenergieeinsatzes festzustellen.

Abbildung I-1 zeigt eine Verteilung des Primärenergieverbrauches an fossil biogenen, fossil mineralischen Primärenergieträgern, Wasserkraft und Biomasse des Jahres 1998 /2/.

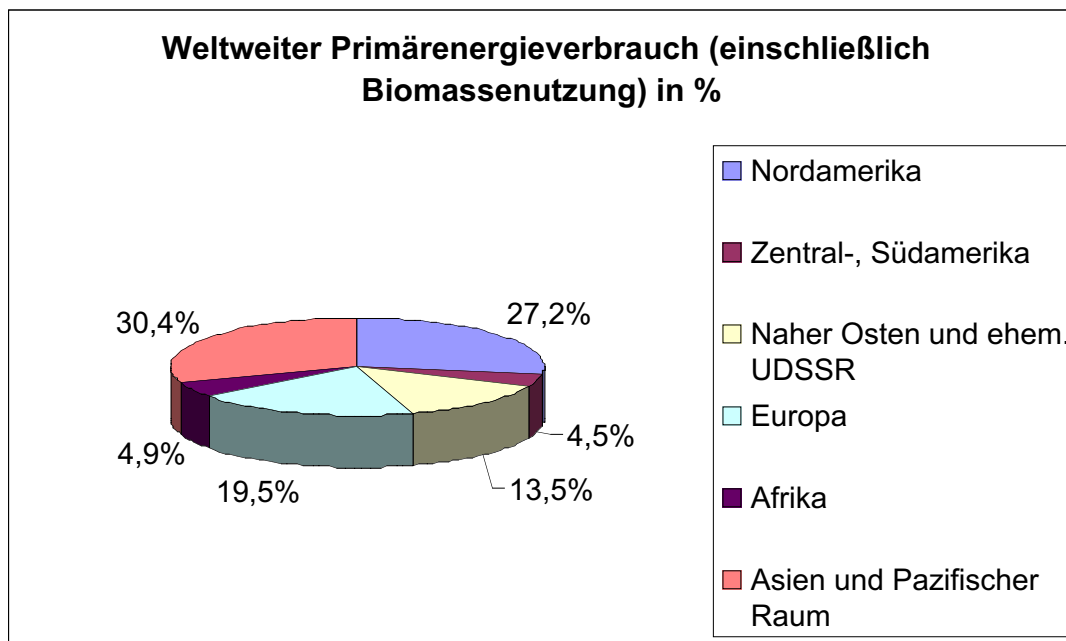


Abb. I-1: Verteilung des Primärenergieverbrauches an fossil biogenen, fossil mineralischen Primärenergieträgern, Wasserkraft und Biomasse /2/

Abb. I-2 zeigt die Anteile der einzelnen Energieträger am Primärenergieverbrauch fossiler Energieträger, Wasserkraft und Biomasse. Die Anteile der Energieträger variieren dabei aber stark in den einzelnen Kontinenten durch regionale und nationale Gegebenheiten, die abhängig von den unterschiedlichen Vorkommen der einzelnen Energieträger und der jeweiligen politischen Lage in den Ländern sind /2/.

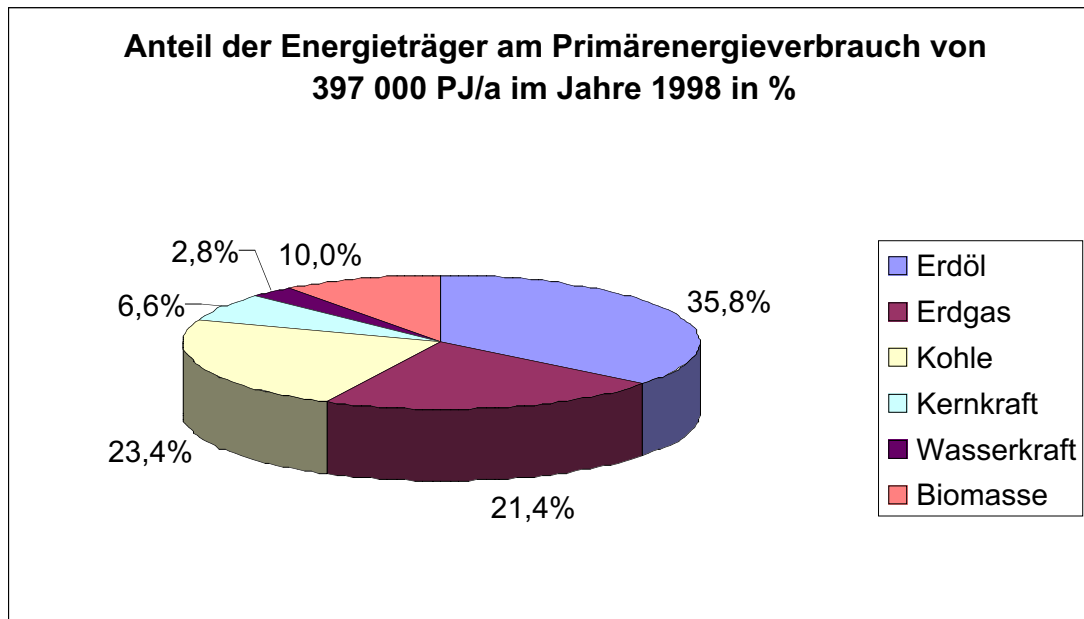


Abb. I-2: Anteil der Energieträger am Primärenergieverbrauch /2/

Im Vergleich zum Jahr 1965 hat sich in den vergangenen Jahren der Energieträgermix sehr stark verändert. Die Kernenergie hatte im Jahr 1965 noch keine Bedeutung, der Verbrauch an Kohle ist prozentual zum Gesamtprimärenergiebedarf gesehen, von 40% auf 23% zurückgegangen, der Mineralölverbrauch ist mit anteilig 36% annähernd gleich geblieben. In den vergangenen Jahren haben andere Energien, wie beispielsweise Erdgas und regenerative Energien einschließlich Biomasse stark an Bedeutung gewonnen /2/.

Die weltweit verfügbaren technisch nutzbaren biogenen Festbrennstoffpotenziale werden mit etwa 104.000 PJ/a eingeschätzt /4/. Bei einer derzeitigen Nutzung von etwa 40.000 PJ/a trägt die Biomasse zu etwa 10 % am weltweiten Primärenergieverbrauch bei.



Tabelle I-21: Weltweite technisch nutzbare Potenziale biogener Festbrennstoffe (Daten aus /4/)

Biogener Festbrennstoff	Technisches Potenzial in PJ/a
Holzartige Biomasse	41 600
Halmgutartige Rückstände und Nebenprodukte	17 200
Dung	7 600
Energiepflanzen	37 400
Summe	103 800

Den in Tabelle I-21 dargestellten einzelnen biogenen Festbrennstoffen steht eine derzeitige Biomassenutzung von ca. 40 000 PJ/a gegenüber, demnach würden derzeit ca. 60 % der Biomasse nicht genutzt werden. Die verfügbaren und genutzten Potenziale sind jedoch in den einzelnen Kontinenten sehr unterschiedlich, wie Tabelle I-22 deutlich zeigt.

Tabelle I-22: Technische Potentiale der Biomasse der Welt /2/

Potentiale in PJ/a	Nord-amerika	Latein-amerika und Karibik	Asien	Afrika	Europa	Naher Osten	Ehemalige UDSSR	Summe
Holz	12800	5900	7700	5400	4000	400	5400	41600
Halmgut	2200	1700	9900	900	1600	200	700	17200
Dung	800	1800	2700	1200	700	100	300	7600
Biogas ^{a)}	(300)	(600)	(900)	(400)	(300)	(0)	(100)	(2600)
Energiepflanzen	4100	12100	1100	13900	2600	0	3600	37400
Summe	19900	21500	21400	21400	8900	700	10000	103800
Nutzung in PJ/a	3100	2600	23200	8300	2000	0	500	39700

a)Potentiale der Biogasgewinnung aus den aufgezeigten Dungpotentialen



In Asien werden beispielsweise die verfügbaren Potenziale von insgesamt 21 400 PJ/a durch die Nutzung von 23 020 PJ/a erheblich überschritten, in Afrika werden erst knapp 40% und in Lateinamerika lediglich 10 % des verfügbaren Biomassepotenzials genutzt. Die unterschiedliche Nutzung der Biomasse hängt im starken Maße von der Verfügbarkeit und der Erschließbarkeit ab. Die Verfügbarkeit wird sehr stark durch klimatische Bedingungen, der Nachfrage in ländlichen und städtischen Gebieten, sowie durch politische Gegebenheiten beeinflusst /2/.

Betrachtet man weltweit die unterschiedlichen Biomassefraktionen, so sind die größten energetisch nutzbaren Holzpotenziale in Nordamerika vorhanden, die größten Potenziale an landwirtschaftlichen Rückständen und Nebenprodukten sowie Dung liegen in Asien und in Afrika liegt das größte Potenzial an Energiepflanzen vor.

In Europa werden derzeit 2 190 PJ/a des verfügbaren Biomassepotenzials von 6 760 PJ/a genutzt, das entspricht einer Nutzung von nur ca. 32 %, in Deutschland sogar lediglich ca. 23 % (290 PJ/a) des verfügbaren Biomassepotenzials (1.270 PJ/a) /3/. Bei einem EU - Verbrauch an Primärenergieträgern von 74 800 PJ/a (ohne Nutzung der Biomasse) und einem vorhandenen Biomassepotenzial von 6 760 PJ/a könnten rund 9 % der Energienachfrage Europas aus Biomasse gedeckt werden.

In Europa ist also, wie auch in Afrika und Lateinamerika, eine weitergehende Biomassenutzung zukünftig möglich.



II Darstellung und Bewertung von Konversionstechnologien (Einzelverfahren und deren Nutzbarkeit) sowie deren Energie- und Emissionsbilanzen

Bioenergie ist eine regenerative Energien, die im Vergleich zu vielen anderen regenerativen Energien entscheidende Vorteile aufweist: Bioenergie ist lager- und speicherbar, ist relativ gut transportierbar und in vielen Merkmalen ähnlich bestimmten fossilen Energieträgern. Bioenergie ist damit umfassend anwendbar und eine Substitution fossiler Energieträger ist im Vergleich zu anderen regenerativen Energien relativ einfach möglich. Der Einsatz von Bioenergie ist durch eine breite Palette an unterschiedlichen Einsatzfeldern (d. h. Wärme, Strom und Kraft für den Traktionsbereich) und damit Energiewandlungstechniken charakterisiert.

Im Folgenden wird zuerst dargestellt, welche Möglichkeiten der Energiewandlung von Biomasse existieren. Aus der großen Anzahl von möglichen Versorgungsketten werden anschließend einige wesentliche ausgewählt, die im Weiteren näher betrachtet werden. Im Anschluss daran werden die Einsatzfelder beschrieben, in denen diese Bioenergieträger einen Beitrag zur Energieversorgung leisten können. Der anschließende Abschnitt stellt dar, in welchen Formen Bioenergieträger angeboten werden und welche Bereitstellungsform sich für welche Anforderung eignet. Die technische Realisierung der Biomassenutzung für die unterschiedlichen Einsatzzwecke wird im Anschluss daran beschrieben. Der letzte Abschnitt widmet sich der Integration von Bioenergieträgern in das bestehende Energiesystem, d. h. welche fossilen Energieträger werden bei welchem Einsatzzweck substituiert.



1 Möglichkeiten der Energiewandlung von Biomasse

In Abhängigkeit von der eingesetzten Biomasse und der jeweils gewünschten End- bzw. Nutzenergie ist eine Energiebereitstellung aus Biomasse durch eine Vielzahl unterschiedlichster Techniken und Verfahren möglich. Neben dem direkten Einsatz der Biomasse als fester Brennstoff zur Wärmeerzeugung kann es für verschiedene Anwendungen (z. B. mobile Krafterzeugung, Stromerzeugung mit einer Gasturbine) aus technischen, energetischen und/oder ökologischen Gründen erforderlich sein, aus den Bioenergieträgern feste, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger herzustellen; für bestimmte Biomassen (z. B. Gülle) ist eine derartige Umwandlung in einen Sekundärenergieträger die einzige Möglichkeit einer energetischen Nutzbarmachung. Dabei kann zwischen thermochemischen, physikalisch-chemischen und biochemischen Veredelungsverfahren unterschieden werden (Abb. II-1).

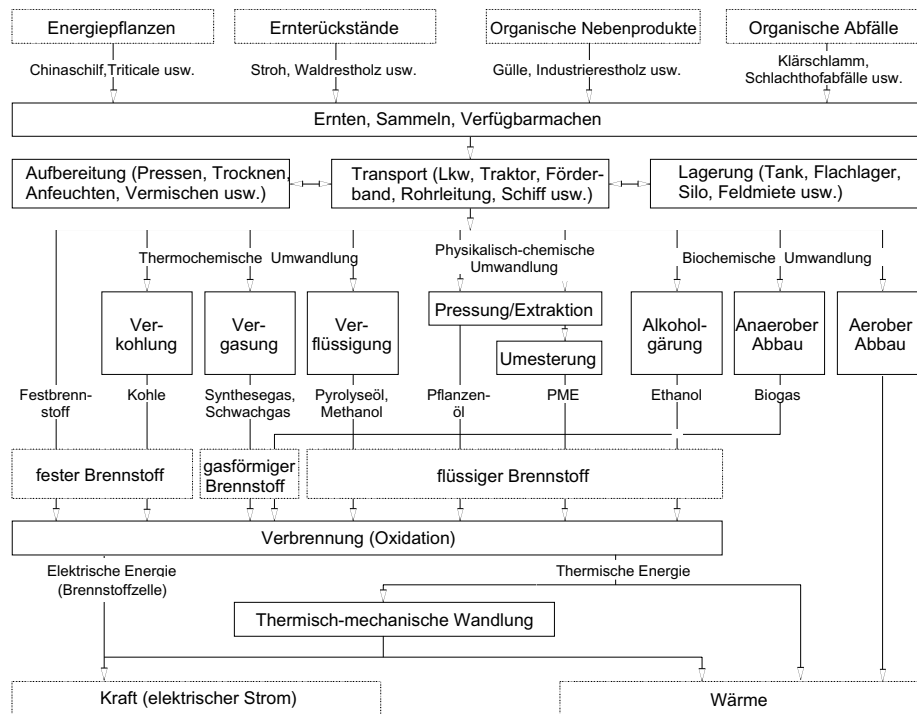


Abb. II-1: End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse (gestrichelte Umrandung: Energieträger; durchgezogene Umrandung: Umwandlungsprozess; PME = Pflanzenölmethylester; nach /2/)

Bei den thermochemischen Verfahren erfolgt die Umwandlung primär unter Wärmeeinfluss. Bei der physikalisch-chemischen Umwandlung werden Pflanzenöle aus ölhaltigen organischen Stoffen (z. B. Rapssaat) durch Pressung und/oder Extraktion des Öls gewonnen; ggf. ist eine anschließende Umesterung des Pflanzenöls notwendig, um es problemlos in vorhandenen Konversionsanlagen einsetzen zu können. Bei den biochemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung von Biomasse in Sekundärenergieträger (z. B. Biogas, Ethanol) mit Hilfe von Mikroorganismen.

Für den gesamten Prozess der Energiewandlung – von der primären Biomasse hin zur End- bzw. Nutzenergie – stellen diese Umwandlungsverfahren allerdings nur einen Teilschritt innerhalb der gesamten Bereitstellungsketten dar (Abb. II-1). Diese Bereitstellungs- oder Versorgungsketten umfassen dabei alle Prozesse beginnend mit der Produktion der Energiepflanzen bzw. der Verfügbarmachung von Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen organischer Herkunft bis zur Bereitstellung der entsprechenden End- bzw. Nutzenergie sowie Verwertung bzw. Entsorgung der anfallenden Rückstände und Abfälle. Jeder einzelne Abschnitt setzt sich im Regelfall wiederum aus zahlreichen Einzelprozessen



zusammen. Da die verschiedenen Lebenswegabschnitte im Normalfall nicht am gleichen Ort angesiedelt sind, müssen die jeweiligen Entfernungen durch entsprechende Transporte (z. B. mit Lastkraftwagen, über Rohrleitungen) überbrückt werden. Daneben sind Art (z. B. holz- oder halmgutartig) und Qualität (z. B. Feuchte, Zusammensetzung) der verfügbaren Biomasse von Bedeutung sowie – vor dem Hintergrund des jahreszeitlich unterschiedlichen Anfalls – der zeitliche Verlauf des Biomasseangebots. Daraus können wiederum bestimmte Lagernotwendigkeiten resultieren; u. U. kann dazu auch eine Trocknung der Biomasse notwendig werden.

1.1 Bioenergieträger

Die nachfolgenden Darstellung beschränkt sich auf die Nutzung ausgewählter fester und gasförmiger Biobrennstoffe. Eine Betrachtung von flüssigen Biotreibstoffen unterbleibt, da der Schwerpunkt der hier durchgeführten Untersuchungen bei den Möglichkeiten einer Strom- und Wärmebereitstellung liegt. Weiter werden nur solche Bereitstellungs- und Nutzungsketten beschrieben, die schon jetzt in einem größeren Ausmaß Anwendung finden, oder denen in mittlerer Sicht ein großes Anwendungspotenzial unterstellt wird. Dies sind insbesondere die Nutzung von fester Biomasse (d. h. biogene Festbrennstoffe) und die Nutzung von Biogas. Die Vergasung von fester Biomasse mit anschließender thermischer Nutzung verspricht im Vergleich zur direkten thermischen Nutzung eine bessere Effizienz der Energiewandlung und geringere Schadstoffemissionen nur im Hinblick auf eine Strombereitstellung. Jedoch existieren Vergasungsanlagen zur Stromerzeugung bislang nur im Versuchsstadium. Aufgrund von technischen Problemen im Hinblick auf die Gasreinigung bzw. eine optimale Abstimmung des Vergasers, der Gasreinigung und Gasnutzung ist ein kommerzieller Einsatz noch nicht möglich. Eine weitergehende Betrachtung entfällt daher. Dies gilt in einem noch weitergehenden Ausmaß auch für die Pyrolyse.



1.2 Bereitstellung von Bioenergieträgern

Feste Bioenergieträger

Die festen Bioenergieträger, die zur Energieversorgung eingesetzt werden, lassen sich grob in holz- und halmgutartige Energieträger einteilen.

Holzartige Bioenergieträger werden üblicherweise entweder als Scheitholz, als Pellets oder als Hackgut eingesetzt. Zusätzlich ist ein Einsatz in speziellen Kraftwerken bzw. Heizkraftwerken sowie eine Zufeuerung in vorhandenen Kohlekraftwerken möglich.

- **Scheitholz.** Die klassische Gewinnung von Scheitholz erfolgt manuell mittels Säge und Axt. Inzwischen werden aber auch Maschinen angeboten, mit deren Hilfe das eingeschlagene Holz weitgehend automatisch zu Scheitholz verarbeitet werden kann. Dazu wird minderwertiges Holz oder Holz, das bei der Gewinnung von Nutzholz anfällt auf die entsprechende Länge gesägt und anschließend motor-manuell gespalten. Dies gewährleistet eine bessere Trocknung und Verbrennung, da dadurch die Oberfläche vergrößert wird. Scheitholz kann dann in handbeschickten Feuerungen eingesetzt werden. Es eignet sich daher insbesondere für die Energieversorgung von kleineren Einheiten (Einfamilienhäusern, Wohnungen).
- **Pellets.** Holzpellets sind zylindrische Presslinge aus trockenem, naturbelassenem Holz mit einem Durchmesser von 6 bis 40 mm (meist 6 bis 8 mm) und einer maximalen Länge von 100 mm (meist 10 bis 30 mm). Sie werden maschinell ohne chemische Zusätze (z. B. Bindemittel) unter mechanischem Druck geformt. Der Heizwert von Holzpellets liegt bei etwa 17,6 MJ/kg. Als Rohstoff für Holzpellets eignen sich insbesondere die bei der Be- und Verarbeitung von Hölzern anfallenden Säge- und Hobelspäne sowie Schleifstäube. Daneben können nach einer entsprechenden Zerkleinerung auch andere Holzchargen zu Pellets verarbeitet werden (u. a. auch Energiepflanzen). Holzpellets sind aufgrund ihrer homogenen Beschaffenheit für automatisch beschickte Feuerungen im kleineren und ggf. auch größeren Leistungsbereich geeignet.
- **Hackgut.** Als Hackgut oder Hackschnitzel bezeichnet man maschinell zerkleinertes Holz mit und ohne Rinde bei einer maximalen Stücklänge von 15 cm. Hackschnitzel können aus Durchforstungs- oder Waldrestholz, Industrierestholz, Altholz oder Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen (d. h. Energiepflanzen) erzeugt werden. Hackschnitzel werden



meist in Feuerungen größerer Leistung (Heizwerke, Heizkraftwerke) mit einer automatisierten Beschickung eingesetzt.

Für **halmgutartige Energieträger** (hier hat bisher im Wesentlichen nur Stroh eine sehr eingeschränkte Bedeutung erlangt) hat sich eine Aufbereitung zu Häckselgut aufgrund der hohen Transport- und Lagervolumina als ungeeignet erwiesen /14/. Daher erfolgt eine Verdichtung von Halmgütern zu Halmgut-Ballen mit den üblicherweise in der Landwirtschaft eingesetzten Aufsammelpressen. Die Herstellung von Pellets ist bislang noch nicht Stand der Technik und wird deshalb nicht betrachtet.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Energiedichte von Halmgut ist ein Transport über große Entfernungen meist unwirtschaftlich, so dass die thermische Nutzung in der Nähe des Orts des Anfalls der Energieträger erfolgt. Die thermische Nutzung von halmgutartigen Energieträger erfordert einen vergleichsweise hohen feuerungstechnischen Aufwand – wegen der ungünstigen verbrennungstechnischen Eigenschaften – und oft eine aufwändige Rauchgasreinigung zur Einhaltung der emissionsschutzrechtlichen Vorgaben. Ein Einsatz erfolgt daher meist in speziell ausgelegten Feuerungen größerer Leistung. Zusätzlich ist eine Zufeuerung in vorhandenen Kohlekraftwerken möglich.

Biogas

Einige Biomassen fallen in wässriger Lösung an (z. B. Gülle, organisch hoch belastete Abwässer). Hier ist eine energetische Nutzung nur möglich, wenn dieses Material in einen Sekundärenergieträger umgewandelt wird. Dies ist mit Hilfe der anaeroben Fermentation möglich, durch die unter Sauerstoffabschluss das organische Material in ein Methan-haltiges Schwachgas umgewandelt wird. Es kann dann in Motoren und ggf. auch Gasturbinen oder Brennstoffzellen zur Strom- und Wärmebereitstellung eingesetzt werden kann.



2 Stand der Biomassenutzung im Energiesystem

Im Jahre 2001 wurden in Deutschland rund 14 500 PJ an Primärenergie verbraucht. Der Anteil der fossilen Energieträger lag bei 84,3 %, wobei auf Mineralöl 38,5 %, auf Erdgas 21,5 % und auf Stein- und Braunkohle 24,3 % entfielen. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger umfasste rund 2,8 % oder 405 PJ.

Die Zahl der Heizgradtage als Maß für den Temperaturverlauf des Jahres im Vergleich zum langjährigen Mittel lag im Jahre 2001 um 7,5 % unter dem langjährigen Mittel (zum Vergleich: das Jahr 2000 lag mit 15,8 % unter dem langjährigen Mittel). Damit war die Nachfrage nach Raumwärme unterdurchschnittlich.

Rund 2 % des Primärenergieverbrauches in Deutschland (oder 290 PJ) entfielen im Jahre 2001 auf Energie aus Biomasse. Das entspricht einem Anteil von knapp 72 % der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch.

Schwerpunkt des Einsatzes von Bioenergieträgern in Deutschland ist die Verwendung biogener Festbrennstoffe. So entfallen gegenwärtig rund 90 % der Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien auf den Einsatz biogener Festbrennstoffe, wobei sich die Nutzung biogener Festbrennstoffe nahezu vollständig aus dem Einsatz von Holz ergibt. Die Verwendung von Holz zur Stromerzeugung ist gegenwärtig noch sehr gering (0,7 % des Holzeinsatzes), was sich aber mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Grund der Wirkung des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) in Zukunft ändern wird.

Gerade die veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen lassen auch erwarten, dass sich die Anlagentechnik für diese Art der Wärme- und Stromerzeugung in der nahen Zukunft weiter deutlich verbessert wird; so ist u. a. davon auszugehen, dass die Stromwirkungsgrade bei Biomasse-gefeuerten Kraftwerken und auch bei KWK-Anlagen ansteigen werden.

Dominierend am Einsatz von Holz ist das Brennholz mit einem Anteil von ca. 40 % am Einsatz biogener Brennstoffe zur Wärme- und Stromerzeugung, gefolgt vom Waldrestholz (26 %), Industrierestholz (19 %) und Altholz (6 %). Gasförmige Bioenergieträger (8 % des Einsatzes biogener Brennstoffe) und Stroh (1 %) komplettieren die Nutzung dieser Art der erneuerbaren Energieträger.



3 Einsatzfelder und Anwendungsformen

Die untersuchten festen und gasförmigen Bioenergieträger können zur ausschließlichen Wärmebereitstellung, zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung und zur ausschließlichen Strombereitstellung eingesetzt werden.

Mit festen Biobrennstoffen kann die Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern mit Feuerungsanlagen im kleinen bis mittleren Leistungsbereich realisiert werden. Aber auch der Einsatz in Energieanlagen mit einer größeren Leistung ist üblich; so kann die Wärmeversorgung von einem Nahwärmenetz mit einem Biomasse-Heizwerk erfolgen oder mit einem Biomasse-Heizkraftwerk unter gleichzeitiger Bereitstellung von Strom und Wärme. Im Falle, dass Abnehmer für die Wärme fehlen, ist auch eine ausschließliche Stromerzeugung in einem Biomassekraftwerk oder die Zufeuerung von Biomasse in ein Kohlekraftwerk möglich; letztere ist zwar technisch gut möglich, wird aber aufgrund der gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Randbedingungen nicht praktiziert. Alle diese Varianten sind Stand der Technik und z. T. bereits im Einsatz. Sollte eine Nutzung am Markt aus ökonomischen Gründen bisher nicht möglich sein, ist zumindest eine technische Machbarkeit nachgewiesen.

Auch die biochemische Umwandlung von Biomasse zu Biogas ist Stand der Technik. Biogas wird meist direkt am Ort des Anfalls der Bioenergieträger (z. B. Gülle, Ernterückstände, organisch belastete Abwässer) erzeugt und i. Allg. in Blockheizkraftwerken (d. h. Gasmotoren) zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt. Aufgrund der aus ökonomischen Gründen i. Allg. nur eingeschränkten Transportierbarkeit der zur Biogaserzeugung eingesetzten Biomassen handelt es sich hier meist um relativ kleine Anlagen. Jedoch wurden auch z. B. zur Vergärung von Bioabfällen größere Biogasanlagen gebaut, die ebenfalls bisher – aufgrund der energiewirtschaftlichen Rahmensetzung – primär eine Stromerzeugung aus dem produzierten Biogas realisieren. Möglich erscheint auch – wenn auch bisher aus ökonomischen Gründen nicht realisiert – eine Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz und/oder eine Nutzung im Traktionsbereich.

Tabelle I-1 zeigt die unterschiedlichen genannten Anwendungsfelder der Biomassenutzung mit den jeweiligen Energieträgern.



Tabelle II-1 Technische Aspekte der Biomassenutzung für die einzelnen Anwendungsfelder

Output	Wandlungstechnik	Wärmever- sorgung	Brennstofftyp	Leistung in kW ^a	Wirkungsgrad th./el. in % ^b
Wärme	Biomassekessel	EFH / MFH	Pellets, Scheitholz, Hackgut	2 - 50	75 – 85
	Heizwerk	Nahwärmenetz	Hackgut, Halmgutballen	100 – 5 000	70 – 80
Strom &	Blockheizkraftwerk	Landw. Betrieb	Biogas	25 – 500	60 / 30
Wärme	Heizkraftwerk	Nahwärmenetz	Hackgut, Biogas, Halmgutb.	max. 20 000 ^c	55 / 35
Strom	Biomassekraftwerk		Hackgut, Halmgutballen	max. 20 000 ^c	28 – 35

^a bei ausschließlichen Wärmesystemen bezogen auf die thermische Leistung, bei gekoppelten Systemen und bei Systemen zur ausschließlichen Stromerzeugung bezogen auf die elektrische Leistung; ^b thermischer Wirkungsgrad bezogen auf Wärme ab Verbraucher, Verluste beim Wärmetransport sind berücksichtigt; ^c maximal zulässige Leistung für Anlagen die nach dem EEG vergütet werden. c Leistungsanteil, der durch Biomasse zugefeuert wird

Im Folgenden werden für die einzelnen Anwendungen der normalerweise eingesetzte Brennstoff, die technischen Aspekte der Energiewandlung, wie Feuerungstechnik, Emissionsminderung, Wirkungsgrad, usw. näher beschrieben.

3.1 Kleine Biomasseanlagen zur Wärmeversorgung

Zur Deckung der unterschiedlich definierten Versorgungsaufgaben (Einfamilienhäuser (EFH) mit unterschiedlicher Wärmenachfrage) wird der Einsatz eines mit Holzpellets befeuerten Kessels mit 6, 9 bzw. 20 kW Leistung, für die Systeme EFH-I-III und MFH (Mehrfamilienhaus) der Einsatz eines mit Waldhackgut befeuerten Kessels mit 20 bzw. 67 kW Kesselleistung sowie für das System EFH-III der Einsatz eines mit Scheitholz befeuerten Kessels mit 20 kW Leistung untersucht (Tabelle II-2).



Tabelle II-2 Kenndaten der untersuchten Kleinanlagen für eine Wärmebereitstellung aus Holzpellets, Scheitholz und Waldhackgut

System	EFH-I	EFH-II	EFH-III	EFH-III	EFH-III	MFH
Brauchwassernachfrage in GJ/a	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	64,1
Heizwärmenachfrage in GJ/a	22	45	108	108	108	432
Brennstoff	Pellets	Pellets	Pellets	Scheitholz	Hackgut	Hackgut
Heizwert Brennstoff in GJ/t	17,64 ^a	17,64 ^a	17,64 ^a	14,4 ^b	13,42 ^c	13,42 ^c
Kesselnutzungsgrad in %	80	80	80	70	80	80
Systemnutzungsgrad ^d in %	74	76	78	68	78	78
Kesselfeuerungsl. in kW	6	9	20	20	20	67
Brennstoffeinsatz ^e in GJ/a	44,2	73,0	151,7	173,4	151,7	640,1
in t/a	2,5	4,1	8,6	12,0	11,3	47,7
Wärmespeicher in l	300	300	600	1 000	600	2 000
Brauchwasserspeicher in l	160	160	160	160	160	800

^a bei einem Wassergehalt vom 5 %; ^b bei einem Wassergehalt von 20 %; ^c bei einem Wassergehalt von 25 %; ^d zusätzlich zum Kesselnutzungsgrad berücksichtigt der Systemnutzungsgrad die Verluste der Brauchwasserbereitung; ^e inkl. Verluste

Alle Systeme sind dabei mit einem Wärmespeicher kombiniert. Für die Brennstoffe wird unterstellt, dass diese aus unbehandeltem Fichtenholz gewonnen werden. Die Holzpellets werden aus Säge- und Hobelspänen erzeugt. Scheitholz und Hackgut stammen aus Durchforstungs- und Waldrestholz. Das Holz wird jeweils am Anfallort nach einer vorhergehenden Lagerung aufgearbeitet. Der Transport zum Verbraucher wird mittels LKW durchgeführt. Dabei wird von einer mittleren Transportdistanz von 50 km für Pellets bzw. 30 km für Hackschnitzel und Scheitholz ausgegangen. Die Lagerung der Brennstoffe erfolgt bei Hackschnitzel und Pellets in einem separaten, von oben zu befüllenden Kellerraum. Das Scheitholz wird in einem Anbau an das zu versorgende Gebäude gelagert. Für Waldhackgut werden 3 % der eingelagerten Brennstoffmenge sowie für Scheitholz und Pellets aufgrund des geringeren Wassergehalts keine Lagerverluste unterstellt. Der Brennstoff wird bei Hackschnitzel und Pellets über einen automatischen Raumaustrag sowie eine Förderschnecke dem Kessel zugeführt; der Scheitholzkessel wird manuell befüllt. Die entstehende Asche aus der Verbrennung wird über die Restabfallsammlung entsorgt. Die Brauchwasserbereitung erfolgt jeweils über einen Brauchwasserspeicher, der beim System Mehrfamilienhaus über einen externen Wärmeübertrager bzw. bei den Systemen Einfamilienhaus über einen internen Wärmeübertrager beladen wird.

Die eingesetzte Brennstoffenergie ermittelt sich aus der am Brauchwasserspeicher bzw. an der Übergabestelle in das Wärmeverteilnetz der Gebäude bereitgestellten Wärme sowie dem Nutzungsgrad des gesamten Wärmeerzeugungssystems. Die Verluste des



Brauchwasserspeichers sowie der geringere Kesselnutzungsgrad der Warmwasserbereitung während der heizungsfreien Sommermonate werden berücksichtigt. Speziell bei Gebäuden mit einem spezifisch niedrigen Heizwärmebedarf (z. B. EFH-I) kann dadurch der jahresmittlere Systemnutzungsgrad deutlich unter dem Kesselnutzungsgrad liegen.

3.2 Nahwärmesysteme

Hier werden zwei Nahwärmesysteme (NW-I und -II) unterschieden. Es wird dabei für die Systeme Nahwärme(NW)-I und -II eine ausschließliche Wärmebereitstellung mit Hackgut als Brennstoff sowie für das System NW-II auch eine kombinierte Wärmebereitstellung von Waldhackgut bzw. Stroh und Heizöl Leicht unterstellt (Tabelle III-3). Als Wärmeabnehmer werden die definierten Versorgungsaufgaben einer kleintechnischen Wärmeherzeugung (EFH-I, EFH-II, EFH-III und MFH) berücksichtigt.

Die technische Konfiguration der mit Waldhackgut befeuerten Nahwärmesysteme NW-I und -II ist prinzipiell ähnlich. Als Brennstoff wird Waldhackgut mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 33 % eingesetzt. Das Material stammt aus Durchforstungs- und Waldrestholz, das nach einer vorherigen Trocknung im Wald direkt am Anfallort gehackt wird. Der Transport (30 km) zu den Heizwerken erfolgt durch landwirtschaftliche Fahrzeuge bzw. mittels LKW, welche das Hackgut in das Brennstofflager mit einer Brennstoffkapazität von 1 bis 2 Monaten kippen. Als Lagerverluste werden hier 4 % der Brennstoffwärmemenge unterstellt. Die Beschickung des Vorlagebunkers erfolgt bei beiden Systemen per Radlader. Von dort werden die Hackschnitzel mittels hydraulischen Schubstangen (Schubboden) und einer Querförderschnecke in den Biomassekessel gefördert. Die Feuerung ist als bewegter Vorschubrost ausgeführt, wobei die Kesselleistung des Nahwärmesystems II auf zwei Kessel (2 und 2,5 MW) aufgeteilt ist. Die Abgase werden über den Wärmeübertrager (Rauchrohrkessel) und Staubabscheider (NW-I Multizyklon und NW-II Elektrofilter) sowie durch einen Rauchgasventilator hin zum Kamin abgezogen; das System NW-II ist zusätzlich mit einem Economizer zur teilweisen Nutzung der im Rauchgas enthaltenen Wärme ausgerüstet. Der Feuerungsnutzungsgrad verbessert sich dadurch von 0,85 auf 0,92. Die Entaschung der Kessel erfolgt automatisch in Container, wobei die Grobasche als Dünger an die Landwirtschaft abgegeben wird. Die Zyklon- bzw. Elektrofilterasche wird deponiert.



Tabelle II-3 Kenndaten der untersuchten Biomassenahwärmesysteme

System	NW-I	NW-II	NW-II-HG/HL	NW-II-Stroh/HL
Wärmenachfrage in GJ/a	8 000	26 000	26 000	26 000
fossiler Wärmeanteil in %	0	0	15	15
Feuerungsanlage				
Brennstoff	Hackgut	Hackgut	Hackgut/ Heizöl L	Stroh/ Heizöl L
Heizwert Brennstoff in GJ/t	11,72 ^a	11,72 ^a	11,72 ^a /42,7	14,5 ^b /42,7
Kesselfeuerungsleistung in kW	1 650	4 500	1 800/3 000	1 800/3 000
Leistung Economizer in kW	-	500	200	200
Kesselnutzungsgrad in %	83	85 ^c	85 ^c /92	84 ^c /92
Systemnutzungsgrad ^d in %	67	75	75/74	74/74
Brennstoffeinsatz ^e in GJ/a	12 400	36 000	30 600/5 250	30 700/5 250
in t/a	1 060	3 070	2 610/123	2 120/123
Wärmeverteilnetz				
Länge in m	2 000	6 000	6 000	6 000
Vor-/Rücklauftemp. ^g in °C	70/50	70/50	70/50	70/50
Netznutzungsgrad in %	85	85	85	85
Nutzungsgrad Hausst. ^h in %	95	95	95	95

HG Hackgut, HL Heizöl Leicht; ^a bei einem Wassergehalt von 33 %; ^b bei einem Wassergehalt von 15 %; ^c ohne 7 % Nutzungsgradsteigerung durch Economizer; ^d berücksichtigt neben dem Kesselnutzungsgrad auch Nutzungsgradsteigerung der Feuerung durch Economizer von 85 auf 92 % sowie Nutzungsgrad der Wärmeverteilung und Hausübergabestationen; ^e inkl. Lagerverluste von 4 %; ^g Jahresdurchschnitt; ^h durchschnittlicher Nutzungsgrad (Brauchwasser 0,80 und Raumheizung 0,98)

Die Wärmeverteilung erfolgt über entsprechend Tabelle II-3 definierte Nahwärmenetze mit durchschnittlichen Vorlauf-/Rücklaufemperatur von 70/50 °C. Die Rohre werden als Kunststoffmantelrohre mit Mediumrohren aus Stahl, indirekter Netzanbindung und Brauchwasserzweischenspeicher (Nutzungsgrad Heizung 98 % und Warmwasser 80 %) in den versorgten Gebäuden ausgeführt. Der Anschluss der Hausstationen an das Wärmeverteilnetz erfolgt über flexible Kunststoffmantelrohre.

Um den investitionsintensiven Biomasseanlagenteil möglichst mit einer hohen Volllaststundenzahl betreiben und damit einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten zu können, werden Biomasseheizwerke oft mit einem Spitzenlastkessel auf der Basis fossiler Brennstoffe kombiniert. Es wird daher hier für das Nahwärmesystem NW-II eine kombinierte Wärmebereitstellung durch Waldhackgut und Heizöl Leicht (NW-II-HG/HL) untersucht (Tabelle II-3). Der Anteil der Biomasse am Gesamtwärmeabsatz liegt bei ca. 85 % bei einer installierten Leistung des Biomassekessels (inkl. Economizer) von 40 % der maximalen Leistung des Heizwerks. Die Anlagenkonfiguration ändert sich durch diese Kombination nicht; allerdings sinkt aufgrund der geringeren Leistung des Biomasseteils der Platzbedarf und damit die Größe der Gesamtanlage.

Zusätzlich wird ein mit Stroh und Heizöl Leicht befeuertes Nahwärmesystem NW-II-Stroh/HL entsprechend den Vorgaben des Systems NW-II diskutiert (Tabelle II-3). Aufgrund



der hohen Investitionskosten werden strohbefeuerte Anlagen dabei fast ausschließlich als Grundlastanlage in Kombination mit einem Spitzenlastkessel auf der Basis fossiler Energieträger betrieben. Das Stroh wird hier als Quaderballen per LKW zum Heizwerk transportiert (40 km) und dort eingelagert. Die Beschickung der nach dem Zigarrenabbrandverfahren arbeitenden Feuerung erfolgt automatisch mit einem Hallenkran. Zur Verbesserung der Wärmeausnutzung ist auch diese Anlage mit einem Economizer ausgerüstet. Das Abgas wird hier mit einem Gewebefilter gereinigt. Die Wärmeverteilung erfolgt ebenso wie beim System NW-II-HG/HL durch das Nahwärmenetz der Referenzanlage NW-II.

3.3 Heizkraftwerke

Die Bereitstellung von elektrischer Energie und Wärme aus fester Biomasse wird anhand von zwei Referenzanlagen untersucht (Tabelle II-4). Bei der ersten diskutierten Variante (Heizkraftwerk HKW NW-II) wird das beschriebene Heizwerk des Nahwärmesystems NW-II durch Adaption eines Kessels und Erweiterung um eine Dampfturbine mit Entnahme-Kondensation für eine Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung ausgebaut. Der Synchrongenerator hat dabei eine elektrische Leistung von 700 kW und wird mit 4 000 Volllaststunden im Jahr betrieben. Die Wärme kann während dieser Zeit vollständig genutzt werden. Der Jahresnutzungsgrad des Kessels sinkt aufgrund von höheren Verlusten von 85 auf 80 %. Zur Wärmerückgewinnung wird auch hier ein Economizer installiert. Die erzeugte elektrische Energie wird über einen Transformator und ein 500 m langes Erdkabel in das 25 kV Netz eingespeist.



Tabelle II-4 Kenndaten der untersuchten Biomasseheizkraftwerke

Referenzanlage		HKW NW-II ^a	HG/R-KW ^b
Feuerungssystem		Rostfeuerung	Wirbelschicht
Brennstoff		Waldhackgut	Industriehackgut/Rinde ^c
Heizwert Brennstoff	in GJ/t	11,72 ^d	8,1 ^e
thermische Leistung	in MW	5,7 ^f	35
elektrische Leistung	in MW	0,7	11,5
el. Volllaststunden	in h/a	4 000	7 900
el. Jahresarbeit (netto)	in GWh/a	2,8	90,9
Wärmeabgabe	in GJ/a	32 200 ^g	0
	in GWh/a	8,94	
Brennstoffeinsatz ^h	in GJ/a	48 050 ⁱ	1 090 000
	in GWh/a	13,3	303
	in t/a	4 100	134 600

^a Heizkraftwerk Nahwärme II; ^b Hackgut/Rinden-Kraftwerk; ^c jeweils 50 %; ^d bei einem Wassergehalt von 33 %; ^e bei einem mittleren Wassergehalt von 41 %; ^f Gesamtanlage inkl. ECO; ^g Wärmeabgabe Heizwerk, nutzbare Wärme beim Verbraucher 7,2 GWh/a (26 000 GJ/a); ^h ohne Lagerverluste von 4 %; ⁱ für Strom und Wärme

Das zweite untersuchte Referenzsystem ist ein mit Industriehackgut und Rinde befeuertes Biomassekraftwerk (HG/R-KW) mit einer thermischen Leistung von 35 MW und einer elektrischen Leistung von 11,5 MW. Als Brennstoff wird zu jeweils der Hälfte Industriehackgut und Rinde eingesetzt, die mit einer durchschnittlichen Transportdistanz von 50 km per LKW angeliefert werden. Die Feuerung ist als stationäre Wirbelschicht ausgeführt; dadurch können prinzipiell auch andere Brennstoffe (z. B. Stroh, Landschaftspflegematerial) verfeuert werden. Die freigesetzte Brennstoffenergie wird über Dampferzeuger, Dampfturbine (Entnahme-Kondensation) und Generator bei einem elektrischen Nutzungsgrad von 0,3 in elektrische Energie umgewandelt, die mittels Transformator und Erdkabel über die nächste Umspannstation in das 25 kV Netz eingespeist wird. Erfolgt zusätzlich die Nutzung der Abwärme in Form einer Kraft-Wärme-Kopplung, sinkt mit steigender Wärmeauskopplung der elektrische Nutzungsgrad; der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt allerdings. Bei einer maximalen Wärmeauskopplung wird unterstellt, dass ein Gesamtnutzungsgrad von 0,85 (0,23 elektrisch und 0,62 thermisch) erreicht wird. Die in Tabelle II-4 dargestellten Kenngrößen des Referenzsystems HG/R-KW beziehen sich dabei auf einen Betrieb ohne Wärmeauskopplung. Die Rauchgasreinigung erfolgt dreistufig über einen Zyklon zur Grobentstaubung, eine Trockensorption mit Calciumhydrat zur Bindung saurer Rauchgasbestandteile, sowie einem Gewebefilter zur Feinentstaubung bzw. Abscheidung der Reaktionsprodukte der Trockensorption. Die Rückstände aus der Verbrennung (Grobmaterial aus der Wirbelschicht, Abrieb des Bettmaterials und Flugasche) werden nach einer entsprechenden Aufbereitung an die Baustoffindustrie abgegeben; die Rückstände aus der Rauchgasreinigung werden deponiert.



3.4 Biogas-Blockheizkraftwerke

Als Referenzanlagen werden eine Biogasanlage für 50 Großvieheinheiten (GVE) mit Co-Fermentation von Gülle und Speiseresten (Referenzsystem Co-Ferm 50 GVE) sowie eine Anlage für 100 GVE ohne (Referenzsystem 100 GVE) bzw. mit (Referenzsystem Co-Ferm 100 GVE) Co-Fermentation von Gülle und Speiseresten betrachtet. Die Anlagen sind mit einer Mischgrube, einem Rohrfermenter aus Stahl (50 GVE) bzw. einem betonierten Fermenter und Nachgärbehälter sowie einem Güllezwischenlager ausgestattet. Für die Systeme mit Co-Fermentation ist zusätzlich eine Hygienisierung der Speisereste vor dem Eintrag in die Mischgrube notwendig. Das Biogas wird nach einer Reinigung und ggf. Zwischenspeicherung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) verstromt. Der erzeugte elektrische Strom wird direkt in das Niederspannungsnetz eingespeist. Die Abwärme wird zu 50 % für die Aufrechterhaltung des Gärprozesses benötigt; die restliche Wärme kann zur Raumwärme- und Warmwasserbereitung eingesetzt werden. Das vergorene Substrat wird nach einer ggf. erforderlichen Zwischenlagerung auf den landwirtschaftlichen Flächen des Anlagenbetreibers ausgebracht.

Tabelle II-5 zeigt die technischen Daten der untersuchten Referenzsysteme. Definitionsgemäß werden bei den Systemen Co-Ferm 50 GVE Co-Ferm 100 GVE neben Gülle zusätzlich noch Speisereste aus dem Gastgewerbe eingesetzt. Bei einem unterstellten Gasertrag von $1,4 \text{ m}^3/(\text{GVE}\cdot\text{d})$ bzw. $200 \text{ m}^3/\text{t}$ Speisereste ergibt sich dadurch im Vergleich zur Anlage 100 GVE ein - bezogen auf die zugeführte Menge - höherer spezifischer Gasertrag. Der Heizwert des erzeugten Biogases wird einheitlich mit 6 kWh/m^3 angenommen. Der elektrische Nutzungsgrad liegt bei den Systemen 100 GVE und Co-Ferm 50 GVE mit 0,28 aufgrund der geringeren Anlagengröße etwas unter jenem des Systems Co-Ferm 100 GVE (0,30). Als elektrischer Eigenverbrauch werden für alle untersuchten Systeme 8 % der erzeugten elektrischen Energie unterstellt.



Tabelle II-5 Technische Kenngrößen der landwirtschaftlichen Biogasreferenzanlagen

		Co-Ferm 50 GVE	100 GVE	Co-Ferm 100 GVE
Substrat	in t/a	1 000 ^a	1 600 ^b	2 000 ^c
Fermentervolumen	in m ³	80	250	350
Biogasertrag	in m ³ /a ^d	65 500	51 000	131 000
elektrische Leistung	in kW	20	20	50
thermische Leistung	in kW	44	44	110
Nutzungsgrad elektrisch/thermisch		0,28/0,50	0,28/0,50	0,30/0,55
Brutto-Stromerzeugung	in MWh/a	110	92,4	235,8
Eigenbedarf el. Energie	in %	8	8	8
Netto-Stromerzeugung	in MWh/a	101,2	85,0	216,9
Wärmeerzeugung	in GJ/a	709	594	1 555
	in MWh/a	197	165	432
Wärmebedarf Fermenter	in GJ/a	353	297	778
	in MWh/a	98	83	216

^a 800 t Gülle und 200 t Speisereste; ^b Gülle; ^c 1 600 t Gülle und 400 t Speisereste; ^d bei einem Heizwert von 6 kWh/m³



4 Energie- und Emissions-Bilanzen

Für die diskutierten Referenzsysteme werden im Folgenden die Energie- und Emissionsbilanzen über die gesamte Anlagenlebensdauer einschließlich aller vorgelagerten Prozesse erstellt und diskutiert. Die Emissionsfaktoren der in die Bilanzierung einfließenden direkten Emissionen aus dem Verbrennungsprozess sind der aktuellen Literatur entnommen. Das bei der Verbrennung der Bioenergieträger freigesetzte Kohlenstoffdioxid (CO₂) geht dabei nicht in die Bilanzierung der Klimawirksamkeit ein, da es - ein nachhaltiger Anbau der Biomasse unterstellt - nicht zusätzlich klimawirksam ist. Das bei der thermischen Nutzung freigesetzte CO₂ wurde beim Pflanzenwachstum infolge der Photosynthese der Atmosphäre entzogen und damit bei der Verbrennung lediglich wieder in diese freigesetzt; es handelt sich also um einen geschlossenen Kreislauf.

4.1 Kleine Biomasseanlagen zur Wärmeversorgung

Tabelle II-6 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzierung für eine Wärmebereitstellung zur Brauchwasser- und Raumwärmebereitung mittels der in Tabelle II-2 definierten biomassebefeuelten Kleinanlagen. Bezugsgröße ist dabei 1 TJ bereitgestellte Wärme am Ausgang des Brauchwasserspeichers bzw. an der Schnittstelle zum Wärmeverteilnetz im Gebäude.

Einflussfaktoren auf die dargestellten Ergebnisse sind neben dem Systemnutzungsgrad vor allem die Aufwendungen für die Bereitstellung der Brennstoffe, die Anlagengröße, der Verbrauch an Hilfsenergie (elektrischer Strom) sowie, mit Ausnahme der CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung entstehenden, brennstoffabhängigen direkten Emissionen.



Tabelle II-6 Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmebereitstellung für Warmwasser und Raumheizung aus Holzpellets, Waldhackgut und Scheitholz in Kleinanlagen (Zahlen gerundet)

System		EFH-I	EFH-II	EFH-III	EFH-III	EFH-III	MFH
Wärmenachfrage	in GJ/a	32,7	55,7	118,7	118,7	118,7	496,1
Kesselleistung	in kW	6	9	20	20	20	67
Brennstoff		Pellets	Pellets	Pellets	Hackgut	Scheitholz	Hackgut
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^a	206	157	111	110	129	73
SO ₂	in kg/TJ	52	40	30	30	32	22
NO _x	in kg/ TJ	243	231	220	227	269	223
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	16 590	13 030	9 590	9 720	11 330	6 900
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	229	208	190	195	227	183

^a primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Mit steigender Feuerungsleistung sinken bei vergleichbaren Anlagen (d. h. gleicher Brennstoff) die spezifischen baulichen Aufwendungen sowie spezifischen Verbräuche an Hilfsenergie und damit auch die entsprechenden Verbräuche erschöpflicher Energieträger sowie Schadstoffemissionen. Dadurch liegt z. B. der spezifische Verbrauch erschöpflicher Energieträger bei dem pelletsbefeuerten System EFH-I mit rund 206 GJ pro TJ Nutzwärme rund doppelt so hoch wie beim System EFH-III (111 GJ/TJ). Auch bei den CO₂-Äquivalent-Emissionen sowie den SO₂-Emissionen kann ein ähnlicher Zusammenhang festgestellt werden. Lediglich die NO_x-Emissionen werden zu einem Großteil durch die direkten Emissionen aus der Verbrennung bestimmt und zeigen damit nur eine geringe Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung. Die direkten Emissionen sind dabei von der Art der Feuerung bzw. vom eingesetzte Brennstoff abhängig. Aufgrund der ungünstigeren Verbrennungsbedingungen sind dabei mit Scheitholz befeuerte Kessel durch höhere Emissionen als Pellets- und Hackgutkessel gekennzeichnet.

Aufgrund der im Vergleich zu Pellets und Scheitholz geringeren energetischen Aufwendungen für die Bereitstellung von Waldhackgut zeigen hier mit Waldhackgut befeuerte Anlagen einen geringeren Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie geringere Emissionen (Tabelle II-7).



Tabelle II-7 Energie- und Emissionsbilanzen einer Bereitstellung von Holzpellets, Waldhackgut und Scheitholz frei Verbraucher (Zahlen gerundet)

Brennstoff		Pellets	Waldhackgut	Scheitholz
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^a	47	33	39
SO ₂	in kg/TJ	7,7	4,4	4,5
NO _x	in kg/ TJ	17,0	20,1	27,9
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	3 340	2 470	2 680
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	19,9	19,0	24,1

^a primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Bei der Herstellung von Pellets ist der höhere Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie sind die höheren Emissionen vor allem durch die für die Pelletsproduktion notwendige elektrische Energie (90 kWh pro Tonne Pellets) bedingt.

Die Vorteile von mit Waldhackgut befeuerten Anlagen in der Brennstoffbereitstellung werden allerdings durch die höheren baulichen Aufwendungen für Hackgutanlagen (u. a. größeres benötigtes Lagervolumen aufgrund geringerer Schüttdichte) wieder weitgehend ausgeglichen, so dass es z. B. bei dem diskutierten Referenzsystem EFH-II nur zu geringen Unterschieden zwischen den einzelnen Systemen im Gesamtergebnis der Bilanzen kommt. Abb. II-2 zeigt dies exemplarisch anhand der Verteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Abriss der Anlagen.

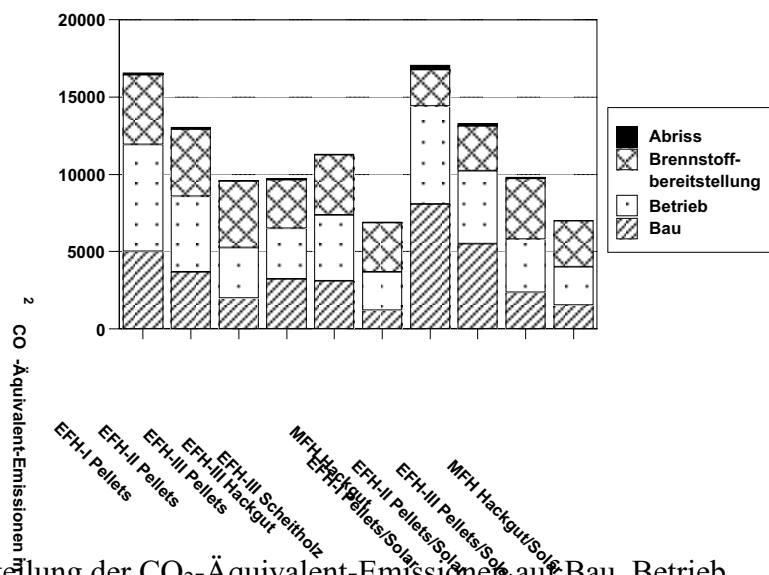


Abb. II-2: Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Abriss

Ähnliche Zusammenhänge lassen sich auch beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie bei den SO_2 -Emissionen feststellen. Demgegenüber werden die NO_x -Emissionen zu fast 90 % durch den Verbrennungsprozess verursacht. In Abb. II-3 ist dies exemplarisch anhand der Verteilung der CO_2 -Äquivalent-Emissionen sowie NO_x -Emissionen auf Bau (Feuerung, Lager- und Heizraum sowie Brauchwasserspeicher), Betrieb (direkte Emissionen und sonstige betriebliche Aufwendungen), Brennstoffbereitstellung und Abriss für die mit Pellets befeuerte Referenzanlage EFH-II dargestellt. Unter "Feuerung" werden dabei sämtliche baulichen Aufwendungen für den Heizungskessel, Wärmespeicher, Lageraustag, Schornstein sowie für Montagematerial zusammengefasst. Sonstige betriebliche Aufwendungen ("Betrieb") repräsentieren die für den Betrieb der Anlagen notwendige elektrische Energie (u. a. Antrieb der Förderschnecken, Gebläse für Verbrennungsluft) sowie in einem sehr geringen Ausmaß die Aufwendungen für Wartung und Instandhaltung der Anlage. Die direkten Emissionen der dargestellten CO_2 -Äquivalent-Emissionen stammen aus den Freisetzungen von Methan- und Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) während des Verbrennungsvorgangs.

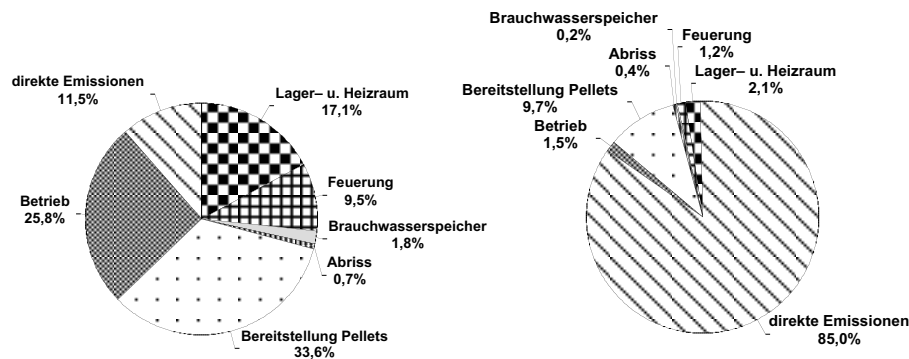


Abb. II-3: Aufteilung der CO_2 -Äquivalent-Emissionen (links) und NO_x -Emissionen (rechts) einer Wärmebereitstellung mittels Pelletfeuerung für das Referenzsystem EFH-II (9 kW Feuerungsleistung)



4.2 Nahwärmesysteme

Für die in Tabelle II-3 definierten Nahwärmesysteme werden im Folgenden die Energie- und Emissionsbilanzen erstellt und diskutiert. Bezugsgröße ist 1 TJ bereitgestellte Wärme an der Schnittstelle von Hausstation und Wärmeverteilsystem einer 5, 8, 18 und 60 kW-Hausübergabestation. Die Raumwärme- bzw. Warmwassernachfrage dieser Abnehmer entspricht dabei den definierten Versorgungsaufgaben einer kleintechnischen Wärmeerzeugung (EFH-I, EFH-II, EFH-III und MFH). Die Verluste des Nahwärmenetzes werden ebenso wie die Verluste der Übergabestationen bzw. der Brauchwasserspeicher innerhalb der versorgten Gebäude berücksichtigt. Die baulichen und energetischen Aufwendungen für das Heizwerk bzw. Nahwärmenetz werden dem jeweiligen Abnehmer entsprechend dem Anteil am gesamten Wärmeverbrauch aller angeschlossenen Abnehmer angerechnet. Die Aufwendungen für den Hausanschluss (u. a. Übergabestation, Hauszentrale, Brauchwasserzwichenspeicher, Stromverbrauch der Regelungseinheit) werden hingegen dem jeweiligen Abnehmer angelastet. Tabelle II-8 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für eine ausschließliche Wärmebereitstellung aus Waldhackgut.

Tabelle II-8 Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmeerzeugung in Heizwerken aus Hackgut sowie Wärmeverteilung mit Nahwärmenetzen (Zahlen gerundet)

System		NW-I	NW-I	NW-I	NW-I	NW-II	NW-II	NW-II	NW-II
Wärmenachfrage	in GJ/a ^a	8 000	8 000	8 000	8 000	26 000	26 000	26 000	26 000
Versorgungsaufgabe		EFH-I	EFH-II	EFH-III	MFH	EFH-I	EFH-II	EFH-III	MFH
Wärmenachfrage	in GJ/a ^b	32,7	55,7	118,7	496,1	32,7	55,7	118,7	496,1
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^c	148	133	122	119	150	135	124	121
SO ₂	in kg/TJ	47	42	38	36	45	40	36	35
NO _x	in kg/ TJ	213	205	199	200	193	186	181	181
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	12 440	11 420	10 640	10 430	12 260	11 240	10 470	10 250
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	203	192	184	183	187	176	168	168

^a Gesamtwärmenachfrage ohne Verluste des Wärmeverteilsnetzes sowie d e r Hausübergabestation/Warmwasserzwichenspeicher; ^b ohne Verluste der Hausübergabestation/Warmwasserzwichenspeicher; ^c primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Ähnlich den biomassebefeuerten Kleinanlagen werden auch die Bilanzergebnisse einer Wärmeerzeugung mit Nahwärmesystemen neben dem Systemnutzungsgrad vor allem von die



baulichen Aufwendungen für das Heizwerk (u. a. Gebäude, Kessel), das Nahwärmenetz und die Hausstation, von den Aufwendungen für die Bereitstellung der Brennstoffe und der für den Betrieb der Anlagen benötigten Hilfsenergie (elektrische Energie und Dieselkraftstoff) sowie, mit Ausnahme der CO₂-Emissionen, von den bei der Verbrennung entstehenden, brennstoffabhängigen direkten Emissionen bestimmt (Abb. II-4).

Während die spezifischen baulichen Aufwendungen für das Heizwerk i. Allg. mit zunehmender Anlagengröße abnehmen, muss dies für das Wärmeverteilnetz nicht notwendigerweise der Fall sein. Bei ähnlicher Netzbelegung (Kilowatt Anschlussleistung pro Meter Nahwärmenetz) können für jeden Abnehmer mit zunehmender Übertragungsleistung die spezifischen Aufwendungen für das Netz, da dieses zur Versorgung einer größeren Zahl angeschlossener Verbraucher ggf. größer dimensioniert werden muss, auch ansteigen. Dadurch können - wie im vorliegenden Fall - die baulichen Aufwendungen für das Wärmeverteilsystem mit zunehmender installierter thermischer Leistung ansteigen. In Abb. II-4 ist dies exemplarisch anhand der Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Abriss der in Tabelle II-8 dargestellten Bilanzergebnisse gezeigt. Die aus dem Betrieb der Anlagen herrührenden CO₂-Äquivalent-Emissionen (52 bis 61 % der Gesamtemissionen) werden dabei zu etwa 50 % durch den Verbrauch an elektrischer Energie für z. B. Umwälzpumpen oder Rauchgasgebläse (30 kWh pro in das Wärmenetz abgegebener MWh Wärme), zu rund 40 % durch die direkten Emissionen von N₂O (Distickstoffoxid, Lachgas) und CH₄ (Methan) aus dem Verbrennungsvorgang sowie zu ca. 10 % durch den Verbrauch an Dieselkraftstoff (u. a. Radlader) bestimmt. Das Nahwärmesystem NW-II ist hier aufgrund des höheren Systemnutzungsgrads durch einen etwas geringeren Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie geringere Emissionen gegenüber NW-I gekennzeichnet. Dieser höhere Systemnutzungsgrad führt auch dazu, dass der Anteil der Brennstoffbereitstellung (19 bis 24 % der Gesamtemissionen) an den gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen beim System NW-II geringer ist. Durch diese Vorteile können die im Vergleich zum System NW-I höheren CO₂-Äquivalent-Emissionen aus dem Bau der Anlage wieder ausgeglichen werden. Insgesamt ergeben sich hier jedoch praktisch keine Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Nahwärmesystemen, zumal Abriss und Entsorgung beider Systemen nur vernachlässigbar zu den Gesamtergebnissen beitragen. Die Unterschiede innerhalb eines Nahwärmesystems ergeben sich durch die unterschiedlichen Anteile von Brauchwasser und Raumheizung am Gesamtwärmeverbrauch (bei differenzierenden Nutzungsgraden der Brauchwasser- und

Raumwärmebereitung von 80 bzw. 98 %), vor allem aber durch die von der Abnahmeleistung abhängigen spezifischen energetischen und materiellen Aufwendungen für Bau, Betrieb und Abriss der Hausanschlüsse.

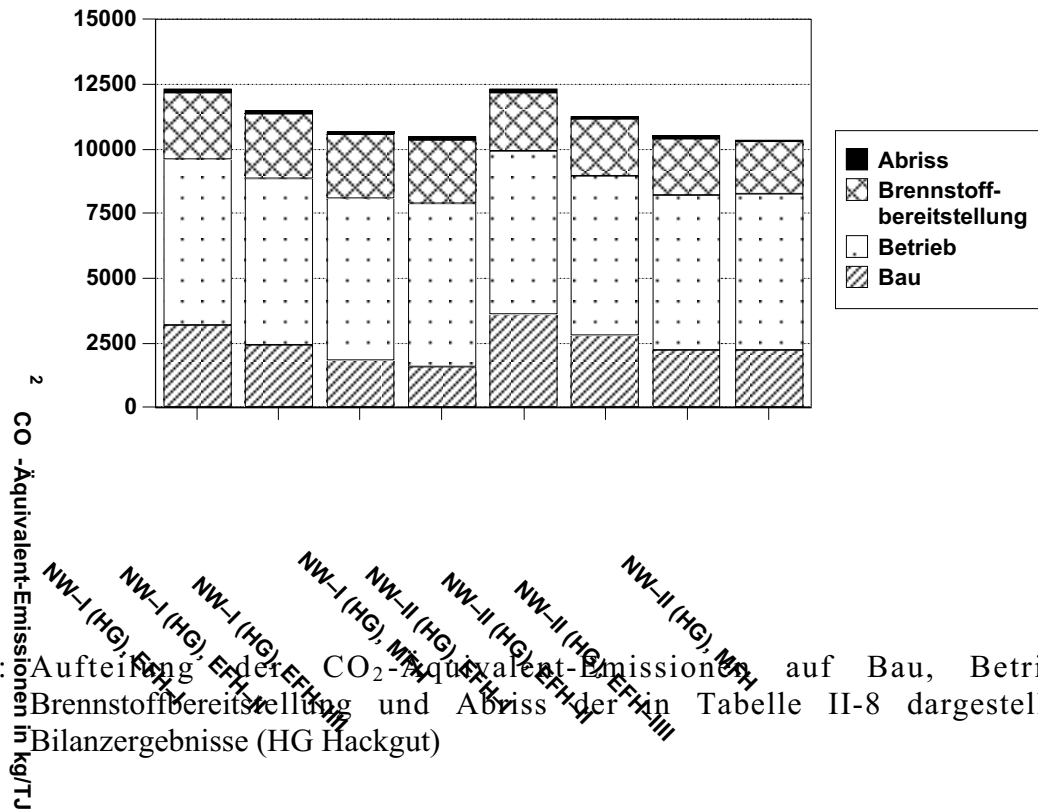


Abb. II-4: Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Abriss der in Tabelle II-8 dargestellten Bilanzergebnisse (HG Hackgut)

Auch bei den dargestellten Verbräuchen erschöpflicher Energieträger können ähnliche Zusammenhänge wie bei den CO₂-Äquivalent-Emissionen festgestellt werden. Demgegenüber werden die NO_x-Emissionen zum überwiegenden Teil (rund 80 %) durch die bei der Verbrennung freiwerdenden direkten Emissionen und nur zu einem geringen Teil durch die Bereitstellung der Brennstoffe (ca. 10 %) bzw. dem Bau der Systemkomponenten sowie sonstigen betrieblichen Aufwendungen (ca. 10 %) verursacht. Abb. II-5 zeigt dazu die Aufteilung der spezifischen NO_x-Emissionen (rechts) und der CO₂-Äquivalent-Emissionen (links) eines 8 kW Hausanschlusses (EFH-II) an die Referenzanlage NW-I auf Bau (Kessel, Heizwerk, Nahwärmenetz und Hausstation), Betrieb (direkte Emissionen, elektrische Energie und Sonstiges), Brennstoffbereitstellung und Abriss. Unter "Bau Kessel" werden dabei sämtliche baulichen Aufwendungen für den maschinellen Anlagenteil (u. a. Kessel, Lagerein- und -austrag, Kesselhausinstallation) des Heizwerkes zusammengefasst. "Bau Heizwerk" umfasst die Aufwendungen für den Bau von u. a. Gebäude, Lagers sowie der Freiflächen.

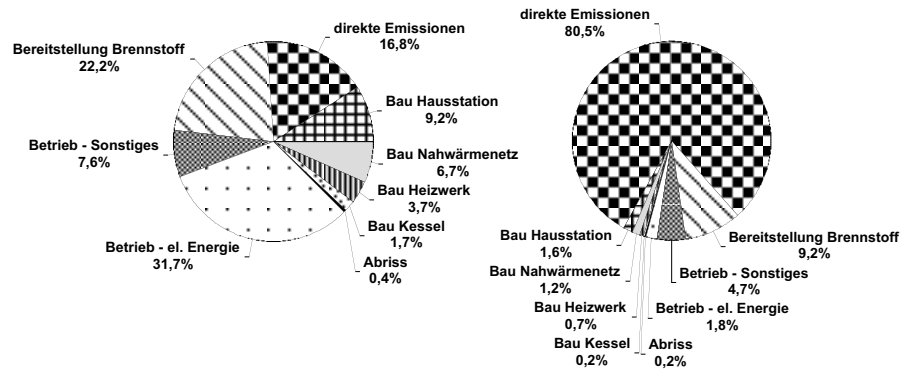


Abb. II-5: Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen (links) und NO_x-Emissionen (rechts) einer Wärmebereitstellung aus Hackgut für das Referenzsystem NW-I, EFH-II (8 kW Anschlussleistung)

Auch bei den SO₂-Emissionen dominieren - wenngleich schwächer – die direkten Emissionen mit etwa 40 % der Gesamtemissionen. Die weiteren Anteile ergeben sich zu ca. 25 % für den Bau der Anlage, 10 % für die Bereitstellung der Brennstoffe sowie 25 % für die sonstigen betrieblichen Aufwendungen.

Neben einer ausschließlichen Wärmebereitstellung aus Waldhackgut können biomassebefeuerte Nahwärmesysteme auch mit anderen Brennstoffen (z. B. Stroh und/oder Heizöl zur Spitzenlastabdeckung) betrieben werden (Tabelle II-9).

Tabelle II-9 Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmeerzeugung aus Waldhackgut und Heizöl Leicht (NW-II-HG/HL) sowie Wärmeverteilung mit Nahwärmenetzen (Zahlen gerundet)

System		NW-II-HG/HL ^c	NW-II-HG/HL ^c	NW-II-HG/HL ^c	NW-II-HG/HL ^c
Wärmenachfrage	in GJ/a ^a	26 000	26 000	26 000	26 000
Versorgungsaufgabe		EFH-I	EFH-II	EFH-III	MFH
Wärmenachfrage	in GJ/a ^d	32,7	55,7	118,7	496,1
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^e	393	369	353	351
SO ₂	in kg/TJ	77	70	65	64
NO _x	in kg/ TJ	186	179	173	173
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	30 740	29 030	27 900	27 810
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	214	202	193	193

HG Hackgut, HL Heizöl Leicht; ^a Gesamtwärmenachfrage ohne Wärmenetzverluste sowie Verluste der Hausübergabestation/Warmwasserzweischenspeicher; ^b solarer Deckungsgrad 6,7 %; ^c bei einem Biomasseanteil von 85 % an der gesamten bereitgestellten Wärme; ^d ohne Verluste der Hausübergabestation/Warmwasserzweischenspeicher; ^e primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Tabelle II-9 zeigt die Kombination des hackgutbefeuerten Nahwärmesystems NW-II mit einem heizölbefeuerten Spitzenlastkessel. Es wird dabei unterstellt, dass 15 % der Jahresarbeit durch die Spitzenlastanlage abgedeckt werden. Dadurch kann der



investitionsintensivere Biomassekessel kleiner dimensioniert sowie besser ausgenutzt und die Anlage insgesamt kostengünstiger betrieben werden. Aus ökologischer Sicht sind diese baulichen Einsparungen jedoch vergleichsweise gering. Allerdings kommt es entsprechend den Unterschieden in den Emissionswerten von hackgut- und heizölbefeuerten Anlagen (direkte Emissionen) zu einem Anstieg der CO₂-Äquivalent-Emissionen und der SO₂-Emissionen sowie zu einer Verringerung der NO_x-Emissionen. Durch den Einsatz des fossilen Energieträgers Heizöl erhöht sich auch der Verbrauch erschöpflicher Energieträger.

Neben holzartigen Biomassen können auch halmgutartige Biomassen als Energieträger in einem Nahwärmesystem verfeuert werden. Als Beispiel wird hier entsprechend den zuvor definierten Referenzsystemen eine Wärmebereitstellung durch Stroh und Heizöl Leicht diskutiert (Nahwärmenetz NW-II-Stroh/HL). Es wird dabei wiederum ein Anteil der Biomasse an der Gesamtwärmeerzeugung von 85 % unterstellt. Tabelle II-10 zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalyse.

Unabhängig davon, ob eine Spitzenlastabdeckung mit einem heizölbefeuerten Kessel erfolgt, zeigen Anlagen mit Stroh als Brennstoff im Vergleich zu hackgutbefeuerten Anlagen (bei gleichem Anteil der Biomasse an der Gesamtwärmeabgabe; NW-II) einen höheren Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie z. T. deutlich höhere Emissionen der betrachteten Luftschadstoffe. Die Hauptgründe dafür sind höhere bauliche Aufwendungen (vor allem Lager und Lagerein- und -austrag), höherer Aufwand bei der Brennstoffbereitstellung und vor allem höhere direkte Emissionen bei der Strohverbrennung. Die höheren Aufwendungen für die Bereitstellung des Strohs lassen sich auf die energetischen und materiellen Aufwendungen mineralischer Düngemittel zurückführen, die zum Ausgleich der bei einer energetische Nutzung von Stroh dem Ackerboden entzogenen Nährstoffe (vor allem Stickstoff) erforderlich sind.

Tabelle II-10 Energie- und Emissionsbilanzen einer Wärmeerzeugung aus Stroh und Heizöl Leicht (NW-II) sowie Wärmeverteilung mit Nahwärmenetzen (Zahlen gerundet)

System		NW-III-Stroh/HL ^b	NW-III-Stroh/HL ^b	NW-III-Stroh/HL ^b	NW-III-Stroh/HL ^b
Wärmenachfrage	in GJ/a ^a	26 000	26 000	26 000	26 000
Versorgungsaufgabe		EFH-I	EFH-II	EFH-III	MFH
Wärmenachfrage	in GJ/a ^c	32,7	55,7	118,7	496,1
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^d	435	413	396	395
SO ₂	in kg/TJ	182	173	167	167
NO _x	in kg/ TJ	321	311	303	302
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	40 330	38 590	37 280	37 260
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	479	461	447	446

HL Heizöl Leicht; ^a Gesamtwärmenachfrage ohne Wärmenetzverluste sowie Verluste der Hausübergabestation/Warmwasserzweischpeicher; ^b bei einem Biomasseanteil von 85 % an der gesamten bereitgestellten Wärme; ^c ohne Verluste der Hausübergabestation/Warmwasserzweischpeicher; ^d primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Abb. II-6 zeigt die Unterschiede zwischen einem stroh- und hackgutbefeuerten Biomassenahwärmesystem mit Spitzenlastabdeckung durch Heizöl Leicht anhand der Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen eines 8 kW Hausanschlusses (EFH-II) an das jeweilige Nahwärmesystem auf Bau (Heizwerk, Nahwärmenetz und Hausstation), Betrieb (elektrische Energie, direkte Emissionen aus Hackgut-, Stroh- und Heizölverbrennung sowie sonstige betriebliche Emissionen), Brennstoffbereitstellung (Hackgut, Stroh und Heizöl) und Abriss.

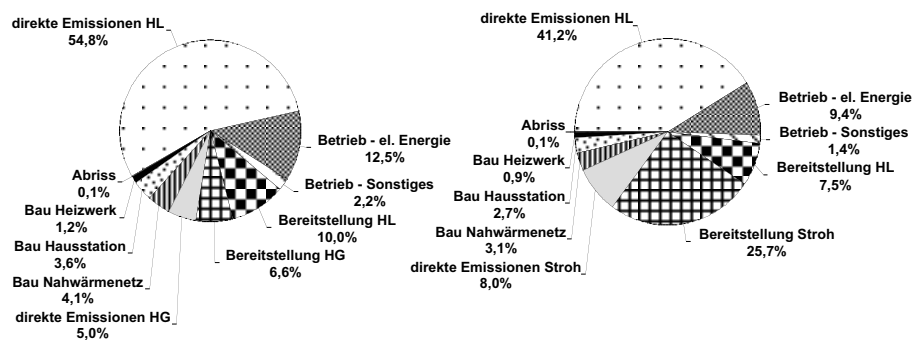


Abb. II-6: Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen einer Wärmebereitstellung aus Hackgut und Heizöl Leicht (links) sowie Stroh und Heizöl Leicht (rechts) für die Referenzsysteme NW-II-HG/HL bzw. NW-II-Stroh/HL (jeweils Versorgungsaufgabe EFH-II mit 8 kW Anschlussleistung, HG Hackgut, HL Heizöl Leicht)

Während die absoluten Emissionswerte der "Bereitstellung" und "direkten Emissionen" der Spitzenlastabdeckung durch Heizöl Leicht sowie "Bau Hausstation" und "Bau



Nahwärmenetz" für beide Systeme identisch sind und sich die weiteren baulichen und betrieblichen Emissionswerte (z. B. "elektrische Energie") nur gering voneinander unterscheiden, ist die Bereitstellung der Bioenergieträger sowie deren Verbrennung (direkte Emissionen) durch deutliche Unterschiede gekennzeichnet.

Auch der Verbrauch erschöpflicher Energieträger zeigt ähnliche Zusammenhänge wie die Verteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen. Demgegenüber dominiert bei den NO_x- und SO₂-Emissionen der Anteil der direkten Emissionen aus der Stroh- bzw. Hackgut- sowie Heizölverbrennung.

4.3 Heizkraftwerke

Für die in definierten Referenzanlagen einer Bereitstellung elektrischer Energie aus Waldhackgut (HKW NW-II) bzw. Industriebhackgut und Rinde (HG/R-KW) werden im Folgenden die Energie- und Emissionsbilanzen erstellt und diskutiert. Bezugsgröße ist dabei 1 TJ bereitgestellter elektrischer Strom an der Einspeisestelle in das Netz der öffentlichen Elektrizitätsversorgung.

Das untersuchte Heizkraftwerk HKW NW-II ist eine Erweiterung des Nahwärmesystems NW-II um eine Stromerzeugung mittels eines 700 kW_{el} Dampfturbinen-/Generatorsatzes. Es wird unterstellt, dass sich die Wärmeabgabe an die angeschlossenen Verbraucher durch diese Erweiterung nicht ändert. Die Bilanzierung des Heizkraftwerks HKW NW-II kann somit über die Erfassung sämtlicher baulichen und energetischen Mehraufwendungen erfolgen, die im Vergleich zum Nahwärmesystem NW-II ohne Stromerzeugung anfallen. Dabei werden neben den baulichen Aufwendungen für den maschinellen Anlagenteil (u. a. Turbine, Generator, Transformator) auch die zusätzlichen baulichen Aufwendungen für die Anlagenerweiterung (z. B. Lagervergrößerung aufgrund des höheren Brennstoffdurchsatzes, Dampfkessel anstelle Warmwasserkessel) sowie der gesamte Brennstoffmehrverbrauch aufgrund der Verringerung des Kesselnutzungsgrads (von 85 auf 80 %) berücksichtigt.

Die Bilanzierung des mit Industriebhackgut und Rinde befeuerten Biomassekraftwerks HG/R-KW erfolgt sowohl für eine ausschließliche Bereitstellung elektrischer Energie ohne



Wärmenutzung als auch für zwei Varianten mit unterschiedlicher Wärmenutzung. In Variante 1 (HG/R-KW₅₀) werden 50 % und in Variante 2 (HG/R-KW₁₀₀) die gesamte zur Verfügung stehenden Heizwärme genutzt. Dabei ändert sich der elektrische Nutzungsgrad mit der Wärmeauskopplung. Ohne Wärmeauskopplung liegt dieser bei 0,3 und bei 50 %iger bzw. maximaler Wärmeauskopplung bei 0,27 bzw. 0,23. Die Aufteilung der mit der Energiebereitstellung verbundenen baulichen und energetischen Aufwendungen sowie Emissionen aus dem Verbrennungsprozess zwischen der bereitgestellten elektrischen und thermischen Energie erfolgt dabei entsprechend der jeweiligen Energiemengen. Die ausschließlich zur Stromerzeugung notwendigen Anlagenkomponenten (u. a. Turbine, Generator, Netzanbindung) werden nur der elektrischen Energie zugerechnet. Tabelle II-11 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Lebensweganalysen.

Tabelle II-11 Energie- und Emissionsbilanzen einer Stromerzeugung aus Waldhackgut (HKW NW-II) sowie Industriebhackgut und Rinde (HG/R-KW; Zahlen gerundet)

System		HKW NW-II	HG/R-KW ₀	HG/R-KW ₅₀	HG/R-KW ₁₀₀
elektrische Energie	in GWh/a	2,8	90,9	84,9	78,8
Wärme	in GWh/a ^a	8,9	0	89	179
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^b	50	160	80	51
SO ₂	in kg/TJ	24	153	75	48
NO _x	in kg/ TJ	181	334	163	103
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	5 530	16 680	8 330	5 340
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	156	391	192	121

^a Wärmeabgabe Heizwerk, nutzbare Wärme beim Verbraucher entsprechend geringer; ^b primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Wird bei beiden untersuchten Referenzanlagen die gesamte zur Verfügung stehende Heizwärme genutzt, sind der Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie die CO₂-Äquivalent-Emissionen praktisch im gleichen Bereich. Demgegenüber zeigt bei den SO₂-Emissionen das System HKW NW-II bzw. bei den NO_x-Emissionen das System HG/R-KW₁₀₀ geringere Emissionen. Diese Unterschiede ergeben sich durch den im Vergleich zu Hackgut höheren Brennstoffschwefelgehalt der Rinde und den damit höheren direkten SO₂-Emissionen des Systems HG/R-KW₁₀₀ bzw. die im Vergleich zu einer Rostfeuerung (HKW NW-II) geringeren NO_x-Emissionen einer Wirbelschichtfeuerung (HG/R-KW₁₀₀). Die Ergebnisse zeigen auch deutlich den Einfluss der unterschiedlich hohen Nutzung der bei der Stromerzeugung anfallenden Heizwärme anhand des Referenzsystems HG/R-KW. Durch die Nutzung der Heizwärme sinken entsprechend der durchgeführten Aufteilung des

Gesamtverbrauchs erschöpflicher Energieträger bzw. der Gesamtemissionen zwischen elektrischer und thermischer Energie die Bilanzergebnisse für eine Bereitstellung elektrischer Energie. Ohne Nutzung der Heizwärme (HG/R-KW₀) kommt es zu einer Verdreifachung der pro bereitgestellter Kilowattstunde elektrischer Energie anfallenden Verbräuche erschöpflicher Energieträger bzw. Emissionen an Luftschadstoffen gegenüber einer vollständigen Nutzung der anfallenden Heizwärme (HG/R-KW₁₀₀).

Betrachtet man die Aufteilung des Verbrauchs erschöpflicher Energieträger sowie der CO₂-Äquivalent-Emissionen auf Bau, Betrieb und Abriss der Anlagen, werden diese von der Bereitstellung der Brennstoffe sowie den bei der Verbrennung entstehenden direkten treibhausrelevanten Emissionen von Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O) und Methan (CH₄) dominiert. Abb. II-7 zeigt dies anhand der Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen aus Tabelle II-11 für die Referenzsysteme HKW NW-II und HG/R-KW₁₀₀. Unter "Betrieb - Sonstiges" werden dabei sämtliche Aufwendungen für Hilfs- und Betriebsstoffe (u. a. Dieselmotoren für Radlader, Wartung, Instandhaltung) zusammengefasst. Insgesamt werden durch die Bereitstellung der Brennstoffe sowie den laufenden Anlagenbetrieb knapp 81 (HG/R-KW₁₀₀) bzw. 86 % (HKW NW-II) der gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen bedingt. Der Bau der Anlagen hat mit etwa 13 (HKW NW-II) bzw. 18 % (HG/R-KW₁₀₀) nur einen geringen sowie Abriss und Entsorgung einen vergleichsweise vernachlässigbaren Anteil.

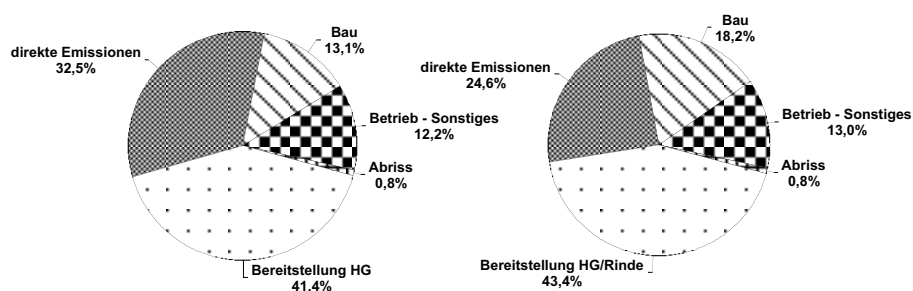


Abb. II-7: Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen einer Bereitstellung elektrischer Energie durch die in Tabelle definierten Referenzanlagen HKW NW-II (rechts) und HG/R-KW₁₀₀ (links; HG Hackgut, HL Heizöl Leicht)

Demgegenüber dominieren bei den SO₂- und NO_x-Emissionen mit einem Anteil von etwa 80 % an den Gesamtemissionen die bei der energetischen Nutzung der Biomasse entstehenden direkten Emissionen des Verbrennungsprozesses.



4.4 Biogas-Blockheizkraftwerke

Für die in Tabelle II-5 definierten Referenzsysteme werden im Folgenden die Energie- und Emissionsbilanzen über die gesamte Anlagenlebensdauer einschließlich aller vorgelagerten Prozesse erstellt und diskutiert. Das bei der Verbrennung der Bioenergieträger freigesetzte Kohlenstoffdioxid (CO_2) geht dabei nicht in die Bilanzierung ein.

Eine Gutschrift für die im Vergleich zu einer konventionellen Güllelagerung möglicherweise vermiedenen Methan-Emissionen ist aufgrund der unsicheren Datenlage nur schwierig zu quantifizieren. Es wird daher unterstellt, dass die Emissionen aus der konventionellen Güllelagerung mit durchschnittlich etwa 1 kg CH_4 pro t Gülle näherungsweise in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die bei der Biogasproduktion aufgrund der nicht vollständig gewährleisteten Dichtheit der Anlagen sowie die aufgrund des Restmethangehalts in der vergorenen Gülle emittierten CH_4 -Emissionen; es erfolgt deshalb keine Gutschrift.

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse werden dabei sowohl ohne als auch mit einer teilweisen Nutzung der Heizwärme diskutiert. Beim System Co-Ferm 50 GVE können maximal 356 GJ/a, beim System 100 GVE 297 GJ/a und beim System Co-Ferm 100 GVE maximal 1 559 GJ/a genutzt werden. Da allerdings aufgrund der Nachfragestruktur landwirtschaftlicher Betriebe in den meisten Fällen nicht die gesamte anfallende Heizwärme auch tatsächlich nutzbar ist, wird hier eine Wärmeabgabe von 144 GJ/a (40 000 kWh/a) unterstellt; dies entspricht etwa der jährlichen Wärmenachfrage eines landwirtschaftlichen Betriebs zur Raumwärme- und Warmwasserbereitung. Die Aufteilung der mit der Energiebereitstellung verbundenen baulichen und energetischen Aufwendungen sowie Emissionen aus dem Verbrennungsprozess zwischen der bereitgestellten elektrischen und thermischen Energie erfolgt dabei entsprechend der jeweiligen Energiemenge. Die ausschließlich zur Erzeugung der elektrischen Energie notwendigen Systemkomponenten (u. a. BHKW, Netzanbindung) werden allerdings nur der Bereitstellung elektrischer Energie angerechnet. Für das System Co-Ferm 50 GVE mit einer Netto-Stromerzeugung von 101,2 MWh/a bedeutet dies, dass bei einer Wärmeauskopplung von z. B. 144 GJ/a



(44 MWh/a) knapp 72 % der Aufwendungen und Emissionen der Bereitstellung der elektrischen Energie angerechnet werden. Tabelle II-12 zeigt die entsprechenden Ergebnisse der Bilanzierung.

Ein Großteil des mit der Bereitstellung elektrischer Energie verbundenen Verbrauchs erschöpflicher Energieträger sowie der CO₂-Äquivalent-Emissionen stammen aus der Herstellung bzw. dem Bau der Anlagenkomponenten. Abb. II-8 (links) zeigt dies exemplarisch anhand der Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen des Referenzsystems Co-Ferm 50 GVE ohne Wärmeauskopplung. Rund 39 % der Emissionen werden dabei durch den Bau von Mischgrube, Nachgärbehälter und Zwischenlager verursacht. In diesem Zusammenhang spielen vor allem die Bereitstellung der für den Bau dieser Komponenten benötigten Materialien wie Beton und Stahl eine Rolle. Der Anteil an den gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen der weiteren baulichen Aufwendungen für das Gebäude mit BHKW und den sonstigen technischen Einrichtungen sowie für den Fermenter liegt bei etwa 29 %, so dass in Summe rund 68 % der CO₂-Äquivalent-Emissionen aus dem Bau der Anlage herrührt. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen aus dem Betrieb der Anlage stammen aus den Aufwendungen für Wartung und Instandhaltung (z. B. Schmiermittel, Dichtungen) sowie aus den beim Verbrennungsprozess auftretenden direkten Emissionen von Methan und Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O). Der Abriss der Anlage zeigt demgegenüber nur einen geringen Beitrag zu den Gesamtemissionen. Die Unterschiede zwischen den Systemen Co-Ferm 50 GVE und Co-Ferm 100 GVE (ohne Wärmeauskopplung) ergeben sich dabei durch die i. Allg. mit zunehmender Anlagengröße sinkenden spezifischen baulichen Aufwendungen. Das System 100 GVE ist dagegen aufgrund des geringeren spezifischen Gasertrags durch einen deutlich höheren Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie höhere CO₂-Äquivalent-Emissionen gekennzeichnet.

Tabelle II-12 Energie- und Emissionsbilanzen einer landwirtschaftlichen Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas (Zahlen gerundet)

System		Co-Ferm 50 GVE		100 GVE		Co-Ferm 100 GVE	
el. Netto-Arbeit	in MWh/a	101,2	101,2	85,0	85,0	216,9	216,9
Wärmenachfrage	in GJ/a	0	144	0	144	0	144
Energie	in GJ _{prim} /TJ ^a	213	153	343	234	189	159
SO ₂	in kg/TJ	1 019	730	977	664	948	800
NO _x	in kg/TJ	620	445	605	411	579	489
CO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	18 560	13 300	27 760	18 870	17 160	14 490
SO ₂ -Äquivalente	in kg/TJ	1 455	1 043	1 403	954	1 355	1 144

^a primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand (Verbrauch erschöpflicher Energieträger)

Die NO_x-, SO₂- und damit auch SO₂-Äquivalent-Emissionen werden demgegenüber fast vollständig durch die bei der energetischen Nutzung des Biogases entstehenden direkten Emissionen bestimmt. In Abb. II-8, rechts ist dies anhand der Aufteilung der NO_x-Emissionen für des Referenzsystems Co-Ferm 50 GVE ohne Wärmeauskopplung dargestellt. Knapp 94 % der gesamten NO_x-Emissionen stammen dabei aus dem Verbrennungsprozess; die Anteile der weiteren betrieblichen Aufwendungen sowie von Bau und Abriss der Anlage sind dagegen nur von untergeordneter Bedeutung.

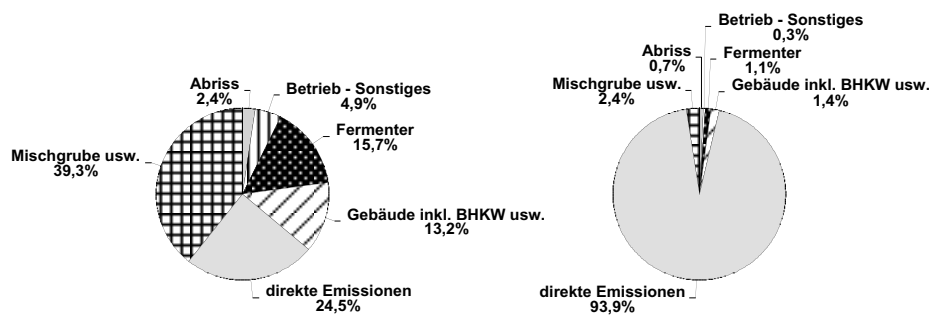


Abb. II-8: Aufteilung der CO₂-Äquivalent-Emissionen (links) und NO_x-Emissionen (rechts) einer Bereitstellung elektrischer Energie aus Biogas durch das Referenzsystem Co-Ferm 50 GVE (ohne Nutzung der Heizwärme)

Durch eine zusätzliche Nutzung der Heizwärme sinken die dargestellten Bilanzergebnisse für eine Bereitstellung elektrischer Energie. Dieser Effekt ist dabei umso stärker, je größer der Anteil der abgegebenen Wärme an der gesamten abgegebenen Energie ist. Dadurch sinken der Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie die Emissionen der diskutierten Schadstoffe der Referenzanlage Co-Ferm 50 GVE (ca. 40 % der Heizwärme werden genutzt) auch stärker als beim Referenzsystem Co-Ferm 100 GVE (ca. 10 % der Heizwärme werden genutzt).



5 Sinnvolle Machbarkeiten und Nutzungsformen

5.1 Analyse der Systemtechnik

Unter Biomasse werden Stoffe organischer Herkunft verstanden, die zur Energiebereitstellung genutzt werden können. Biomasse beinhaltet damit die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere) und die daraus resultierenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (z. B. Exkrememente, Stroh, Schlachthofabfälle).

Biomasse wird i. Allg. unterteilt in Energiepflanzen, Ernterückstände, organische Nebenprodukte und organische Abfälle. Unter ersteren werden ausschließlich zur Energiegewinnung angebaute Pflanzen verstanden (z. B. Kurzumtriebspappeln, Chinaschilf, Energiegetreide). Ernterückstände fallen bei der land- und forstwirtschaftlichen Produktion in Koppelproduktion (z. B. Stroh, Waldrestholz) und organische Nebenprodukte bei der Weiterverarbeitung land- und forstwirtschaftlicher Produkte an (z. B. Gülle, Kappholz, Sägespäne). Organische Abfälle bezeichnet Abfälle organischer Herkunft wie z. B. Klärschlamm.

Diese Biomassen müssen für eine energetische Nutzung zunächst verfügbar gemacht werden (Abb. II-1). In den allermeisten Fällen ist dazu ein Ernte-, Sammel- und/oder Verfügbarmachungsprozess und im Regelfall zusätzlich ein Transportprozess notwendig. In vielen Fällen muss die Biomasse zusätzlich, bevor sie energetisch genutzt werden kann, mechanisch aufbereitet werden (u. a. Zerkleinerung, Verdichtung). Oft wird auch eine Lagerung realisiert, um einen Ausgleich zwischen Biomasseanfall und Energienachfrage zu ermöglichen.

Anschließend kann die Biomasse zur Wärme- und/oder Strombereitstellung bzw. zur Bereitstellung von Kraftstoffen genutzt werden. Dazu ist sie in einen entsprechenden festen, flüssigen und/oder gasförmigen Energieträger zu überführen, der dann unter Energiefreisetzung oxidiert werden kann. Diese Bereitstellung der Bioenergieträger kann realisiert werden durch eine einfache mechanische Aufbereitung (z. B. von biogenen Festbrennstoffen als Hackschnitzel oder Pellets) und/oder durch eine aufwändige thermo-,



physikalisch- bzw. bio-chemische Umwandlung. Bei letzteren werden durch entsprechende Veredelungsprozesse die Eigenschaften der Bioenergieträger hinsichtlich z. B. der Energiedichte, der Handhabung, der Speicher- und Transporteigenschaften, der Umweltverträglichkeit der energetischen Nutzung und/oder dem Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger verändert. Diese Bioenergieträger können dann durch eine Verbrennung in entsprechenden Anlagen in die letztlich gewollte Wärme und/oder den gewünschten Strom bzw. in Kraft (z. B. für den Traktionsbereich) überführt werden (Abb. II-1).

Da die thermo-, physikalisch- und bio-chemische Veredelung nicht notwendigerweise unabhängig von der nachfolgenden Verbrennung der dadurch bereitgestellten Sekundärenergieträger betrachtet werden kann, werden nachfolgend die verschiedenen Veredelungsverfahren jeweils einschließlich der nachfolgenden Umwandlung in End- bzw. Nutzenergie diskutiert. Unabhängig davon kann der biogene Festbrennstoff auch direkt – nach einer vergleichsweise einfachen mechanischen Aufbereitung – durch eine Verbrennung genutzt werden; dies ist einer der "klassischen" Anwendungsfälle der energetischen Biomassenutzung. Diese verschiedenen Optionen werden nachfolgend dargestellt.

Ausschließliche Verbrennung. Bei der klassischen Verbrennung fester Biomasse in entsprechenden Feuerungsanlagen wird i. Allg. unterschieden zwischen dem Einsatz in Kleinst-, Klein- und Großanlagen zur Wärme- und/oder Strombereitstellung. Dabei ist die Wärmebereitstellung in allen Leistungsbereichen seit Jahrzehnten im praktischen Einsatz. Die ausschließliche und/oder gekoppelte Stromerzeugung in Anlagen im MW-Bereich über konventionelle Dampfprozesse (Turbine) ist ebenfalls gängig und hat in Deutschland infolge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) erheblich an Bedeutung gewonnen. Demgegenüber ist die Stromerzeugung im kW-Bereich mit hohen Stromwirkungsgraden bisher kaum technisch darstellbar; alle derzeit diskutierten Optionen zeigen mehr oder weniger starke technische (und ökonomische) Defizite.

Vor diesem Hintergrund können noch vorhandene F&E-Defizite wie folgt zusammengefasst werden:

- Kostengünstige Bereitstellung von biogenen Festbrennstoffen definierter Qualität frei Feuerungsanlage.



- Bessere Abstimmung von Biobrennstoff und Feuerungsanlage und verbesserter Bedienungskomfort.
- Reduktion der verbrennungsbedingten limitierten und nicht limitierten Emissionen bei Kleinanlagen.
- Entwicklung von Schnelltests auch für belastete Hölzer und Halmgüter im Rahmen integrierter Qualitäts-Management-Systeme.
- Entwicklung innovativer Stromerzeugungstechniken mit hohen Stromwirkungsgraden (z. B. Dampfkolbenmotor, Stirlingmotor) insbesondere im kW-Bereich.
- (Weiter-)Entwicklung von Biomassekraftwerken bez. geringeren Emissionen und höheren Stromwirkungsgraden.

Daraus resultieren folgende Perspektiven für eine direkte Verbrennung biogener Festbrennstoffe.

- Wärme wird auch weiterhin durch Feuerungsanlagen aller Leistungsbereiche bereitgestellt werden; dies manifestiert sich auch durch die deutliche Aufwärts-Entwicklung auf dem Pelletsmarkt.
- Eine Stromerzeugung in Anlagen der MW-Klasse wird weiter an Bedeutung gewinnen; durch die infolge des EEG veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die dadurch entstandenen Märkte wird auch die Anlagentechnik (und damit die Wirkungsgrade) zukünftig moderat verbessert werden.
- Eine Stromerzeugung im kW-Bereich besitzt aufgrund des dezentralen Biomasseanfalls hohe Marktpotenziale, die aber bisher mangels verfügbarer Technik kaum erschlossen werden können; auch ist hier bisher kein signifikanter technischer Durchbruch erkennbar.

Thermo-chemische Umwandlung. Bei den thermo-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse primär unter dem Einfluss von Wärme, durch die aus biogenen Festbrennstoffen gasförmige, flüssige und/oder feste Sekundärenergieträger hergestellt werden können. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Vergasung, der Verkohlung und der Pyrolyse (Abb. II-1).

Vergasung. Bei der Vergasung wird Biomasse bei hohen Temperaturen möglichst vollständig in brennbare Gase umgewandelt. Dazu wird dem Prozess unterstöchiometrisch ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel (z. B. Luft) zugeführt. Dieser Sauerstoff wird benötigt, um den in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff über diverse Zwischenstufen zu



Kohlenstoffmonoxid (CO) zu vergasen. Dazu wird durch eine teilweise Verbrennung des Einsatzmaterials die erforderliche Prozesswärme bereitgestellt. Das produzierte Brenngas kann anschließend in Motoren, Turbinen oder ggf. in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung eingesetzt werden (dies ist der gegenwärtig präferierte Umwandlungspfad) oder – und das ist in der letzten Zeit vermehrt in die Diskussion gekommen – zu flüssigen Bioenergieträgern umgewandelt werden (z. B. Methanol).

Eine großtechnische Stromerzeugung aus Biomasse über die Vergasung ist derzeit noch nicht vollständig kommerziell verfügbar, obwohl insbesondere dies das Ziel laufender Entwicklungsbemühungen ist. Wesentliche F&E-Defizite können wie folgt zusammengefasst werden.

- Grundlagenorientierte Untersuchungen des Vergasungsverhaltens unterschiedlichster Biomassefraktionen.
- Systematische Analyse von Primärmaßnahmen zur Reduktion unerwünschter Gasbegleitstoffe in Fest- und Bewegtbett-Vergasern.
- (Weiter-)Entwicklung innovativer Gasreinigungsverfahren.
- Anpassung vorhandener Konversionsanlagen (z. B. Motoren, Turbinen, Brennstoffzellen) an kostengünstig erreichbare Gasqualitäten.
- Verbesserte Integration der verschiedenen Systemelemente zu funktionierenden Gesamtsystemen.
- Grundlagen- und umsetzungsorientierte Untersuchungen zur Bereitstellung alternativer Kraftstoffe (z. B. Methanol).

Ausgehend davon können für die Vergasung aus gegenwärtiger Sicht folgende Perspektiven abgeleitet werden.

- Die Vergasung erscheint aufgrund der grundsätzlich erreichbaren hohen Wirkungsgrade als eine wesentliche Zukunftsoption zur Stromerzeugung aus nahezu allen Fraktionen an biogenen Festbrennstoffen. Dies gilt – mit bestimmten Einschränkungen – auch für die Bereitstellung von flüssigen Bioenergieträgern.
- Die z. T. sehr erfolgreichen Entwicklungsarbeiten der letzten Jahre, insbesondere auch in Schweden, in Österreich und z. T. in Deutschland, lassen die Hoffnung zu, dass die Anlagentechnik zur Stromerzeugung im Verlauf der nächsten Jahre verfügbar sein könnte. Trotzdem ist in der übersehbaren Zukunft aufgrund nach wie vor erheblicher technischer und ökonomischer Defizite nicht zu erwarten, dass die Vergasung zur Stromerzeugung einen substanziellen Beitrag leisten können.



- Bezüglich der politisch gewollten Bereitstellung von flüssigen Bioenergieträgern für den Verkehrssektor erscheint die Vergasung vielversprechend; aber aufgrund der doch noch erheblichen zu überwindenden technischen und ökonomischen Probleme wird die dafür benötigte Technologie mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mittelfristig noch nicht großtechnisch zur Verfügung stehen.

Verkohlung. Darunter wird eine Veredelung von fester Biomasse mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an Festbrennstoff (Holzkohle) verstanden. Das organische Material wird dabei thermisch zersetzt, wobei die erforderliche Prozesswärme häufig durch eine Teilverbrennung des Rohstoffs bereit gestellt wird. Die bei der Verkohlung ablaufenden thermo-chemischen Prozesse unterscheiden sich also nicht grundsätzlich von denen der Vergasung; sie laufen nur unter anderen Prozessbedingungen ab und führen deshalb zu einem teilweise anderen Ergebnis.

Die Verkohlung von Biomasse im großtechnischen Maßstab in Deutschland wird derzeit fast ausschließlich zur stofflichen Nutzung der produzierten Holzkohle (z. B. Aktivkohle) oder zum Einsatz als Grillholzkohle realisiert. Holzkohle als Energieträger wird dagegen in industrialisierten Ländern wie Deutschland kaum großtechnisch genutzt. Ein solcher Einsatz als Energieträger erscheint auch aus energetischen und ökologischen Gründen wenig sinnvoll; deshalb wird diese Option hier nicht näher betrachtet.

Pyrolyse. Bei der Pyrolyse wird (feste) Biomasse unmittelbar unter kurzfristiger Hitzeeinwirkung in einen gasförmigen, flüssigen und festen Sekundärenergieträger umgewandelt, indem die langkettigen organischen Moleküle unter Wärmeeinfluss aufgebrochen werden. Wird die flüssige Fraktion abgetrennt und anschließend aufbereitet, kann das dabei anfallende Bioöl u. U. in Motoren und/oder Turbinen zur Strom- und ggf. Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Ein Einsatz im Verkehrssektor ist grundsätzlich auch denkbar, ist jedoch bisher aufgrund der meist ungünstigen brennstofftechnischen Eigenschaften des Bioöls kaum eine ernstzunehmende Option.

Derartige Verfahren befinden sich bisher noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Aus gegenwärtiger Sicht ist – aufgrund der nur eingeschränkt vorhandenen Technik – auch nicht davon auszugehen, dass die Pyrolyse unter den heute gegebenen Randbedingungen und dem vorhandenen Stand der Technik einen



energiewirtschaftlich relevanten Beitrag zur Deckung der Energienachfrage in Deutschland wird leisten können. Wesentliche F&E-Defizite können wie folgt zusammengefasst werden.

- Grundlagenorientierte Untersuchungen zur pyrolytischen Zersetzung biogener Festbrennstoffe zur Identifikation wesentlicher physikalisch-chemischer bzw. verfahrenstechnischer Einflussgrößen.
- Kostengünstige Aufbereitungsverfahren zur Sicherstellung definierter und stabiler Bioöl-Qualitäten.
- Anpassung vorhandener Motoren an verfügbare bzw. einfach erreichbare Bioöl-Qualitäten.
- Analyse und Quantifizierung von Märkten für bestimmte Bioöl-Fractionen – aus ökonomischen Gründen – insbesondere auch für die stoffliche Nutzung.
- Konzepte zur Bereitstellung sowie stofflichen und energetischen Nutzung von Pyrolyseprodukten.

Ausgehend davon können für die Pyrolyse folgende Perspektiven aus gegenwärtiger Sicht abgeleitet werden.

- Die Pyrolyse befindet sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium und dürfte dieses – ausgehend von den Erfahrungen der Vergangenheit – aufgrund einer ganzen Reihe grundsätzlicher Probleme auch in übersehbarer Zukunft kaum verlassen.
- Diese Option zu Veredlung biogener Festbrennstoffe wird in den nächsten Jahren nur dann eine Marktnische kommerziell erschließen können, wenn es gelingt, aufgrund ökonomischer Zwänge die stoffliche und energetische Nutzung gewinnbringend zu verbinden; dies ist aber bisher kaum erkennbar.

Physikalisch-chemische Umwandlung. Die Gewinnung von Pflanzenöl beispielsweise aus Raps- oder Sonnenblumensaat erfolgt durch Pressung und/oder Extraktion des in den organischen Stoffen enthaltenen Öls. Beim Pressen der ölhaltigen Biomasse (d. h. der Saat) wird die flüssige Ölphase mechanisch von der festen Phase, dem sogenannten Presskuchen, getrennt. Bei der Extraktion dagegen wird der ölhaltigen Saat der Ölinhalt mit Hilfe eines Lösemittels entzogen; als Feststoff bleibt das sogenannte Extraktionsschrot zurück. Hierdurch können im Vergleich zur Pressung deutlich niedrigere Restölgehalte erzielt werden. Daher wird insbesondere bei der für Deutschland wichtigsten Ölsaart, dem Raps, häufig auch eine Kombination aus Pressung und (nachgeschalteter) Extraktion gewählt. Dieses Pflanzenöl kann grundsätzlich in Reinform in Motoren und Heiz- bzw. Heizkraftwerken (d. h. BHKW)



als Brennstoff energetisch eingesetzt werden; problematisch ist jedoch die nur eingeschränkte Verfügbarkeit von pflanzenöлтаuglichen Motoren.

Durch einen nachfolgenden chemischen Umwandlungsprozess, der Umesterung, kann das gewonnene Pflanzenöl u. a. hinsichtlich Viskosität, Dichte und Zündwilligkeit an die Eigenschaften von konventionellem Dieselmotoren angepasst werden. Der in Deutschland bekannteste Pflanzenölester ist Rapsölmethylester (RME). Er wird durch Umesterung von Rapsöl mit Methanol produziert und kann – bei einer entsprechenden Freigabe der Motorenhersteller – als Dieselerersatz genutzt werden. Alternativ ist auch ein Einsatz in Blockheizkraftwerken zur gekoppelten Wärme- und Strombereitstellung möglich. Dies ist Stand der Technik.

Wesentliche noch vorhandene F&E-Defizite können wie folgt zusammengefasst werden.

- Bessere Anpassung der Pflanzenölherstellung bzw. insbesondere –aufbereitung an die Anforderungen der jeweiligen Umesterungsprozesse.
- Verbesserung bzw. verbesserte Anpassung der Motorentechnik für den Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl.
- Optimierung der Umesterung sonstiger pflanzlicher und tierischer Öle und Fette wie z. B. Tierfette aus Tierkörperbeseitigungsanstalten.

Ausgehend davon können aus gegenwärtiger Sicht für die Pflanzenöl- bzw. RME-Gewinnung und Nutzung folgende Perspektiven abgeleitet werden.

- Pflanzenöl als Brenn- und Treibstoff für Motoren wird – infolge der nur eingeschränkt vorhandenen Technik und der in Deutschland relativ geringen vorhandenen Potenziale – auch zukünftig nur Nischenanwendungen finden.
- RME und andere Methylester werden ihre Marktpräsenz in den nächsten Jahren ausdehnen, zumal die vorhandenen Märkte infolge der einfachen Substitution von konventionellem Dieselmotoren – und der für viele marktgängige Motoren vorliegenden Herstellerfreigabe – gewaltig sind. Aufgrund des durch die Anbaumöglichkeiten in Deutschland beschränkten technischen Potenzials und der grundsätzlich sehr hohen Kosten können aber auch derartige Treibstoffe immer nur einen relativ kleinen Beitrag zur Deckung der Nachfrage insbesondere im Verkehrssektor leisten, auch wenn zukünftig vermehrt Pflanzenöle importiert werden sollten.



Bio-chemische Umwandlung. Bei den bio-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung von Biomasse in einfacher nutzbare Sekundärenergieträger mit Hilfe von Mikroorganismen.

Alkoholgärung. Zucker-, stärke- und cellulosehaltige Biomasse kann durch eine alkoholische Gärung in Ethanol überführt werden, der anschließend in Reinform gewonnen werden kann. Ethanol kann als Treib- und Brennstoff in Motoren oder Verbrennungsanlagen zur Bereitstellung von Kraft, Strom und Wärme eingesetzt werden. Obwohl die Erzeugung von Trinkalkohol Stand der Technik ist, hat sich bisher eine Alkoholherstellung als Energieträger nicht in Deutschland – auch aufgrund der hohen damit verbundenen Kosten – durchsetzen können.

Wesentliche sich abzeichnende F&E-Defizite können wie folgt zusammengefasst werden.

- Entwicklung von energieeffizienten Konzepten zur großtechnischen Ethanolerzeugung aus zucker- und stärkehaltigen Biomassen möglichst in Kombination mit vorhandenen Anlagen z. B. zur Zuckerherstellung aus Zuckerrüben als Annex-Anlage.
- Grundlagenorientierte Untersuchungen zu den Möglichkeiten einer Verzuckerung cellulosehaltiger Biomassen und Erarbeitung von Ansätzen zur innovativen Umsetzung derartiger Möglichkeiten in energieoptimierte, verfahrenstechnische Prozesse.
- Erarbeitung und Bewertung von Markteinführungskonzepten und -strategien für alkoholbasierte Kraftstoffe auch im europaweiten Kontext.

Ausgehend davon können für die Alkohol-Gewinnung und Nutzung aus gegenwärtiger Sicht folgende Perspektiven abgeleitet werden.

- Infolge der durchaus beachtlichen Potenziale und der einfachen Zumischbarkeit von Alkohol zu konventionellem Otto-Kraftstoff erscheint eine Bioalkoholproduktion und –nutzung aus zucker- und stärkehaltigen Ausgangsstoffen grundsätzlich als vielversprechend; dies gilt auch aufgrund der Erfahrungen in einigen anderen Ländern (z. B. USA, Brasilien). Jedoch ist aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten nicht zu erwarten, dass diese Option in der übersehbaren Zukunft – und damit auf der Basis der jetzt und heute vorhandenen energiewirtschaftlichen Randbedingungen – an Bedeutung gewinnen wird.
- Vielversprechend könnte unter bestimmten Bedingungen auch eine Alkoholgewinnung aus cellulosehaltiger Biomasse sein; hier ist deshalb in den nächsten Jahren forciert die



entsprechende Verfahrenstechnik zu entwickeln. Ausgehend davon wird sich zeigen, inwieweit solche technische Verfahren unter den dann vorliegenden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine Chance am Markt haben werden.

Anaerobe Fermentation. Beim anaeroben Abbau organischer Stoffe, d. h. dem Abbau unter Sauerstoffabschluss, entsteht in entsprechenden Reaktoren ein wasserdampfgesättigtes Mischgas (Biogas), das zu 55 bis 70 % aus Methan besteht. Es kann – ggf. nach einer entsprechenden Reinigung – in Motoren zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung genutzt werden. Anlagen zur anaeroben Fermentation sind beispielsweise bei der Klärschlammstabilisation Stand der Technik; jede Kläranlage mit biologischer Klärstufe verfügt i. Allg. über eine Biogasanlage, deren Gas in einem Gasmotor oder einem Blockheizkraftwerk (BHKW) genutzt wird. Auch für die Vergärung von Gülle – ggf. in Kofermentation mit anderen organischen Abfällen (z. B. Speiseöl) – und die anschließende Gasnutzung in Motoren mit gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl von Anlagen – primär infolge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) – errichtet. Dabei kann die Gaserzeugung und –nutzung aus Gülle als am Markt verfügbar angesehen werden.

Wesentliche noch vorhandene F&E-Defizite können wie folgt zusammengefasst werden.

- Identifikation wesentlicher Steuergrößen der Biogaserzeugung aus unterschiedlichen Substraten bzw. Substratgemischen und sicherere sowie verbesserte Steuerung und Regelung des Vergärungsprozesses anhand dieser Steuergrößen in Praxisanlagen.
- Entwicklung standardisierter und bedienungssicherer Gärtests zur Erzielung von auf Praxisanlagen übertragbaren Ergebnissen.
- Vereinfachung und Verbesserung der Biogasreinigung (z. B. H₂S-Entzug).
- Reduktion der Emissionen beim Biogaseinsatz in Motoren.
- Erarbeitung von weitergehenden Konzepten zur Wärmenutzung (z. B. Kälte aus Wärme).
- Analyse der Möglichkeiten eines Biogaseinsatzes im Traktionsbereich z. B. bei der Biomüll-Entsorgung.

Ausgehend davon können für die Biogas-Gewinnung und Nutzung aus gegenwärtiger Sicht folgende Perspektiven abgeleitet werden.

- Aufgrund des EEG wird eine Biogasgewinnung und Nutzung in den nächsten Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen; dies gilt primär für den landwirtschaftlichen Bereich.



- Die vorhandene Technik insbesondere für den landwirtschaftlichen Bereich muss weitentwickelt, kostengünstiger und insbesondere betriebssicherer gestaltet werden; erste derartige Entwicklungen sind bereits erkennbar.
- Der Einsatz von Biogas im Traktionsbereich könnte an Bedeutung gewinnen; dafür sind die technischen Voraussetzungen zu erarbeiten.
- Die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz erscheint unter energetischen Aspekten als potenziell vielversprechend. Die technisch sehr aufwändige Aufbereitung und die oft schwer zu realisierende Netzanbindung lassen – vor dem Hintergrund der vorhandenen energiewirtschaftlichen Randbedingungen – kaum erwarten, dass diese Option in den kommenden Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen wird.

Aerober Abbau. Hier wird die Biomasse mit Luftsauerstoff unter Wärme- und CO₂-Freisetzung oxidiert (d. h. Kompostierung). Die frei werdende Wärme kann z. B. mit Hilfe von Wärmepumpen gewonnen und in Form von Niedertemperaturwärme genutzt werden. Jedoch ist u. a. der Entzug der Wärme aus dem Kompost noch nicht zufriedenstellend gelöst. Auch sind – aus gegenwärtiger Sicht – die entsprechenden Potenziale gering. Deshalb wird diese Option hier nicht näher betrachtet.



5.2 Analyse der Potenziale und deren Nutzung

Tabelle II-13 Potenziale und Nutzung von Biomasse zur Stromerzeugung; Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas genutzt werden kann oder die vorhandene Fläche nur einmal (z. B. zur Produktion von Festbrennstoffen, Flüssigenergieträgern oder Biogas) genutzt werden kann (verschiedene Quellen, eigene Berechnungen)

	Technische Brennstoffpotenziale in PJ/a	Technische Erzeugungspotenziale in TWh/a (in GW)	Technische Endenergiepotenziale in TWh/a	Nutzung in TWh/a (in GW)
Biogene Festbrennstoffe	130 (Stroh)			
	178 (Waldrestholz)			
	130 (Schwachh.) ^b			
	140 (Zuwachs)	75 – 106 (10 – 21) ^f		
	58 (Ind.restholz) ^a	100 – 142 ^g	71 – 135	2,4 (0,7) ^k
	4 (Landschaftspflege)			
Biotreibstoffe	80 – 112 (Altholz)			
	max. 333 – 422 (E-pfl.) ^b			
	max. 102 ^c	max. 9,2 (4,6) ^h	max. 8,7	
	max. 120 – 195 ^d	max. 17,3 (8,7) ^h	max. 16,4	
Biogas aus Organischen Nebenprodukten und Abfällen	96 (Exkrememente) ^e			
	65 – 113 (Ernterückst.) ^e			
	6 – 12 (Gew.-, Ind.abf.) ^e			
	6 – 12 (Landschaftspfl.) ^e	41 – 47 (8 – 16) ⁱ		
	max. 236 (Energiepfl.) ^{b,e}	1,9 – 3,2 ^j	41 – 48	
	12 (org. Siedlungsabf.) ^e			
	20 (Klärgas) ^e			
	15 – 21 (Deponiegas) ^e			

^aenergetisch nutzbarer Anteil; ^b Energiepflanzen auf maximal 2 Mio. ha; ^c Pflanzenöl bzw. RME auf max. 2 Mio. ha (zusätzlich wäre noch das Stroh (125 PJ/a) und das Schrot (65 PJ/a) energetisch nutzbar); ^d Alkohol aus Weizen (zusätzlich wäre noch das Stroh (165 PJ/a) energetisch nutzbar) bzw. Zuckerrüben auf max. 2 Mio. ha; ^e Brutto-Gaserträge; ^f ausschließlich mit biogenen Festbrennstoffen gefeuerte Anlagen der 20 MW-Klasse; ^g ausschließlich Zufeuerung in vorhandenen Kohlekraftwerken der neuesten Generation; ^h Einsatz in BHKW zur Wärmenachfragedeckung (ca. 2 000 h/a); ⁱ Biogas; ^j Klärschlamm (nicht stofflich nutzbarer Anteil) zur Zufeuerung in vorhandenen Kohlekraftwerken der neuesten Generation; ^k gesamte Stromerzeugung aus Biomasse (d. h. feste, flüssige und gasförmige Bioenergieträger), soweit statistisch erfasst und abschätzbar.

l) bei Brusthöhendurchmesser 8 cm - < 16 cm.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen technischen Potenziale und die derzeitige Nutzung aufgezeigt.

Potenziale. Bei der Analyse der Potenziale wird unterschieden zwischen den Potenzialen der Möglichkeiten zur Strom- und zur Wärmebereitstellung sowie zur



Bereitstellung von Kraftstoffen. Dabei beschreiben die ausgewiesenen technischen Potenziale den technisch realisierbaren Beitrag der Biomasse zur Deckung der Energienachfrage und zwar

- bei den Brennstoffpotenzialen die Energie der technisch bereitstellbaren Bioenergieträger,
 - bei den Erzeugungspotenzialen die technisch bereitstellbare End- bzw. Nutzenergie ohne und
 - bei den Endenergiepotenzialen unter Berücksichtigung nachfrageseitiger Restriktionen.
- Letztere bilden damit den Beitrag zur Deckung der End- bzw. Nutzenergienachfrage in Deutschland am besten ab.

Tabelle II-14 Potenziale und Nutzung von Biomasse zur Wärmebereitstellung; Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas genutzt werden kann oder die vorhandene Fläche nur einmal genutzt werden kann (verschiedene Quellen, eigene Berechnungen)

	Technische Brennstoffpotenziale in PJ/a	Technische Erzeugungspotenziale in PJ/a	Technische Endenergiepotenziale in PJ/a	Nutzung in PJ/a
Biogene Festbrennstoffe	130 (Stroh)	756 – 1 071	718 – 1 017	ca. 187
	178 (Waldrestholz)			
	130 (Schwachh.) ^{k)}			
	140 (Zuwachs)			
	58 (Ind.restholz) ^{a)}			
	4 (Landschaftspflege)			
Biotreibstoffe	80 – 112 (Altholz)	max. 62 ^{f)} max. 117 ^{f)}	max. 59 max. 111	ca. 0,04 ⁱ⁾
	max. 333 – 422 (E-pfl.) ^{b)}			
	max. 102 ^{c)} max. 120 – 195 ^{d)}			
Biogas aus Organischen Nebenprodukten und Abfällen	96 (Exkrementen) ^{e)}	295 – 338 ^{g,h)}	280 – 321 ^{g,h)}	4,4 – 5,8 ^{j)}
	65 – 113 (Ernterückst.) ^{e)}			
	6 – 12 (Gew.-, Ind.abf.) ^{e)}			
	6 – 12 (Landschaftspfl.) ^{e)}			
	max. 236 (Energiepfl.) ^{b,c)}			
	12 (org. Siedlungsabf.) ^{e)}			
	22 (Klärgas) ^{e)}			
	15 – 21 (Deponiegas) ^{e)}			

^{a)} energetisch nutzbarer Anteil; ^{b)} Energiepflanzen auf maximal 2 Mio. ha; ^{c)} Pflanzenöl bzw. RME auf max. 2 Mio. ha (zusätzlich wäre noch das Stroh (125 PJ/a) und das Schrot (65 PJ/a) energetisch nutzbar); ^{d)} Alkohol aus Weizen (zusätzlich wäre noch das Stroh (165 PJ/a) energetisch nutzbar) auf max. 2 Mio. ha; ^{e)} Brutto-Gaserträge; ^{f)} Einsatz im BHKW (d. h. nur die zusätzlich zur elektrischen Energie bereitgestellte Wärme); ^{g)} sämtliches Biogas einschl. Energiepflanzen auf 2 Mio. ha und Deponiegas; ^{h)} gesamte potenzielle Wärmebereitstellung bei einer unterstellten vollständigen Biogasnutzung in BHKW; ⁱ⁾ berechnet, nur Anlagen mit RME; ^{j)} nur Wärme aus BHKW (landwirtschaftliches Biogas und Klärgas, Wärme aus Deponiegas-BHKW als nicht nutzbar unterstellt).

k) bei Brusthöhendurchmesser 8 cm - < 16 cm.

Stromerzeugung. Tabelle II-13 zeigt die Potenziale der Biomasse zur Stromerzeugung. Demnach wird deutlich, dass in Deutschland durchaus energiewirtschaftlich relevante



Potenziale einer Stromerzeugung aus Biomasse gegeben sind, die primär aus den biogenen Festbrennstoffen und sekundär aus einer möglichen Biogaserzeugung resultieren. Verglichen damit sind die Möglichkeiten einer Stromerzeugung aus flüssigen Bioenergieträgern eher begrenzt.

Wärmebereitstellung. Tabelle II-14 zeigt die Potenziale der Biomasse zur Wärmebereitstellung. Auch hier werden erhebliche Potenziale mit ebenfalls energiewirtschaftlicher Relevanz deutlich. Sie resultieren – ähnlich wie die Potenziale zur Strombereitstellung – primär aus biogenen Festbrennstoffen und erst in zweiter Linie aus einer möglichen Biogaserzeugung; infolge der derzeitigen Marktentwicklung handelt es sich bei letzterer Option primär um eine Nutzung der in KWK bereitgestellten Wärme. Verglichen damit sind die Möglichkeiten einer Wärmeerzeugung aus flüssigen Bioenergieträgern – ebenfalls ausschließlich in KWK – eher begrenzt.

Krafterzeugung im Traktionsbereich. Tabelle II-15 zeigt die Potenziale der Biomasse zur Krafterzeugung im Traktionsbereich. Demnach sind in Deutschland auch hier durchaus erhebliche Potenziale vorhanden, die als energiewirtschaftlich relevant zu bezeichnen sind; dies gilt selbst vor dem Hintergrund der doch beachtlichen Energienachfrage im Verkehrssektor. Zu beachten ist jedoch, dass die Technik zur Bereitstellung flüssiger Sekundärenergieträger, um diese Potenziale auf der Basis biogener Festbrennstoffe einerseits und von Biogas andererseits für den Traktionsbereich zu erschließen, bisher nur sehr eingeschränkt vorhanden sind.



Tabelle II-15 Potenziale und Nutzung von Biomasse zur Kraftbereitstellung; Zahlen sind nicht addierbar, da Biomasse z. B. nur als Festbrennstoff oder als Biogas genutzt werden kann oder die vorhandene Fläche nur einmal genutzt werden kann (verschiedene Quellen, eigene Berechnungen)

	Technische Brennstoffpotenziale in PJ/a	Technische Erzeugungspotenziale in TWh/a	Technische Endenergiepotenziale in TWh/a	Nutzung in TWh/a
Biogene Festbrennstoffe	130 (Stroh)	34 – 81 ^f	32 – 77	≈ 0
	178 (Waldrestholz)			
	130 (Schwachh.) ⁱ⁾			
	140 (Zuwachs)			
	58 (Ind.restholz) ^a			
	4 (Landschaftspflege)			
Biotreibstoffe	80 – 112 (Altholz)	max. 10 ^g max. 19 ^g	max. 9 max. 18	ca. 4
	max. 333 – 422 (E-pfl.) ^b			
	max. 102 ^c max. 120 – 195 ^d			
Biogas aus Organischen Nebenprodukten und Abfällen	96 (Exkrementen) ^e	26 – 46 ^h	25 – 44	≈ 0
	65 – 113 (Ernterückst.) ^e			
	6 – 12 (Gew.-, Ind.abf.) ^e			
	6 – 12 (Landschaftspfl.) ^e			
	max. 236 (Energiepfl.) ^{b,e}			
	12 (org. Siedlungsabf.) ^e			
22 (Klärgas) ^e				
	15 – 21 (Deponiegas) ^e			

^a energetisch nutzbarer Anteil; ^b Energiepflanzen auf maximal 2 Mio. ha; ^c Pflanzenöl bzw. RME auf max. 2 Mio. ha (zusätzlich wäre noch das Stroh (125 PJ/a) und das Schrot (65 PJ/a) energetisch nutzbar); ^d Alkohol aus Weizen (zusätzlich wäre noch das Stroh (165 PJ/a) energetisch nutzbar) auf max. 2 Mio. ha; ^e Bruttogaserträge; ^f Umwandlungswirkungsgrade der Methanolsynthese von 40 bis 70 % und der motorischen Nutzung von 30 bis 35 % unterstellt; ^g Umwandlungswirkungsgrad im Motor von 30 bis 35 %; ^h Aufbereitungswirkungsgrad einschließlich Verteilungsverluste von rund 70 bis 90 % und Umwandlungswirkungsgrad im Motor von 30 bis 35 %.

i) bei Brusthöhendurchmesser 8 cm - < 16 cm.

Nutzung. Die Bereitstellung von Wärme und/oder Strom aus Biomasse erfolgt in Deutschland aus biogenen Festbrennstoffen sowie flüssigen und gasförmigen Bioenergieträgern. Im Folgenden werden die entsprechenden Anteile diskutiert. Zusammengenommen werden für den derzeit erfassten Anlagenpark zur Stromerzeugung aus Biomasse mit rund 1 271 Anlagen und einer gesamten installierten Leistung von ca. 510 MW für das Jahr 2000 (geschätzte rund 700 MW für 2001) eine Netzeinspeisung von 1,4 TWh/a (geschätzte 2,4 TWh für 2001) angegeben; es ist jedoch zu vermuten, dass die tatsächliche Stromerzeugung höher liegt. Zusätzlich zu dieser ungenügend statistisch erfassten Stromerzeugung kommt noch die nicht bzw. kaum statistisch erfasste bereitgestellte Wärme.



Feste Bioenergieträger. In Deutschland dürften derzeit ca. 8 Mio. Kleinanlagen (d. h. Anlagen unter 15 kW; im Wesentlichen Kachelöfen, Kaminöfen, Heizkamine und offene Kamine) betrieben werden. Im Mittel werden rund 36 % dieser Feuerungsanlagen als ständige Wärmequelle betrieben.

Bei den Kleinanlagen (d. h. Anlagen zwischen 15 kW und 1 MW bei holzartigen Biomassen bzw. 15 kW und 100 kW bei halmgutartigen Bioenergieträgern) kann von rund 280 000 in Betrieb befindlichen Anlagen in Haushalten, im Gewerbe und in der Industrie ausgegangen werden.

Besonders bemerkenswert ist die Entwicklung der mit Holzpellets betriebenen Heizungen. Sie werden als Kleinst- und Kleinanlagen zur Nutz- und Brauchwassererwärmung eingesetzt und bieten damit in Verfügbarkeit und Handhabung eine Alternative zu Heizöl oder Erdgas. 1998 waren ca. 370 derartiger Anlagen in Betrieb, 2001 bereits über 13 500 (< 15 kW ca. 4 800; > 15 kW ca. 8 700).

Die Anzahl der Großanlagen (d. h. Anlagen mit über 1 MW bei holzartigen bzw. 100 kW Leistung bei halmgutartigen Bioenergieträgern) beläuft sich auf rund 1 000; diese sind immer noch vor allem in der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie zu finden.

In den genannten Feuerungsanlagen werden zur Zeit etwa 220 PJ/a an biogenen Festbrennstoffen genutzt; knapp die Hälfte davon laufen über den Brennstoffhandel, ca. 25 % haben ihren Ursprung in der Waldrestholznutzung und die restlichen 25 % sind Industrierest- und Althölzer. Sonstige holzartige Biomassen leisten ebenso wie Stroh nur einen sehr geringen Beitrag zur Deckung der Energienachfrage.

Ein Teil dieser Anlagen wird primär und/oder ausschließlich zur Stromerzeugung eingesetzt. Hier hat sich die Zahl der bekannten Anlagen in den letzten Jahren merklich erhöht – infolge des EEG und der Biomasseverordnung – bei auch zukünftig deutlich weiter steigender Tendenz.

Abb. II-9 zeigt ohne Anspruch auf Vollständigkeit den bekannten Anlagenbestand und eine vorsichtige Prognose der zukünftigen Entwicklung auf der Basis der derzeit in Planung befindlichen Anlagen. Demnach wird der Anlagenbestand momentan durch Anlagen unter 5 MW elektrischer Leistung bestimmt. Jedoch dürfte der weitere Zuwachs bei diesen Anlagen eher gering sein. Der erwartete deutliche Anstieg des Anlagenbestandes in den kommenden Jahren infolge der Vergütungsregelung von EEG und Biomasseverordnung dürfte tendenziell eher durch Anlagen im größeren Leistungsbereich (d. h. Anlagen der 20 MW-Klasse) realisiert werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass nicht alle geplanten Anlagen (Abb. II-2)

auch de facto realisiert werden; derzeit wird damit gerechnet, dass nur maximal ca. 20 bis 30 % der geplanten Anlagen auch in Betrieb gehen werden. Dies würde bedeuten, dass die Ende 2001 in derartigen Anlagen installierten rund 277 MW bis zum Jahr 2004 auf rund 600 MW elektrischer Leistung ansteigen dürften.

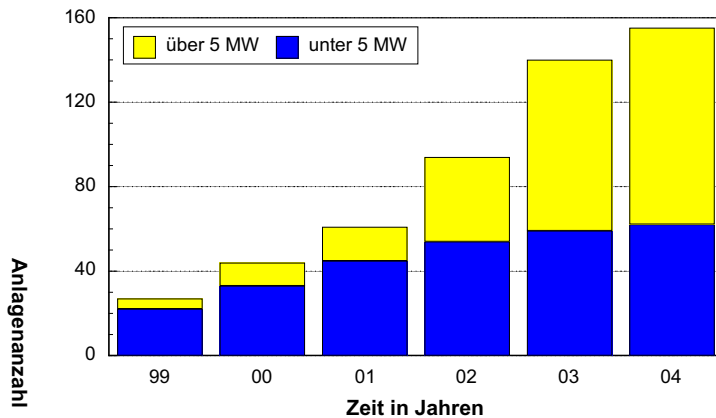


Abb. II-9: (Heiz-)Kraftwerke auf der Basis biogener Festbrennstoffe einschließlich der derzeit geplanten Anlagen

Daneben gibt es weitere Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung, die mit Biomasse und fossilen Brennstoffen betrieben werden (u. a. auch Müllverbrennungsanlagen). 1999 wurden beispielsweise aus den rund 37 statistisch erfassten Müllverbrennungsanlagen mit einer installierten Leistung von rund 522 MW etwa 2,65 TWh/a an elektrischer Energie eingespeist. Dabei stammt diese Energie, da bei den Erhebungen keine Trennung zwischen dem nativ-organischen (regenerativen) und dem aus fossilen Energieträgern resultierenden Abfallaufkommen gemacht wird, auch aus Abfällen nicht regenerativen Ursprungs.

Zusätzlich fällt kommunaler und industrieller Klärschlamm an, der in kommunalen und betrieblichen Mono-Klärschlamm-Verbrennungsanlagen, in Hausmüllverbrennungsanlagen und in vorhandenen Kohlekraftwerken, in der Zementindustrie, bei der Ziegelherstellung und der Pyritröstung eingesetzt werden kann. Wird näherungsweise von einem thermisch behandelten Klärschlammaufkommen von 0,6 Mio. t TM (2000) ausgegangen, entspricht dies bei mittleren Heizwerten einem Energieträgeraufkommen zwischen 7 und knapp 9 PJ/a.

Flüssige Bioenergieträger. Als flüssige Bioenergieträger werden fast ausschließlich Rapsölmethylester (RME) und Rapsöl genutzt. 2001 wurden – bei einer in Deutschland vorhandenen Verarbeitungskapazität von rund 514 000 t/a und einer im Bau befindlichen



bzw. geplanten Verarbeitungskapazität von 354 000 t/a bzw. über 400 000 t/a – beispielsweise etwa 400 000 t RME (Biodiesel) primär im Verkehrssektor (ca. 15 bis 16 PJ/a) und zu deutlich kleineren Teilen in Stationäranlagen eingesetzt; weitere 120 000 t wurden in der Oleochemie und rund 45 000 t als Schmierstoffe und Hydrauliköle genutzt. Zusätzlich dürften auch 2001 knapp 5 000 t an naturbelassenen Pflanzenölen primär zur Strom- und Wärmebereitstellung eingesetzt worden sein. Zusammengenommen wurden im Jahr 2000 mit RME in insgesamt 10 Anlagen zur gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung mit einer installierten elektrischen Nennleistung von 2,1 MW rund 5,5 GWh/a an elektrischer Energie eingespeist. Hinzu kommen noch die BHKW-Anlagen, die mit naturbelassenem Pflanzenöl betrieben werden; hier dürfte der Anlagenbestand in Deutschland derzeit bei rund 30 Anlagen liegen.

Gasförmige Bioenergieträger. 2001 wurden zur Wärme- und Stromerzeugung – bei stark steigender Tendenz – rund 1 400 Biogasanlagen, bei denen es sich zum überwiegenden Teil um Ko-Fermentations-Anlagen aus der Landwirtschaft handelt, betrieben; diese Anlagen sind durch eine elektrische Leistung von rund 100 bis 105 MW bei einer potenziellen Bereitstellung an elektrischer Energie von rund 0,5 TWh/a (brutto) und an thermischer Energie von ca. 2,6 PJ/a charakterisiert.

Abb. II-10 zeigt den Biogasanlagenbestand nach Leistungsbereichen, der aus gegenwärtiger Sicht die nächsten Jahre deutlich zunehmen wird. Dies ist primär durch das EEG und die Biomasseverordnung bedingt; hinzu kommt die Wirkung verschiedener Förderprogramme z. T. auf Bundes- und Landesebene.

Zusätzlich wird Strom und ggf. Wärme auch in einer Vielzahl von Deponie- und Klärgas-Anlagen bereitgestellt. Im Jahr 2000 waren 268 Deponiegasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 227 MW und einer Stromeinspeisung von 812 GWh/a sowie 217 Klärgasanlagen mit einer elektrischen Leistung von 85 MW und einer Netzeinspeisung von knapp 61 GWh/a erfasst; insbesondere bei letzteren ist aber von einer deutlich höheren Stromerzeugung auszugehen, die aber bisher nicht eingespeist wird.

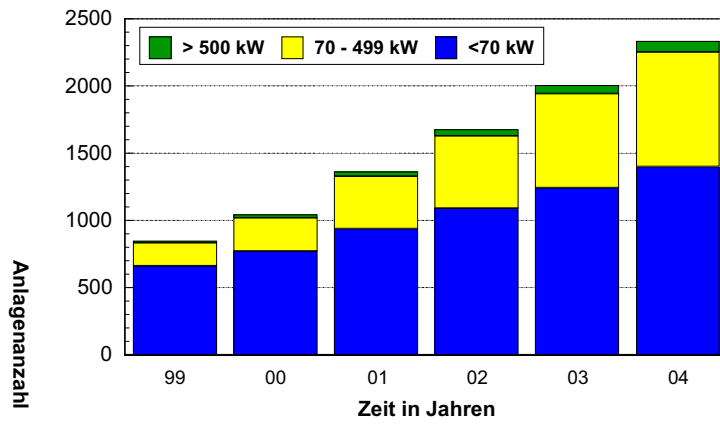


Abb. II-10: Biogasanlagenbestand einschließlich der derzeit absehbaren Entwicklung



III Bewertung der energiewirtschaftlichen Nutzung von Biomasse

1 Umwelteffekte bei der Bereitstellung und Verwertung nachwachsender Rohstoffe

1.1 Biomasse- Brennstoffe

Im Folgenden werden ausgewählte Umweltkriterien einer Bereitstellung und Verwertung nachwachsender Rohstoffe diskutiert. Die Untersuchung gliedert sich in die drei Teilschwerpunkte Rohstoffbereitstellung (Anbau und Ernte), Transport, Lagerung, Aufbereitung und energetische Umsetzung.

Im ersten und zweiten Teilschwerpunkt wird noch nicht nach festen und flüssigen Biobrennstoffen unterschieden. Hier beschränkt sich die Betrachtung weitgehend auf die derzeit diskutierten nachwachsenden Rohstoffe Raps, Getreide, Miscanthus (Chinaschilf), Zuckerhirse, Kurzumtriebsplantagen und Landschaftspflegewiesen. Für diese unterschiedlichen Bioenergieträger werden nachfolgend eine Vielzahl von Umweltaspekten, die für einen Vergleich in Frage kommen, zusammengetragen.

1.1.1 Rohstoffproduktion (Anbau)

Erosion. Bei der Bewegung von Bodenmassen entlang der Oberfläche (Bodenerosion) wird zwischen dem Transport von Bodenmaterial durch das Transportmittel Wind und Wasser unterschieden. Während Winderosion vorwiegend in offenen Ebenen stattfindet, tritt die Bodenerosion durch Wasser nur bei Gefälle des Bodenkörpers auf. Die Erosion durch Wasser wird neben der Anzahl an Starkregenereignissen insbesondere durch die Vegetationsdecke beeinflusst. Während z. B. Wald- und Grünlandgebiete i. Allg. nur geringe Erosionsschäden aufweisen, sind sie in Landschaften mit ackerbaulicher Nutzung deutlich höher.

Die Erosion kann durch die Ausgestaltung des Anbausystems beeinflusst werden. Günstige Bedingungen liegen beispielsweise vor, wenn – wie in einem neuen



pflanzenbaulichen Konzept zur Erzeugung von Biomasse – zwei Kulturen pro Jahr geerntet werden. Eine solche Zweifachnutzung wird möglich, wenn die Ausreife der Erstkulturen nicht abgewartet werden muss (Ernte im feuchten Zustand) und somit Vegetationszeit für den Anbau einer Zweitkultur gewonnen wird. Auch Zwischenfrüchte erhöhen die Bedeckungszeiten erheblich, wodurch die Erosionsgefährdung deutlich reduziert wird. Andere Kulturen wie Miscanthus (Chinaschilf) können dagegen durch ihre mehrjährige Bedeckung insbesondere nach Bestandesbedeckung die Wind- und Wassererosion deutlich reduzieren.

Bodenverdichtung. Bodenverdichtungen sind Folgen sämtlicher produktionsbedingter Maßnahmen, die auf einer Fläche durchgeführt werden. Sie haben geringere Gehalte an Bodenluft im Boden, eine geringere Luftdurchlässigkeit, eine geringere Versickerungsrate des Wassers sowie eine verringerte Durchwurzelbarkeit des Bodens für die Pflanzen zur Folge.

Die beeinflussenden Bearbeitungsmaßnahmen lassen sich in die drei Teilschritte Bestandesetablierung, Pflege und Ernte aufgliedern. Hier sind technische Faktoren wie die Art und Schlagkraft der Maschinen, aber auch der menschliche Faktor (d. h. das Problembewusstsein des Betriebsleiters bezüglich des Bodenzustandes zum Zeitpunkt der Bearbeitungsmaßnahme) von größter Bedeutung.

Die Verfahren zur Etablierung ein- und mehrjähriger Kulturen sind unter dem Gesichtspunkt der Verdichtungen weitgehend einheitlich zu bewerten. Allerdings ergibt sich bei den einjährigen Kulturen eine deutlich höhere Anzahl von Maßnahmen, während bei Dauerkulturen die Etablierung in der Regel nur einmal für die gesamte Nutzungsdauer notwendig wird. Diese geringere Bearbeitungshäufigkeit wird jedoch teilweise dadurch kompensiert, dass am Ende der Nutzungsdauer ggf. aufwändige mechanische Maßnahmen zur Flächenumwidmung bzw. Neuanpflanzung notwendig werden.

Da im Energiepflanzenbau im Gegensatz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion z. T. ein höherer Krankheits- und Unkrautbesatz toleriert werden kann, ist das hier beschriebene Verdichtungsrisiko durch Pflegemaßnahmen deutlich geringer.

Erntemaßnahmen für einjährige Energiepflanzen wie Getreide und Raps erfolgen – wie zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion – regelmäßig bei trockenem und damit gut tragfähigem Bodenzustand. Gleiches gilt für Landschaftspflegewiesen, die als Dauerkultur überdies noch den Vorteil einer günstigeren Gefügestabilität mit geringerer Verdichtungsanfälligkeit aufweisen (außer Feuchtwiesen).



Generell gilt, dass tiefwurzelnde Kulturarten zu einer natürlichen Bodenlockerung und damit zur Verminderung des Verdichtungsrisikos beitragen können. Auch durch bestimmte Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung stehen weitere Maßnahmen zur Verfügung, durch die Bodenschäden vermieden bzw. gemindert werden können, um eine Degradation (Bodenverdichtung, Erosion etc.) zu vermeiden.

Humuserhalt. Für die Erhaltung des Humusanteils im Boden ist die Zufuhr von organischer Substanz erforderlich. Eine nachhaltige Humusversorgung ist gekoppelt mit einer Verminderung von Wind- und Wassererosion, Verbesserung der Bodenstruktur und das damit verminderte Bodenverdichtungsrisiko, einer Belebung des Bodenlebens sowie mit der Erhöhung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit.

Alle spät schließenden Reihenkulturen mit relativ geringen Ernterückständen wirken humuszehrend. Hier kann eine Reihenfolge der Kulturarten aufgestellt werden, in der das Risiko des Humusabbaus steigt. Bei Miscanthus (Chinaschilf) kann davon ausgegangen werden, dass die Humuszehrung nicht größer ist als bei Raps oder Getreide. Dafür spricht der relativ hohe nicht erntefähige Blattabfall (Vorernteverlust) von jährlich 4 bis 5 t TM/ha, der zwischen dem Ende der Vegetationsperiode und dem Erntetermin anfällt. Zusätzlich verbleiben bei den derzeitigen Ernteverfahren Stoppelreste von 1 bis 3 t TM/(ha a). Die auf diese Weise jährlich anfallenden Biomassen und die hohen Rhizom- und Wurzelanteile lassen eine Erhöhung des Bodenumusgehaltes und des Nährstoffdargebots erwarten.

Unsicherheit über die Humusbilanz ist auch bei den schnellwachsenden Hölzern gegeben. Hier können große Unterschiede auch durch Anbau und Auswahl von Untersaaten zwischen den Reihen während der Perioden mit geringem Bestandesschluss gegeben sein. Wegen der in Forstkulturen beobachteten relativen Erhöhung des Gesamtkohlenstoffgehaltes im Boden wird dieses Verfahren i. Allg. ebenfalls positiv bewertet. Der Verbleib der Laubmasse auf Flächen mit Miscanthus (Chinaschilf) und Kurzumtriebsplantagen ist somit für den Humuserhalt ausreichend, zumal eine energetische Nutzung des Laubes aus ökonomischer Sicht nicht zu empfehlen ist.

Beitrag zur Gülleverwertung. Auch die Eignung der Energiepflanzen für die Verwendung von Wirtschaftsdüngemitteln wird diskutiert. Für diese organischen Düngemittel muss eine ausreichende Anzahl von Ausgleichsflächen zur Verfügung stehen, damit vermieden wird, dass es lokal zu übermäßigen Nährstoffkonzentrationen im Boden kommt. Hierbei stellt vor



allem der N-Gehalt der Wirtschaftsdüngemittel ein wesentliches Problem dar. Dabei liegt in der Gülle der Stickstoff zu ca. 40 % in organisch gebundener Form und im Stallmist zu ca. 80 % vor. Die Mineralisation dieses Stickstoffs erfolgt oft zu Jahreszeiten ohne oder mit nur geringem Pflanzenentzug und unterliegt damit der Auswaschung. Das ist auch der Grund, weshalb ein unbewachsener Ackerboden ("Schwarzbrache") hierbei besonders kritisch zu bewerten ist.

Die Eignung der Energiepflanzen für die Gülleausbringung hängt vom Stickstoffbedarf, von der Möglichkeit einer bedarfsgerechten Stadiendüngung und der Möglichkeit der Einarbeitung sowie der Empfindlichkeit der Kulturen gegenüber Ättschäden ab. Die Ausbringung ist zu Zeiten des tatsächlichen Nährstoffbedarfs der Pflanzen mit relativ geringen Bodenverdichtungsschäden möglich.

Toleranz gegenüber Unkräutern, Ungräsern und Krankheiten. Die Toleranz gegenüber Unkräutern, Ungräsern und teilweise auch Krankheiten hat direkte Wirkungen auf den Pflanzenschutzmittelaufwand und auf die Vielfalt der Feldflora. Generell ist bei den Energiepflanzen, welche ausschließlich Festbrennstoffe für die thermische Verwertung liefern, eine höhere Unkrauttoleranz gegeben, da solche Beiflora ebenfalls einen Beitrag zum Brennstoffetrag leisten kann. Begleitflora und Krankheiten können jedoch nur toleriert werden, wenn diese nicht zu erheblichen Ertragsreduktionen führen. Die Unkrauttoleranz ist bei Wintergetreide und Miscanthus (Chinaschilf) tendenziell geringer ausgeprägt als bei Kurzumtriebsplantagen, da es hierbei auf die Bergung möglichst trockenen Erntematerials ankommt. Störende Begleitflora trägt in der Regel als Grünmasse zu einer höheren Materialfeuchte bei. Eine frühzeitige Ernte der Winterfrüchte verhindert gleichzeitig die Samenreife und somit Vermehrung der Ackerwildpflanzen.

Pflanzenschutzmittelanwendung. Ein Teil der Pflanzen zur Biomassegewinnung müssen nicht die hohe Qualität und Reinheit wie zur Nahrungs- oder Futtermittelerzeugung erreichen, so dass die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln deutlich vermindert werden kann, vorausgesetzt der höhere Krankheitsbefall bzw. Unkrautbesatz im Bestand führt nur zu geringen Ertragsreduktionen. Pflanzenbauliche Untersuchungen auf sandigen Böden haben zudem gezeigt, dass beim Anbau von Energiepflanzen unter bestimmten Bedingungen auf Pflanzenschutzmittel fast vollständig verzichtet werden kann. Dementsprechend können weniger Pflanzenschutzmittel in Oberflächengewässer und in das Grundwasser eingetragen



werden. Eine zunehmende Gewässerbelastung infolge des Energiepflanzenbaus ist damit nicht zu befürchten.

In Zweikultursystemen kann neben der Anwendung von Herbiziden auch der Einsatz von Fungiziden und Insektiziden reduziert werden, weil bei vorgezogener Ernte Schaderreger geringere Ernteverluste hervorrufen. Die jährlichen Erträge an Trockenmasse können dabei um über 50 % höher liegen als beim konventionellen Anbau von Energiepflanzen wie Triticale.

Biodiversität. Die Biodiversität ist u. a. durch die Artenzahl, das Artenspektrum und die Vielfalt eines Lebensraumes definiert. Angesichts einer zunehmenden Biotopvernichtung stellen die Artenerhaltung und -vielfalt in der Agrarlandschaft ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal für die Flächennutzungsarten dar.

Da die thermische Verwertung geringe Qualitätsansprüche an die Ernteprodukte stellt und bei vielen Kulturen die Reifetermine nicht abgewartet werden müssen, kann auf eine große Vielfalt an Sorten- und Artenmischungen zurückgegriffen werden, die eine Erhöhung der genetischen Variabilität ermöglichen und gleichzeitig z. B. bei Getreide eine Ausbreitung windbürtiger Krankheitserreger (z. B. Rost, Mehltau) begrenzen können. Somit ist eine Erweiterung des Sortenspektrums bis zur Nutzung vieler nur in Genbanken vorhandenen pflanzengenetischen Ressourcen möglich. Überdies können durch alte Sorten z. T. höhere Gesamterträge als bei modernen Sorten erzielt werden. Da im Energiepflanzenbau der Herbizideinsatz verringert bzw. fast vollständig auf ihn verzichtet werden kann, besteht zudem die Möglichkeit, dass durch die damit verbundene Begünstigung der Ackerbegleitflora und gleichzeitig deren Nützlinge der Einsatz von Insektiziden vermindert werden kann.

Insgesamt sollten nach Möglichkeit an den Standort angepasste Pflanzenarten angebaut werden. "Naturfremde" Arten sollten grundsätzlich nur gewählt werden, wenn eine unkontrollierte Ausbreitung ausgeschlossen ist und sie heimischen Pflanzen deutlich überlegen sind.

Nährstoffeintrag in Grundwasser und Gewässer. Eine aktuelle Hochrechnung der Stickstoffbilanz ergibt für Deutschland einen Überschusseintrag von jährlich 100 kg N/ha auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein großer Teil dieses Überschusses gelangt als Nitrat ins Grundwasser, für das laut Trinkwasser-Verordnung ein Grenzwert von 50 mg/l (Richtwert: 25 mg/l) festgelegt ist. Der Trend steigender Nitratbelastung des Grundwassers ist



dessen ungeachtet seit Jahren nahezu unverändert und es wird davon ausgegangen, dass die Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland weiterhin um jährlich 1 bis 2 mg/l steigt. Dieser N-Eintrag ist von Standort- und Klimaparametern abhängig. Darüber hinaus kommen die Unterschiede, die durch die einzelnen Kulturarten bedingt sind, zum Tragen.

Da für eine direkte thermische Verwertung vor allem der Biomassertrag und meist weniger die Qualität von Bedeutung ist, kann der Pflanzenanbau für energetische Zwecke extensiver gestaltet werden als der Anbau für Nahrungs- und Futtermittelzwecke. Die Gefahr der Nitratverlagerung kann daher in der Biomasseproduktion durch den verringerten Stickstoffdüngemiteleinsatz gemindert werden, der im Durchschnitt bei Energiepflanzen um 30 % geringer ist. Zudem kann speziell auf die Qualitätsspätdüngung im Getreideanbau, die das größte Gefahrenpotenzial des Nitratreintrags in das Grundwasser birgt, verzichtet werden, da das Qualitätskriterium eines hohen Eiweißgehaltes nicht – wie bei der Nahrungs- und Futtermittelnutzung – besteht. So können Nitratgehalte im Boden nach der Ernte auf 10 bis 40 kg/ha reduziert werden. Durch den Zusatz nitrifikationshemmender Substanzen zu mineralischen Düngemitteln können zudem die Freisetzung von Stickstoff aus Düngemitteln verzögert und besser dem Bedarf der Pflanzen angepasst sowie die Auswaschung reduziert werden.

Neben dem Düngungsniveau ist hierbei auch die Dauer der Ausnutzung der Vegetationsperiode durch Pflanzenbewuchs und die Möglichkeit des Anbaus von Zwischenfrüchten oder Folgekulturen während der Vegetationsperiode entscheidend. Diese Folgekulturen sind in der Lage, die mineralisierten Nährstoffe teilweise in Form von Pflanzenmasse zu speichern und so vorübergehend dem Risiko der Auswaschung zu entziehen.

Auch Phosphate können die Gewässer belasten. Während Stickstoff in Form des leichtlöslichen Nitrats in das Grundwasser ausgewaschen werden kann, kommt diesem Eintragsweg für Phosphor nur eine geringe Bedeutung zu, da landwirtschaftlich genutzte Böden in der Regel über ein ausreichendes Sorptionsvermögen verfügen, um überschüssiges Phosphat im Boden zu binden. Ein Zusammenhang zwischen dem Phosphateintrag und der Düngung bzw. der Bodennutzung besteht in der Regel nicht, so dass die jährliche Auswaschung von Ackerflächen mit weniger als 0,3 kg P/ha sehr gering ist. Der mögliche Phosphateintrag in die Gewässer ist allenfalls in Begleitung mit Erosionsvorgängen denkbar.



N₂O-Emissionen. Im Vergleich zu fossilen Energieträgern wird bei der energetischen Nutzung von Biomasse häufig eine "Klimaneutralität" angenommen, weil bei der Biomasseverbrennung die CO₂-Menge emittiert wird, die durch die Photosynthese der Atmosphäre entzogen wurde. Der Energiepflanzenbau ist allerdings nur durch einen annähernd geschlossenen Kohlenstoffdioxid-Kreislauf gekennzeichnet, da hierbei CO₂-Emissionen produktionsbedingter Prozesse (Kraftstoff, Düngemittel- und Pflanzenschutzmittelproduktion etc.) zunächst nicht berücksichtigt werden, die durch die Nutzung fossiler Energieträger entstehen können. Außerdem stellt das emittierte CO₂ nur eines von mehreren möglichen Klimagasen dar.

Der positive Effekt der Klimagasreduktion durch die energetische Biomassenutzung kann aber durch N₂O-Emissionen, beispielsweise induziert durch Düngemittelapplikationen, geschmälert werden. Schätzungen zufolge werden über 40, 70 bzw. 40 % der globalen CO₂-, N₂O- und CH₄-Emissionen durch die Landwirtschaft verursacht. Die Emission von Distickstoffoxid (N₂O), das auch als "Lachgas" bezeichnet wird, ist wegen der sehr hohen Wirksamkeit als "Treibhausgas" besonders kritisch zu beurteilen.

N₂O entsteht natürlicherweise bei der mikrobiellen Umsetzung von Stickstoffverbindungen im Boden sowohl bei der Nitrifikation als auch bei der Denitrifikation. Dabei ist der Ursprung des Stickstoffs (Mineraldüngung, Mineralisation der organischen Substanz oder Luftstickstofffixierung) unerheblich. Die Schwankungsbreite der Lachgasfreisetzungen von mineralisch gedüngten Agrarstandorten liegt zwischen 0,001 und 6,8 % des applizierten Dünger-Stickstoffs und wird vom IPCC mit $1,25 \pm 1$ % bezogen auf den Dünger-Stickstoff angegeben. Die Düngemittel-Aufwandmenge, die Ausbringungstechnik bzw. -frequenz, der Zeitpunkt der Düngung und der jeweils zur Anwendung gelangte Düngemitteltyp bestimmen dabei die mögliche Höhe der Emissionsraten. So können durch die Applikation spezieller Dünger (z. B. mit Nitrifikationsinhibitoren) die N₂O-Emissionen deutlich reduziert werden.

Auf Grund des derzeit niedrigen Erkenntnisstandes erscheint jedoch eine ausschließlich von der Düngungshöhe abhängige Differenzierung der kulturartspezifischen N₂O-Emissionen ungeeignet. Da dieser Zusammenhang dennoch tendenziell besteht, muss einigen nachwachsenden Rohstoffen unter diesem Gesichtspunkt ein positiver Effekt gegenüber den konventionellen Anbaukulturen zugebilligt werden. Die oft deutlich reduzierten Stickstoffaufwendungen führen somit zu einer (qualitativ) günstigeren Bewertung.



Beitrag zur Kulturlandschaft und zum Erholungswert. Infolge des Preisverfalls landwirtschaftlicher Produkte und des Agrarstrukturwandels wurden in den letzten Jahren Standorte (vorwiegend Grenzertragsstandorte) aus der Produktion genommen, die für eine Energiepflanzenproduktion genutzt werden könnten. Auf Grund der Einführung teilweise "naturfremder" Pflanzen werden jedoch Bedenken geäußert, dass dadurch eine Veränderung der Kulturlandschaft hervorgerufen werden könnte. Angesichts vieler subjektiver Begriffe wie "Erlebnisminderung", "Heimatwert-, Geschichtlichkeits- und Inspirationsverlust", die zu den sogenannten Wertminderungen durch Landschaftswandel zählen, fällt es allerdings schwer, den Energiepflanzenanbau unter dem eher ästhetischen Gesichtspunkt ihres Beitrags zur Kulturlandschaft zu bewerten. Dennoch liegen Arbeiten vor, in denen die geeigneten Kriterien wie Naturnähe oder Vielfalt der Landschaftselemente systematisiert wurden, um eine möglichst objektive und nachvollziehbare Bewertung einer Kulturlandschaft vornehmen zu können.

Allgemein wird es als nachteilig angesehen, wenn eine einzelne Kulturart in einem Landschaftsraum ein deutliches Übergewicht hat, so dass damit die Vielfalt der Elemente nicht mehr gegeben ist. Ein "Verarmungseffekt" liegt auch bei großen zusammenhängenden Flächen mit einheitlicher Flächennutzungsart vor.

Neben diesem Verarmungseffekt können zwei weitere Grundformen des Landschaftswandels, den "Verfremdungseffekt" und den "Normierungs- und Nivellierungseffekt", unterschieden werden. Die Gefahr der Verfremdung besteht u. a. durch die Einführung von Kulturarten, die nicht zur sogenannten "potenziell natürlichen Vegetation" gehören. Daher ist es in der Landschaftsplanung üblich, heimische Arten zu bevorzugen. Beispielsweise Miscanthus (Chinaschilf) und Zuckerhirse sind deshalb weniger günstig zu beurteilen. Die einjährigen Kulturarten Getreide und Raps sind dagegen wegen der Notwendigkeit eines Fruchtwechsels mit nur geringerem Risiko eines ausgedehnten Anbaus verbunden.

Die Auswirkungen des Anbaus von Energiepflanzen auf die Kulturlandschaft müssen jedoch differenziert betrachtet werden. Vergleicht man Flächen zur Energiepflanzenproduktion mit Brachflächen (Flächenstilllegung), wird der Anbau von Energiepflanzen meist als Verbesserung des Landschaftsbildes empfunden.

Bei der Biomassennutzung entfallen Bedenken hinsichtlich erwarteter Effekte auf das Landschaftsbild vollständig, wenn ausschließlich Rückstände und Nebenprodukte genutzt werden, da die Hauptnutzung (z. B. Getreideanbau zur Kornproduktion) und nicht die



Nutzung der Rückstände (z. B. Stroh) ausschlaggebend für das Erscheinungsbild der Landschaft ist.

Wasserverbrauch. Für die Ausschöpfung des Wasservorrats im Boden ist der Wasserbedarf einer Kulturart interessant. Um eine Vergleichbarkeit unter den Energiepflanzen herzustellen, muss der Wasserverbrauch in Beziehung zur Produktivität der Pflanzen gesetzt werden. Hierfür eignet sich der sogenannte Transpirationskoeffizient, der die spezifische Wassermenge für die Produktion von Trockenmasse kennzeichnet. Der arten- und sortenspezifische Transpirationskoeffizient liegt bei C₃-Pflanzen zwischen 400 bis 700; er ist bei C₄-Pflanzen mit 200 bis 400 nur halb so hoch. Dies bedeutet, dass C₄-Pflanzen (z. B. Miscanthus (Chinaschilf), Zuckerhirse) trotz geringeren Wasserverbrauchs mehr Trockenmasse produzieren können und somit die zur Verfügung stehenden Nährstoffe effektiver nutzen können.

Die Wirkung des spezifischen Wasserverbrauchs einer Kultur auf den Gebietswasserhaushalt ist stets in Zusammenhang mit den jeweiligen Ertragserwartungen am Standort zu beurteilen. Hinzu kommt die bei der Bestimmung des Transpirationskoeffizienten nicht berücksichtigte Interzeption des Niederschlags. Sie stellt den bei einem Niederschlagsereignis (bzw. bei einer Beregnung) an der oberirdischen Pflanzenmasse anhaftenden Wasseranteil dar. Die Pflanzenmasse bildet damit einen Zwischenspeicher, der Niederschlag erreicht den Boden nicht und trägt somit nicht zur Boden- bzw. Grundwasserneubildung bei. Die Grundwasserneubildung erfolgt in gemäßigttem Klima hauptsächlich während des Winterhalbjahres, wenn der Bodenfeuchtegehalt der maximalen Haltefähigkeit ("Feldkapazität") entspricht. Bei der relativ geringen Intensität und Ergiebigkeit der Winterniederschläge kann es zu erhöhter Interzeption kommen. Hierbei wirken sich vor allem solche Kulturarten nachteilig aus, die während der kühlen Jahreszeit eine relativ große Blatt- und Stamm- bzw. Stängeloberfläche für die Interzeption darbieten.

Spezifischer Flächenbedarf. Da der Energiepflanzenanbau mit anderen Flächennutzungsarten wie Nahrungsmittelanbau, Naturschutz oder Erholung teilweise in direkter Konkurrenz steht, ist der hierbei anzurechnende Flächenbedarf ein weiteres Bewertungskriterium. Das heißt, dass auch die Effizienz der Flächenausnutzung hinsichtlich der Erzeugung regenerativer Brennstoffe in die Betrachtung der Umwelteffekte einfließen



sollte, zumal es sich bei der landwirtschaftlichen Nutzfläche ebenfalls um eine knappe Ressource handelt.

Spezifischer Stickstoffbedarf. Der Bedarf an mineralischem Düngerstickstoff ist nicht nur wegen der hohen energetischen Vorleistungen für seine Herstellung ein relevantes Umweltkriterium. Neben der Gefährdung des Grundwassers durch hohe Düngergaben zu ungünstigen Zeitpunkten wirkt sich der Stickstoffaufwand auch auf die Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche aus. Etwa drei Viertel aller derjenigen Pflanzenarten, welche in Deutschland als gefährdet gelten, sind nur auf Standorten mit Stickstoffmangel konkurrenzfähig. Die Frage der ökologischen Wirksamkeit unterschiedlicher Düngungsniveaus ist jedoch schwer zu quantifizieren, da hierfür auch die individuelle Ausgestaltung der Feldbewirtschaftung maßgeblich ist. Eine zusätzliche Belastung erfolgt durch die unvermeidbare Deposition von Stickstoff aus der Atmosphäre in Form von Nitrat- und Ammonium-Immissionen, die regional stark ansteigen kann und bei hochwachsenden Dauerkulturen wie Kurzumtriebsplantagen mit hohem Blattflächenindex nach heutigem Kenntnisstand größer ist, als bei einjährigen Kulturen.

1.1.2 Nachernteverfahren

Nachfolgend werden die lokalen Umwelteffekte beim Transport, der Lagerung und der Nutzung von festen Biomassen diskutiert. Die Betrachtung des Transports beschränkt sich – da die Energieaufwendungen im Rahmen der Ökobilanzierung abgehandelt werden – ausschließlich auf den Aspekt der Beanspruchung der Verkehrswege. Die Lagerung von Biomassen wird hinsichtlich der Gesichtspunkte Selbstentzündung und Brandrisiko sowie der gesundheitlichen Risiken diskutiert. Die Umwelteffekte der Nutzung haben die mit der Verbrennung verbundenen Emissionen einschließlich der Ascheproblematik zum Inhalt.

Transport. Die derzeitige Beanspruchung der Verkehrswege hat ein Ausmaß erreicht, in dem ein zusätzliches Verkehrsaufkommen zu vermehrten Stillstandzeiten, Straßenneubau und Zeitverlust führt und damit den Ressourcenverbrauch überproportional ansteigen lässt. Folglich sind auch die Energiebereitstellungsverfahren auf ihre Beanspruchung von Verkehrswegen hin zu untersuchen und entsprechend kritisch zu bewerten.



Zur Bestimmung der Verkehrswegebelastrung wird zunächst für den Rohstoff- bzw. Brennstofftransport ein einheitliches Transportmittel angenommen (Schlepper mit zwei 8 t- bzw. 16 t-Anhängern). Unter Beruckichtigung der unterschiedlichen Schütt- bzw. Lagerdichten der Rohstoffe sowie der mittleren Frischmasseeertrage wird die Anzahl Fahrzeugbewegungen je ha errechnet, wobei die Ausladung der Transportanhänger dichteabhängig nach Volumen bzw. nach Gewicht erfolgt. Durch Bezugnahme auf die Brennstoffenergieertrage errechnet sich die relative Anzahl der Fahrzeugbewegungen je TJ Brennstoffaquivalent. Das Produkt aus diesem Wert und der mittleren Transportentfernung ergibt die relative Verkehrswebebeanspruchung in km/TJ.

Dabei zeigt sich beispielsweise, dass bei den Produktionsverfahren Landschaftspflegeheu, Getreideganzpflanzen und Kurzumtriebsplantagen mit der geringsten Belastung zu rechnen ist, während bei Miscanthus je Energieeinheit deutlich größere Transportentfernungen zurückgelegt werden müssen.

Lagerung. Umweltrelevante Risiken bei der Lagerung ergeben sich vor allem durch die Bildung gesundheitsschädlicher Pilzsporen und Mykotoxine sowie durch das Selbstentzundungsrisiko bzw. die Brandgefahr, die von den Brennstoffen ausgeht.

Selbstentzündung und Brandrisiko. Die Gefahr einer Selbsterwärmung besteht vor allem bei der Einlagerung von feuchten Heuballen sowie – jedoch seltener – bei fein zerkleinertem Holz (z. B. Sägemehl, Rinde). Bei diesen Brennstoffen kann die durch biologische Abbauprozesse entstehende Wärme auf Grund der behinderten natürlichen Konvektion und der geringen Wärmeleitung oft nicht ausreichend abgeführt werden, und dadurch können Selbstentzundungstemperaturen erreicht werden.

Neben dieser durch biologische Prozesse bedingten Selbstentzündung geht eine weitere Brandgefahr bei der Lagerung vor allem von äußeren Faktoren (insbesondere Fremdentzundung) aus. Als leicht entzündlich gelten beispielsweise Brennstoffe, die sowohl einen niedrigen Wassergehalt als auch ein groes Oberflächen-Volumen-Verhältnis besitzen, da beide Faktoren die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Diese Bedingungen sind besonders beim Halmgut gegeben, während z. B. grobstuckiges Holz über eine längere Zeit einer kritischen Wärmeeinwirkung widerstehen kann. Zu explosionsartigen Reaktionen ("Verpuffungen") kann es dagegen bei Holzstaub kommen, wenn dieser das kritische Mischungsverhältnis mit Luft erreicht hat.



Aus versicherungstechnischen Gründen ist der Rauminhalt eines Lagerplatzes für lignocellulosehaltiges Material auch im Freien in der Regel begrenzt. Meist wird für offen gelagerte Halmgutballen eine sicherheitstechnische Obergrenze von 5 000 m³ Lagergut genannt. Außerdem sind in der Regel Sicherheitsabstände von 100 m zwischen den Lagerplätzen und 50 m zu Wald oder Gebäuden einzuhalten, so dass im Falle eines Brandes der Schaden begrenzt bleibt.

Gesundheitliche Risiken. Risiken für die menschliche Gesundheit gehen vor allem von den Pilzsporen aus, die sich bei der Lagerung bilden können und die bei der Manipulation des Brennstoffs (d. h. bei Um- bzw. Auslagerungsvorgängen) in die Atemluft gelangen können. Sie sind Auslöser für drei Arten von Gesundheitsschäden, die Mykosen, Mykoallergosen und die Mykotoxikosen:

- Bei den Mykosen kommt es zu einem Pilzwachstum am oder im Wirt (hier: dem Menschen), wobei die inneren Organe oder die Haut befallen werden können. Als besonders pathogen im Organtrakt gilt hierbei *Aspergillus fumigatus* (daher "Aspergillose").
- Mykoallergosen sind allergische Erkrankungen, die sich in Niesanfällen, Schnupfen, Husten, Durchfall, Erbrechen oder sogar asthmoider Bronchitis äußern. Sie kommen durch den Kontakt der Pilzelemente mit feuchten Schleimhäuten (z. B. Atemwege) zustande. Zu den bekanntesten Krankheitsbildern von Mykoallergosen in der Landwirtschaft gehört die sogenannte Farmerlunge, die durch Atemnot, Fieber und Lungenstauung gekennzeichnet ist und häufig von Pilzsporen aus fehlgelagertem Heu verursacht wird. Hierfür werden vor allem Aktinomyceten (Strahlenpilze) verantwortlich gemacht.
- Bei den Mykotoxikosen handelt es sich um eine Vielfalt von Vergiftungserscheinungen durch Giftstoffe (Mykotoxine), die im Stoffwechsel der Pilze entstehen. Diese Vergiftungen können in ihrer Folge zu schweren Krankheitsbildern wie Lungenkrebs, Hepatitis usw. führen. Die Toxine werden nicht nur über die Nahrungsmittel aufgenommen, sondern können auch an Staubpartikeln angelagert sein, die vom Menschen eingeatmet werden.

Das Risiko der Pilzsporenbildung ist bei trocken geborgener Biomasse geringer als bei feuchtem Material. Geringe Feuchte bei der Ernte weisen z. B. Stroh und Landschaftspflegeholz auf. Dagegen besitzen Getreideganzpflanzen und *Miscanthus* in der



Regel deutlich höhere Feuchtegehalte. Auf Grund der hohen Verdichtung des Erntegutes kommt der Luftaustausch und der damit verbundene Wasserverlust aus dem Material (d. h. die Austrocknung) fast vollständig zum Erliegen, was wiederum zu einer erhöhten Pilzsporenbildung führen kann. Deshalb ist z. B. Wiesen- oder Landschaftspflegeheu auf Grund der größeren Verdichtbarkeit und des durchschnittlich höheren Wassergehalts bei der Ernte tendenziell stärker verpilzungsgefährdet als Stroh bzw. andere Halmgüter.

Bei Holzbrennstoffen ist das Risiko der Pilzsporenbildung je nach Feuchtegehalt als gering bis mittel einzuschätzen, tendenziell jedoch höher als bei halmgutartigen Bioenergieträgern. Eine Ausnahme bildet dabei Gebrauchtholz, welches in der Regel nur einen Wassergehalt von 10 bis 20 % aufweist. Besondere Vorteile bieten Brennstoffpellets, bei denen auf Grund des einheitlich niedrigen Wassergehalts von 8 bis 9 % kein mikrobieller Abbau und keine Schimmel- und Sporenbildung mehr stattfindet.

Zur Vermeidung von Erkrankungen sind – neben der Behinderung des Pilzwachstums – sekundäre Schutzmaßnahmen möglich und teilweise auch notwendig. Hierzu zählen u. a. die Verhinderung von Luftbewegungen, die Mechanisierung und Automatisierung von Umschlagprozessen, die Ausrüstung von Fahrzeugkabinen mit Mikrofiltern und die Benutzung von Schutzhelmen mit mikrofiltrierter Atemluft.

Aufbereitung und Handhabung. Während der Aufbereitung und Handhabung können weitere Umweltwirkungen eintreten. Sie gehen größtenteils auf den Einsatz der jeweiligen Techniken und Verfahren zurück (z. B. Zerkleinerung, Trocknung, Verdichtung, Siebung, Additivierung etc.). Hierbei muss unterschieden werden zwischen den direkten und den indirekten Wirkungen.

Zu den direkten Wirkungen zählen beispielsweise die Staubemissionen beim Umschlag. Die verschiedenen halmgutartigen Biomassen sind hier ähnlich zu bewerten, da die Aufbereitungsschritte weitgehend gleich sind. Bei Holzbrennstoffen treten in der Regel geringere Staubemissionen auf, allerdings kann hinsichtlich des gesundheitlichen Risikos einer Pilzsporenfreisetzung nicht pauschal von einer geringeren Belastung ausgegangen werden. Auch bei pelletiertem Material (Holz oder Halmgut) sind erhebliche Unterschiede möglich. Während die Staubbildung bei Holzpellets i. Allg. relativ gering ist, kommt es bei den weniger abriebfesten Halmgutpellets zum Teil zu einer erheblichen Stauffreisetzung.

Daneben ist die Aufbereitung aber auch mit indirekten Wirkungen durch die Beeinflussung der physikalisch-mechanischen oder der chemisch-stofflichen



Brennstoffeigenschaften verbunden; sie treten erst bei der energetischen Umwandlung – je nach verwendeter Konversionstechnologie – mehr oder weniger deutlich zu Tage. Als Beispiel kann hier der Zuschlag von Bindemitteln oder die qualitätssteigernde Wirkung von Additiven genannt werden, dadurch werden entweder vorteilhafte Wirkungen (z. B. bei Kalkzugabe zur Erhöhung des Ascheerweichungspunktes) oder nachteilige Wirkungen (z. B. wegen der Erhöhung des Schwefelgehaltes bei Verwendung von Ligninsulfonat als Bindemittel) erzielt.

1.1.3 Energetische Umwandlung (Festbrennstoffe)

Die Zusammensetzung und die Höhe der bei der Verbrennung gebildeten Rauchgase ist von der Brennstoffzusammensetzung, der Art des Feuerungssystems sowie den Betriebs- und Feuerungsparametern abhängig. Nachfolgend werden die einzelnen Schadstoffemissionen, ihre Wirkungen, die primären und sekundären Ursachen ihrer Entstehung sowie die möglichen Minderungsmaßnahmen aufgeführt. Insbesondere die Staub- und die NO_x -Emissionen tragen wesentlich zu den Umweltwirkungen der Biomasseverbrennung bei.

Bedeutung der Emissionsparameter und ihre Wirkungen. Nachfolgend wird deren Bedeutung als umweltrelevante Luftschadstoffkomponenten erläutert.

Kohlenstoffmonoxid (CO). CO ist ein geruchloses Gas, das im Wesentlichen bei unvollständiger Verbrennung entsteht. Eingeatmetes CO blockiert die Sauerstoffaufnahme in das Blut und führt je nach aufgenommener Menge zu Kopfschmerzen, Schwindelgefühlen und Übelkeit. Größere Mengen führen zum Tod. CO entsteht durch unvollständige Verbrennung auf Grund von Verbrennungsluftmangel, niedriger Verbrennungstemperatur, geringer Gasverweilzeit, geringer Gasverwirbelung, Totzonen mit Luftmangel sowie häufigen Lastwechsels.

Organische Kohlenstoffverbindungen (C_nH_m). Bei den organischen Kohlenstoffverbindungen handelt es sich hauptsächlich um "Kohlenwasserstoffe" (C_nH_m); den chemischen Verbindungen des Kohlenstoffs mit Wasserstoff. In der Umweltdiskussion spielen insbesondere die ringförmigen (zyklischen und polyzyklischen) aromatischen Kohlenwasserstoffe (z. B. Benzol, Benzo[a]pyren) sowie die chlorierten und polychlorierten



Kohlenwasserstoffe eine besondere Rolle. Die Kohlenwasserstoffe sind Ausgangsstoffe für die Bildung eines photochemischen Smogs; einige Kohlenwasserstoffe sind krebserregend. Die unvollständige Verbrennung ist – wie beim CO – die wesentliche Ursache für Kohlenwasserstoffemissionen.

Die Bildung von aromatischen Kohlenstoffverbindungen (PAK) erfolgt in thermodynamischen Senken durch Radikaladditionen aus ungesättigten C₂ und C₄-Verbindungen. Sie hängt eng mit den chemischen Strukturen des Brennstoffs zusammen.

In den sich bildenden Kohlenwasserstoffen ist auch das klimawirksame Methan enthalten. Messungen ergaben, dass ca. 0,14 % des Brennstoffkohlenstoffs von Holz bei der Verbrennung als Methan emittiert wird.

Stickstoffoxide (NO_x). Stickoxide greifen die Schleimhäute der Atmungsorgane an und begünstigen Atemwegserkrankungen. Sie tragen in der Atmosphäre zur Bildung von Ozon und anderen Photooxidanzien und damit auch zur Ausbildung des photochemischen bodennahen Smogs bei. Außerdem besteht eine pflanzenschädigende Wirkung. Es lassen sich die folgenden drei Wege der Stickoxidbildung unterscheiden.

- Thermische Stickoxide entstehen bei hohen Temperaturen aus molekularem Stickstoff und dem Sauerstoff der Verbrennungsluft.
- Prompt-Stickoxide werden bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoff-Radikalen ebenfalls aus Luftstickstoff und Luftsauerstoff gebildet.
- Brennstoffstickoxide entstehen beim Abbau stickstoffhaltiger Brennstoffe aus chemisch gebundenem Stickstoff.

Die thermischen Stickoxide und die Prompt-Stickoxide sind bei den für Holzfeuerungen typischen Temperaturen nur von untergeordneter Bedeutung. Die Hauptursache für die Emissionen ist demnach der Stickstoffgehalt im Brennstoff.

Die theoretische Maximalemission im Abgas beträgt 270 mg/Nm₀ (13 % O₂) bei einem N-Gehalt im Brennstoff von 0,1 Gew.-% (z. B. Nadelholz) und 8 230 mg/Nm₀ (13% O₂) bei 3 Gew.-% (z. B. Spanplatten). Es besteht ein deutlicher – allerdings nicht linearer – Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt im Brennstoff und den NO_x-Emissionen. Bei niedrigen Stickstoffgehalten wird prozentual – das heißt gemessen am N-Gehalt im Brennstoff – deutlich mehr NO_x emittiert, als bei hohen. Mit der Brennstoffasche ist keine Abscheidung von Stickstoff möglich, da die Ascheeinbindung geringer als 1 % ist.



Die Verbrennungstechnologie besitzt ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Emissionshöhe; der NO_x -Ausstoß ist aber auch von den Betriebsbedingungen der Anlage abhängig. Einflussfaktoren sind u. a. Luftüberschuss, Temperatur, Lastzustand und Betriebsweise.

Schwefeldioxid (SO_2). SO_2 ist ein farbloses, stechend riechendes Gas, das überwiegend als unerwünschtes Nebenprodukt bei der Verbrennung schwefelhaltiger Energieträger sowie bei verschiedenen industriellen Prozessen freigesetzt wird. SO_2 ist in der Atmosphäre einer Reihe von Umwandlungsprozessen unterworfen, in deren Folge z. B. schweflige Säure, Schwefelsäure, Sulfite und Sulfate entstehen können. Es wirkt in erster Linie auf die Schleimhäute des Auges und die oberen Atemwege und verursacht Atemwegserkrankungen. Bei Pflanzen führt SO_2 zum Absterben von Gewebepartien durch den Abbau von Chlorophyll. SO_2 zählt zu den Hauptursachen der neuartigen Waldschäden.

Bei der thermochemischen Umwandlung bestimmt der Schwefelgehalt des Brennstoffs primär die Schwefeldioxid(SO_2)-Emission. Der Schwefel geht dabei unter Bildung von SO_2 , SO_3 und Alkalisulfatstufen größtenteils in die gasförmige Phase über. Wie beim Chlorid kommt es während der Abkühlung der Abgase im Kessel teilweise zu einer Rückkondensation, bei der sich Alkali- und Erdalkalisulfate entweder an den mitgeführten Flugaschepartikeln oder an den Wärmeübertragerflächen niederschlagen können bzw. sulfatisch gebunden werden. Ein großer Teil des Schwefelgehaltes im Brennstoff (ca. 40 bis 90 %) wird so – je nach Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtungen – in die Asche eingebunden.

Bei der Verbrennung von Biomassen spielt SO_2 nur eine geringe Rolle, da der Schwefelgehalt der Brennstoffe in der Regel sehr gering ist.

Staub. Unter Staub (Partikelemissionen) versteht man die Gesamtmasse an Partikeln, die bei der Verbrennung in das Abgas gelangen. Dabei kann es sich nicht nur um Feststoffteilchen, sondern auch um flüssige Stoffe handeln, die z. B. aus der Kondensation langkettiger Kohlenwasserstoffe (Teere) während der Verbrennung stammen. Man bezeichnet solchermaßen verunreinigte Gase auch als Aerosole, d. h. es handelt sich um mit festen oder flüssigen Stoffen angereicherte Gase, welche die Stoffteilchen über längere Zeit in der Schwebe halten können.



Die Staubemissionen sind für den Wintersmog mitverantwortlich. Die negativen Gesundheitswirkungen gehen insbesondere von feinen Partikeln aus, die auch bei der Biomasseverbrennung eine große Rolle spielen. Diese Partikel führen zu einem Anstieg der Mortalität und Morbidität in Folge von Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Diese negativen Auswirkungen werden auch unterhalb der geltenden Grenzwerte festgestellt, und es konnten bislang keine Anhaltspunkte für eine Risikoschwelle gefunden werden. Daneben gibt es eine Vielzahl toxischer, kanzerogener und mutagener Wirkungen durch die chemische Zusammensetzung und die an Partikeln adsorbierten Substanzen.

Die Partikel entstehen als Produkte einer unvollständigen sowie einer vollständigen Verbrennung. Bei der unvollständigen Verbrennung sind es C-haltige feste oder flüssige Zersetzungsprodukte aus dem Brennstoff, z. B. in Form von unverbrannten Holzbestandteilen, Holzkohle, organischen Verbindungen sowie C-haltige kondensierte Syntheseprodukte in Form von Ruß und von organischen Verbindungen (z. B. PAK). Partikel aus einer vollständigen Verbrennung beinhalten schwerflüchtige mineralische Holzaschebestandteile (CaO , Al_2O_3 etc.), Holzascheverbindungen (KCl , Nitrate etc.), schwerflüchtige Verunreinigungen im Holz wie Sand und Erde sowie Schwermetalle aus Verunreinigungen z. B. aus Farben und Beschichtungen.

Chlorwasserstoff/Dioxine und Furane. Die Bedeutung des Chlors beruht auf dessen Beteiligung an der Bildung von Chlorwasserstoff (HCl), von Dioxinen/Furanen (PCDD/F) und auf der Förderung von Korrosionseffekten. Trotz relativ hoher Chloreinbindungsraten in der Asche von 40 bis 95 % können beispielsweise die HCl -Emissionen bei bestimmten chlorreichen Brennstoffen (z. B. Getreidestroh) problematisch werden und Sekundärmaßnahmen erforderlich machen (Feinststaub-Abscheidung mit Trockenabsorption, Nasswäsche). Zusätzlich wirkt Chlor im Zusammenspiel mit Alkali- und Erdalkalimetallen und mit SO_2 z. B. an der Oberfläche der Wärmeübertrager korrosiv.

PCDD/F ist die Sammelbezeichnung für über 200 Verbindungen aus der Gruppe der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF), die zu den chlorierten Kohlenwasserstoffen zählen. Einige Dioxine, u. a. das 2,3,7,8 TCDD (Sevesogift), werden zu den gefährlichsten Umweltschadstoffen gerechnet und gelten als Supergifte (etwa 1 000-mal giftiger als Zyankali).



Nach heutigem Kenntnisstand gilt als treibende Kraft für die Dioxin- und Furanbildung bei der Verbrennung der sogenannte Deacon-Prozess. PCDD und PCDF entstehen in einem Temperaturbereich zwischen 250 bis 350 °C durch Oxychlorierung an Luft direkt aus aktivem Kohlenstoff.

Distickstoffoxid (N₂O). Distickstoffoxid (N₂O), auch Lachgas genannt, ist ein atmosphärisches Spurengas, welches heute in der mittleren Konzentration von 310 ppb vorliegt, die jährlich um rund 1 ppb ansteigt. Lachgas weist zwei Schadenswirkungen auf. Es trägt einerseits zum Treibhauseffekt bei und zum anderen wirkt es als Vorläufersubstanz für den Ozonabbau in der Atmosphäre. N₂O ist auf einen Zeitraum von 100 Jahren gerechnet 310-mal treibhauswirksamer als CO₂.

Die genauen Bildungswege für N₂O sind weit weniger als die von NO_x bekannt. Es wird vermutet, dass die Bildung von N₂O aus stickstoffhaltigen Pyrolysegasen (NH_x und HCN) erfolgt. Dabei gilt der HCN-Pfad als der hauptsächliche Bildungsweg von N₂O (Homogene N₂O-Bildung aus Brennstoffstickstoff). Weiterhin werden die homogene N₂O-Bildung aus Luftstickstoff sowie die heterogene N₂O-Bildung als Emissionsursache genannt. Zahlreiche Einflussfaktoren beeinflussen die Höhe der N₂O-Emissionen. Als erhöhend werden der Stickstoff- und Flüchtigengehalt im Brennstoff, die Erhöhung der Luftüberschusszahl λ , eine Flugaschenzirkulation sowie auf Grund des höheren Angebots an Stickstoffverbindungen im Feuerraum eine SNCR-Entstickung angesehen. Senkend wirken ein steigender Wassergehalt im Brennstoff sowie die Erhöhung der Temperatur und Verweilzeit. Der Einfluss einer Luft- und Brennstoffstufung, der Anlagenleistung und einer SCR-Entstickung ist bislang nicht geklärt.

Emissionsrelevante Brennstoffinhaltsstoffe. Bei einigen Schadstoffkomponenten wird das Emissionsniveau bei der Verbrennung im Wesentlichen vom Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalt im Brennstoff bestimmt.

Stickstoff. Der Stickstoff(N)-Gehalt ist auf Grund von Unterschieden im stofflichen Aufbau zwischen den verschiedenen Biomassen sehr verschieden. Pflanzen oder Pflanzenteile mit einem hohen Eiweißgehalt haben grundsätzlich höhere Stickstoffgehalte als die typischen Lignocellulosematerialien wie Holz oder Stroh. Das gilt vor allem für die generativen Organe bei Getreide, Ölsaaten und Proteinpflanzen oder für Halmgüter mit einem hohen Futterwert;



entsprechend hoch ist damit der Stickstoffgehalt in Getreidekörnern, Getreideganzpflanzen und Futtergräsern. Fichtenholz weist dagegen mit 0,1 bis 0,2 % (1 000 bis 2 000 mg/kg TM) sehr geringe Stickstoffgehalte auf, während Getreidestroh in der Regel bei 0,5 % in der Trockenmasse liegt. Die Schwankungen innerhalb eines bestimmten Biomassesortiments sind dabei allerdings relativ gering. Vor allem auf Grund der Unterschiede bei der Stickstoffdüngung sind die Schwankungsbreiten der Stickstoffgehalte bei allen Nicht-Holzbrennstoffen größer als beim Holz.

Schwefel. Der Schwefel(S)-Gehalt in biogenen Festbrennstoffen hängt stark vom jeweiligen makromolekularen Pflanzenaufbau ab, da Schwefel auch am Aufbau einiger Aminosäuren und Enzyme beteiligt ist. Außerdem ist er ein häufiger Begleitstoff in Düngemitteln. Daher ist die Schwefelzufuhr bei den Feldkulturen deutlich höher als bei ungedüngten Waldkulturen oder schnellwachsenden Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen.

Chlor. Chlor (Cl) kommt in Biomassen aus gedüngten Feldkulturen in deutlich höheren Anteilen vor als im Holz, da im Waldbau und in Kurzumtriebsplantagen meist keine Düngemittel eingesetzt werden. Holzbrennstoffe zeigen mit ca. 0,005 bis 0,02 % in der TM so niedrige Chlorgehalte in der Biomasse, dass oft die Nachweisgrenze bestimmter Bestimmungsverfahren unterschritten wird. Dagegen ist der Chlorgehalt im Getreidestroh mit ca. 0,2 bis 0,5 % der TM um ein Vielfaches höher; in küstennahen Gebieten sind sogar Werte über 1 % möglich. Sehr hohe Konzentrationen kommen meist in Raps- und Sonnenblumenstroh (ca. 4 700 bzw. 8 100 mg/kg TM) bzw. im Wiesenheu (z. B. Weidelgras) vor.

Die Chlorgehalte von Nicht-Holzbrennstoffen liegen in einer relativ großen Spannweite. Diese Unterschiede werden zum einen durch die Chlorfrachten, die über die ausgebrachten Düngemittel auf die Anbaufläche eingetragen werden, und zum anderen durch die Chlor-Auswaschung infolge von Niederschlägen aus dem bereits abgestorbenen Pflanzenmaterial beeinflusst. Durch eine solche Auswaschung kann der Chlorgehalt um 60 bis 80 % gesenkt werden; aus verbrennungstechnischer Sicht ist deshalb ausgewaschenes "graues" Stroh gegenüber frischem "gelben" Stroh zu bevorzugen.

Spurenelemente. Im Unterschied zu den Hauptelementen sind die Schwankungsbreiten bei den Spurenelementen deutlich größer. Dennoch zeigen naturbelassene Biomasse-Brennstoffe



einige Besonderheiten. Im Allgemeinen sind z. B. Holzbrennstoffe aus dem Wald gegenüber den jährlich erntbaren Kulturen mit Schwermetallen meist höher belastet. Beispielsweise nimmt die Rinde von Nadelhölzern bei den meisten Schwermetallgehalten eine Spitzenstellung ein. Dies liegt primär zum einen an der langen Umtriebszeit, in der die Waldbäume die Schwermetalleinträge aus der Atmosphäre akkumulieren können, und zum anderen an den niedrigen pH-Werten der Waldböden, wodurch sich die Schwermetall-Löslichkeit und damit auch die Pflanzenaufnahme erhöhen. Eine Ausnahme bildet hier der Cadmium(Cd)-Gehalt, der auf Grund eines offenbar spezifischen Aneignungsvermögens bei Weiden besonders hoch ist. Ansonsten werden bei Holz aus Kurzumtriebsplantagen bei Nickel, Chrom und vor allem Quecksilber, Blei und Molybdän vergleichsweise niedrige Konzentrationen gemessen.

Verbrennungsrückstände (Aschen, Schlacken). Neben den technischen Auswirkungen auf die Auslegung einer Feuerungsanlage ist der Aschegehalt eines Brennstoffs auch eine umweltrelevante Kenngröße. Mit zunehmendem Aschegehalt steigen – insbesondere für Feuerungen, bei denen das Glutbett vermehrt mechanischen Einflüssen ausgesetzt ist oder hohe Gasgeschwindigkeiten vorherrschen – die freigesetzten Staubfrachten und damit der Aufwand für eine ggf. notwendige Entstaubung. Zudem wachsen bei erhöhtem Ascheanfall ggf. die Umweltwirkungen bei der Verwertung und Entsorgung.

Von allen biogenen Festbrennstoffen besitzt Holz (einschließlich Rinde) mit ca. 0,5 % in der Trockenmasse den geringsten Aschegehalt. Größere Überschreitungen dieses Wertes sind meist auf Sekundärverunreinigungen (z. B. anhaftende Erde) zurückzuführen. Getreidestroh weist durchschnittliche Aschegehalte zwischen 4,8 und 5,7 % auf; bei Getreideganzpflanzen liegt er leicht (4,1 bis 4,4 % der TM) und bei Getreidekörnern deutlich darunter (2,0 bis 2,7 % i. d. TM).

Die in größeren Biomassefeuerungen anfallende Asche setzt sich in der Regel aus drei unterschiedlichen Fraktionen zusammen, der Grob- oder Rostasche, der Zyklonasche sowie der Feinstflugasche; sie fallen je nach Feuerung oder Abscheidetechnik zum Teil separat an. Für Kleinanlagen (z. B. Scheitholzkessel, häusliche Hackschnitzelkessel, Halmgutfeuerungen bis 100 kW Nennwärmeleistung), in denen keine Entstaubungseinrichtungen verwendet werden, ist eine solche Separierung nur bei der periodischen Reinigung möglich. Der typische Anteil der Feuerraumasche liegt bei 84 bis 98 % des Gesamtascheanfalls; die im Wärmeübertrager abgeschiedene Asche liegt bei etwa 2 bis 16 % und die Asche aus dem



Kaminsystem bei 2 bis 4 % (Scheitholzfeuerungen) bzw. bei weniger als 0,4 % der Gesamtaschemenge (automatisch beschickte Kleinanlagen). Die einzelnen Aschefraktionen weisen hinsichtlich ihrer möglichen Umweltbeeinflussungen deutliche Unterschiede auf (Schwermetallgehalte und organische Schadstoffe).

Schwermetallgehalte. In den Aschen können Schwermetalle enthalten sein. Die Gehalte der meisten umweltrelevanten Schwermetalle nehmen von der Grob- bis zur Feinstflugasche deutlich zu (z. B. As, Cd, Pb, Zn, Hg). Generell sind die mittleren Schwermetallkonzentrationen von Stroh- und Ganzpflanzenaschen im Vergleich zu denen von Holzaschen deutlich geringer (um den Faktor 3 bis 20). Durch die lange Umtriebszeit der Wälder (70 bis 120 Jahre) kommt es zu höheren Schwermetallakkumulationen im Brennstoff.

Auch nehmen die Schadstoffbelastung von Grobaschen über Zyklonflugaschen bis zur Feinflugasche (z. B. aus Elektro- oder Gewebefiltern) bei allen Brennstoffarten fast durchweg deutlich zu. Dabei tragen die hochbelasteten Filteraschen mit ca. 2 bis 10 % nur zu einem relativ geringen Teil zur Gesamtasche bei; gleiches gilt auch für die Zyklonflugasche (ca. 10 bis 35 %). Bei Anlagen mit Rauchgaskondensation können zusätzlich noch Schlämme anfallen; die darin enthaltenen Stäube weisen ähnlich hohe Schwermetallgehalte wie Feinflugaschen auf.

Im Vergleich zu Aschen aus der Verbrennung naturbelassener Hölzer sind die Schwermetallgehalte in Industrierestholz- und Altholzaschen höher, wobei letztgenannte wiederum noch deutlich über denen von Industrierestholz liegen. Die Anreicherung der leicht flüchtigen Schwermetalle Cadmium (Cd), Blei (Pb), Arsen (As) und Zink (Zn) mit sinkender Abscheidetemperatur und zunehmender Feinheit der anfallenden Aschefraktionen ist hier gleichermaßen wie bei den naturbelassenen Biomassen ausgeprägt.

Organische Schadstoffe. Die Gehalte an organischen Schadstoffen in Holz-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen (u. a. PCDD/F, PAK) in den Grob- und Zyklonaschen sind nach heutigem Kenntnisstand sehr gering (z. B. bei PAK in bei Hackschnitzelgrobaschen: 1,4 bis 1,7 mg/kg TM bzw. bei PCDD/F: 2,5 bis 33,5 ng TE/kg TM) und können als ökologisch unbedenklich eingestuft werden. In Feinstflugaschen sind organische Schadstoffe jedoch deutlich angereichert; das gilt auch für Feinaschen aus Kleinanlagen, die bei Reinigung des Wärmeübertragers oder des Kaminsystems anfallen.



1.1.4 Biogaserzeugung und -nutzung

Die anaerobe Fermentation der Gülle ist mit Umwelteffekten verbunden, die nachfolgend diskutiert werden. Es wird dabei insbesondere ein Vergleich zu den Effekten einer konventionellen Gülleverwendung angestellt.

Geruchsemissionen. Gegenüber konventionell verarbeiteter Gülle zeichnet sich vergorene Gülle auf Grund des bei der Vergärung stattfindenden Abbaus flüchtiger Fettsäuren (Phenol, Kresol) durch deutlich geringere Geruchsemissionen bei der Lagerung aus. Insgesamt ist von einer Abnahme der Geruchsstärke von 40 bis 60 % und von einer positiven Veränderung der Art des Geruchs auszugehen. Entsprechende Messungen belegen, dass eine Reduzierung der Geruchsemissionen von ca. 30 % eintritt, selbst wenn auf der Gülle keine Schwimmschicht vorhanden ist. Stärkere Schwimmschichten verstärken den Minderungseffekt, bei 3 bis 5 cm Schwimmschichtdicke liegt die Reduzierung bei ca. 52 %, bei über 10 cm Schichtdicke liegt sie bereits bei ca. 76 %.

Verätzungen bei Pflanzen. Die für das Pflanzenwachstum unerwünschten hohen Konzentrationen an organischen Säuren sind nach der Vergärung nicht mehr vorhanden. Damit geht die häufig von unbehandelter Gülle verursachte ätzende Wirkung auf Pflanzen und Bodenlebewesen weitgehend verloren. Die so behandelte Gülle kann daher auch als Kopfdünger, d. h. direkt auf die wachsenden Pflanzen, eingesetzt werden. Trotz anaerober Behandlung bleiben die für die Humusanreicherung des Bodens wichtigen schwer abbaubaren Kohlenstoffverbindungen erhalten. Der Abbau von Kohlenstoffverbindungen führt außerdem zu einer Verengung des C/N-Verhältnisses im Dünger; vergorenes Material ist daher schneller düngewirksam.

Hygienisierung. Die Hygienisierungswirkung einer Biogasanlage ist im Wesentlichen abhängig von der Aufenthaltszeit des Substrates, der Betriebstemperatur und den physikalisch-chemischen Bedingungen. Das Fehlen von Sauerstoff (Anaerobie) selbst scheint nur untergeordnete Bedeutung für die Hygienisierung zu haben. Hingegen wirkt offenbar das allgemeine Milieu bei der anaeroben Gärung (d. h. Exoenzyme, Säuregehalt, Redoxpotenzial) abtötend oder zumindest stark hemmend auf Pathogene. Speziell hygienisierend wirken anscheinend die Bedingungen der Hydrolyse. Auch die Temperaturen, bei denen der



Biogasprozess abläuft, beschleunigen die Absterberate von Pathogenen. In thermophil arbeitenden Anlagen erfolgt daher die Dezimierung bzw. Abtötung von Keimen deutlich schneller als in mesophil arbeitenden. Bakterien werden beispielsweise mesophil in der Regel innerhalb von wenigen Tagen um 90 % dezimiert. Unter thermophilen Bedingungen beträgt die Dauer bis zur 90-prozentigen Elimination höchstens wenige Stunden.

Auch Unkrautsamen sterben innerhalb der durchschnittlichen Aufenthaltszeit eines konventionellen Fermenters ab. In thermophilen Anlagen sowie unter den hydrolytischen Bedingungen im Zweistufenprozess erfolgt dies noch schneller.

Nitratauswaschung. Wird die Gülleanwendung hinsichtlich Zeitpunkt und Menge dem Nährstoffbedarf der Pflanzen angepasst, sind sowohl bei Roh- als auch bei vergorener Gülle nur geringe Nitratauswaschungen in das Grundwasser zu erwarten. Der Vorteil von vergorener Gülle besteht in der besseren Kalkulierbarkeit der N-Wirkung, die wiederum auf den höheren Gehalt an mineralisiertem Stickstoff zurückzuführen ist. Nachteile bringt der Einsatz vergorener Gülle jedoch im Falle der Ausbringung nach der Vegetationsperiode, da dabei erhöhte Nitratverluste zu erwarten sind.

Klimarelevante Emissionen. Hinsichtlich der Klimawirksamkeit relevant bei der anaeroben Fermentation der Gülle sind Lachgas-, Ammoniak und Methan-Emissionen.

Lachgas-Emissionen. Lachgas entsteht bei der Denitrifikation unter anaeroben Bedingungen. Eine Denitrifikation findet unter Abwesenheit von Sauerstoff statt, wenn leicht abbaubare organische Verbindungen sowie Nitrit bzw. Nitrat vorliegen. Da die leicht abbaubaren organischen Verbindungen bereits durch die Vergärung durch methanogene Bakterien verbraucht werden, ist bei der Biogaserzeugung von verminderten Lachgasemissionen gegenüber einer konventionellen Güllennutzung auszugehen. In Praxisuntersuchungen wurden Minderungseffekte in Höhe von 36 bis 71 % ermittelt. Die Höhe der Lachgasemissionen ist von der Art der Ausbringung der vergorenen Gülle abhängig. Zur Reduzierung der Emissionen sollte diese nur oberflächlich in den Boden eingearbeitet werden. Eine Injizierung in den Boden führt zu erhöhter Lachgasproduktion.

Ammoniak-Emissionen. Ammoniak entsteht bei der bakteriell bedingten Reduzierung von Stickstoffoxiden. Die erhöhten Ammoniakemissionen resultieren aus der erhöhten



Gärtemperatur und dem höheren pH-Wert des Substrats. Verglichen mit unbehandelter Gülle kommt es bei Lagerung von vergorener Gülle in offenen Behältern zu deutlich höheren Emissionen. Daraus leitet sich die Forderung nach einer Abdeckung der Güllelager ab. Bei der Gülleausbringung sind die Ammoniakemissionen bei vergorener Gülle innerhalb der ersten 20 Stunden nach der Ausbringung höher als bei unvergorener Gülle, über einen längeren Zeitraum sind sie jedoch niedriger. Der Umfang der Entgasung von Ammoniak kann durch eine bodennahe, bandförmige Ausbringung stark vermindert werden; sie liegt um mehr als 80 % niedriger als bei werfender, breitflächiger Ausbringung. Von Vorteil ist hier auch, dass die Homogenität und dadurch die Fließ- und die Versickerungsfähigkeit von ausgegaster Gülle verbessert wird.

Methan-Emissionen. Im Rahmen der Biogasnutzung kommt es zu Methan(CH_4)-emissionen aus dem Bioreaktor, dem Gasspeicher und aus dem Endlager. Die Lagerung von vergorener Gülle in offenen Behältern ist gegenüber unvergorener Gülle mit deutlich geringeren CH_4 -Emissionen verbunden. Wie die Geruchsemissionen ist auch die Höhe der Methanemission wesentlich von der Schwimmschichtstärke abhängig. Messungen zeigten eine Reduktion gegenüber unvergorener Gülle bei einer Schwimmschichtdicke von 2 bis 5 cm von ca. 23 bzw. 52 %; bei 5 bis 10 cm Schwimmschichtdicke von ca. 76 % bzw. 64 %. Bei der Ausbringung auf die landwirtschaftlichen Flächen zeigt die vergorene Gülle durchweg niedrigere Methanemissionen als das unvergorene Substrat.

Emissionen aus der Biogasverbrennung. Die Nutzung des Biogases erfolgt nahezu ausschließlich in Blockheizkraftwerken. Die drei wichtigsten eingesetzten Motortypen sind der Benzinmotor (Gas-Otto-Verfahren) und der Dieselmotor nach dem Gas-Otto-Verfahren sowie dem Zündstrahlverfahren.

Bei der Verbrennung von Biogas sind insbesondere NO_x -Emissionen, CO-Emissionen und Kohlenwasserstoffe (HC) sowie beim Zündstrahlmotor zusätzlich Rußpartikel mit Anteilen krebserregender Kohlenwasserstoffe relevant. Bei höherem Gehalt an Schwefelwasserstoff im Biogas können auch SO_2 -Emissionen und H_2S -Emissionen von Bedeutung sein. Die Höhe der Schadstoffemissionen ist wesentlich vom Methangehalt des Biogases und vom Verbrennungsluftverhältnis abhängig. Ein zunehmender Methangehalt führt zur Senkung der HC-Emissionen und zum Anstieg der NO_x -Emissionen. Die CO-Emissionen sinken bis zu einem Methangehalt von 85 Vol.-% (dem maximal in der Praxis



vorkommenden Methangehalt von Biogasen). Die Erhöhung des Verbrennungsluftverhältnisses über 1 führt zur Reduzierung der NO_x -Emissionen. Die HC-Emissionen nehmen dabei zu und die CO-Emissionen bewegen sich trotz Erhöhung auf konstant niedrigem Niveau.

Neben CH_4 , CO_2 , N_2 und O_2 enthält Biogas noch weitere Bestandteile, die emissionsrelevant sein können. Schwefelwasserstoff stellt dabei den kritischsten Schadstoff dar; die Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas liegen aber bei Kovergärungsanlagen stets unter 70 mg/m_3 und damit deutlich niedriger als in reinen Gülleanlagen (maximal 310 mg/m_3).

Ammoniak, Chlor, Fluor und Mercaptane lagen im Biogas unter der Nachweisgrenze, ebenso die von Benzol, Ethylbenzol, Xylol und Cumol. Toluol überschritt die Nachweisgrenze geringfügig nur - in wenigen Fällen. Das Gleiche trifft für PAK zu.

Die Gasotomotoren, insbesondere kleiner Leistung, arbeiten vorrangig nach dem Prinzip des Magergemischkonzepts. Die Grenzwerte der TA Luft werden damit sicher eingehalten. Verbunden sind damit in der Regel Emissionen von maximal (500 mg/Nm_3 NO_x und 650 mg/Nm_3 CO (bei 5 % Bezugssauerstoffgehalt). Im Verbindung mit einem Oxidationskatalysator (Oxikat), der die CO- und HC-Emissionen mindert, können auch die halben Grenzwerte erreicht werden.

Zündstrahlmotoren weisen verglichen mit den Gasmotoren konstruktionsbedingt höhere Schadstoffemissionen auf. Bei den mit Luftüberschuss betriebenen Diesel- und Dieselmotoren ist neben den Primärmaßnahmen durch selektive katalytische Reduktion (SCR-Verfahren) eine NO_x -Emissionsverringerung möglich. Aus Kostengründen wird dieses Verfahren jedoch nur bei großen Maschinen eingesetzt. Ab 500 kW elektrischer Leistung sind jedoch bereits zahlreiche Maschinen mit SCR-Katalysator ausgerüstet und erreichen damit NO_x -Emissionen von unter 300 mg/Nm_3 . Zur Oxydation der CO und HC-Emissionen muss ein zusätzlicher Oxydationskatalysator mit dem SCR-Katalysator kombiniert werden. In diesem Fall sind CO-Emissionen von unter 325 mg/Nm_3 erzielbar.

Die niedrigsten Schadstoffemissionen werden beim Betrieb von Gasmotoren mit sehr geringem Luftüberschuss ($\lambda \approx 1$) und einem Dreiwege-Katalysator erreicht. Durch die nicht-selektive katalytische Reduktion (NSCR) lassen sich Werte für NO_x von $< 10 \text{ mg/Nm}_3$, für CO von $< 60 \text{ mg/Nm}_3$ und für HC von $< 10 \text{ mg/Nm}_3$ erzielen. Die Partikelkonzentration beim Betrieb von Biogasmotoren liegen selbst beim Zündstrahlmotor unter 8 mg/Nm_3 , so dass Emissionsminderungsmaßnahmen nicht notwendig sind.



2 Konkurrierende Interessenlagen bei der Nutzung von Biomasse

Bei der Analyse einer möglichen Konkurrenzsituation einer Biomassenutzung mit anderen berechtigten Interessen z. B. des Natur- und Umweltschutzes muss unterschieden werden zwischen der Nutzung von Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen auf der einen Seite und Energiepflanzen auf der anderen.

Bei ersteren besteht – wenn es sich um Abfälle "im klassischen Sinn" handelt – i. Allg. keine Konkurrenzsituation, da Abfälle bisher meist sowieso abgelagert bzw. anderweitig entsorgt werden. Eine energetische Nutzung fällt hier zusammen mit einer – gesetzlich sowieso im Rahmen des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorgeschriebenen – Inertisierung des organischen Materials. Hinzu kommt, dass durch beispielsweise eine thermische Nutzung derartiger Abfälle organischer Herkunft umweltfreundlich und klimaverträglich Energie bereitgestellt werden kann und dadurch energiebedingte Umwelteffekte durch die Nicht-Nutzung der jeweils substituierbaren fossilen Energien vermieden werden.

Handelt es sich um Rückstände und Nebenprodukte organischer Herkunft aus der Industrie, in denen organisches Material verarbeitet wird (z. B. Industrierestholz, Abfälle aus der Lebensmittelverarbeitung), liegen die Zusammenhänge i. Allg. ähnlich. Auch hier sind mit einer Nutzung meist keine irgendwie gearteten signifikanten Konkurrenzsituationen im Bezug auf Natur- und Umweltschutzaspekte gegeben. Oft ist eher das Problem, diese Abfallstoffe umweltfreundlich und klimaverträglich zu entsorgen (z. B. wird die hier z. T. noch realisierte Ablagerung derartigen Materials dann aber nach dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz nicht mehr möglich sein). Damit kann eine energetische Nutzung mit einer Vielzahl von – auch aus Sicht der Umwelt – Vorteilen verbunden sein. Zusätzlich kann es – wie auch bei den Abfällen – durch die Substitution fossiler Energieträger zu einer entsprechenden Umweltentlastung bei den klassischen Umweltbelastungen infolge der Nutzung z. B. fossiler Energieträger kommen.

Anders ist die Situation, wenn es sich um Rückstände und Nebenprodukte aus der land- und forstwirtschaftlichen Produktion handelt. Aufgrund der jedoch i. Allg. unterschiedlichen Randbedingungen zwischen der klassischen Land- und der typischen Forstwirtschaft sind hier die Randbedingungen jedoch unterschiedlich.



- Durch die energetische Nutzung von z. B. Waldrest- oder Schwachholz kommt es zu einem Entzug von organischer Masse aus dem Wald, da diese Waldholzfraktionen bisher – zumindest zum überwiegenden Teil – meist im Wald verbleiben. Da aus ökonomischen Gründen jedoch meist nur die dickeren Äste des Waldrest- und Schwachholzes einer energetischen Nutzung zugeführt werden und das Reisholz einschließlich der unterirdischen Biomasse sowie der Laub- und Nadelmasse i. Allg. im Wald verbleibt, hält sich der Nährstoffentzug nach Aussagen vieler Förster in Grenzen. Dies liegt darin begründet, dass die wesentlichen im Kreislauf befindlichen Nährstoffe sich in der Laub- bzw. Nadelmasse und in der Rinde befinden. Wesentliche Umwelteffekte sind hier deshalb i. Allg. nicht zu erwarten. Auch besteht keine Konkurrenzsituation mit anderen Nutzungsoptionen, da das Waldrestholz i. Allg. nicht weitergehend genutzt wird. Inwieweit der Entzug dieses meist im Wald verrottenden Materials einen Einfluss auf die (schützenswerte) Tier- und Pflanzenwelt hat, muss hier offen gelassen werden. Da jedoch aus ökonomischen Gründen immer nur die eher dickeren Holzteile aus dem Wald entzogen werden würden – und damit die dünneren Äste auch weiterhin auf der Waldfläche verbleiben – dürfte sich auch der Einfluss auf die Tier- und Pflanzenwelt in Grenzen halten.
- Bei der Nutzung landwirtschaftlicher Rückstände und Nebenprodukte (z. B. Stroh, Gülle) kann diese Situation anders sein; sie muss es aber nicht. Hier kann – z. B. beim Stroh – der Fall gegeben sein, dass es durch die energetische Strohnutzung zu einem Entzug von organischer Masse von der Anbaufläche kommt und dadurch der Nährstoff- und Humusgehalt – mit allen damit verbundenen Konsequenzen – abnimmt. Andererseits tritt auch der Fall auf, dass das Stroh der Anbaufläche aufgrund unterschiedlichster landbaulicher Notwendigkeiten entzogen werden muss; dann wäre eine energetische Nutzung auch aus ökologischer Sicht positiv zu bewerten. Beide Fälle kommen in der Praxis vor und sind u. a. abhängig von den Boden-, Klima- und Management-Bedingungen, unter denen die Landwirtschaft jeweils betrieben wird. Damit kann es eine Konkurrenzsituation geben, muss aber nicht. Eine energetische Nutzung kann beispielsweise auch eine optimale Ergänzung darstellen, insbesondere dann, wenn die Asche anschließend wieder auf die Anbaufläche ausgebracht wird und dadurch die Stoffkreisläufe – näherungsweise – geschlossen werden.

Anders kann die Situation bei Energiepflanzen sein. Hier gibt es aufgrund der Flächenbindung logischerweise eine Konkurrenzsituation mit einer alternativen



Flächennutzung. Damit steht der Energiepflanzenanbau a priori in Konkurrenz zu einer Extensivierung der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion (d. h. Ökologisierung der Landwirtschaft), einer Flächenstilllegung aus ökologischen Gründen und/oder einer alternativen Flächennutzung (z. B. als Biotop u. a. im Rahmen einer angestrebten Biotopvernetzung). Aus diesem Grund ist die Problematik der Konkurrenzsituation hier eine Frage der Bewertung der Umweltaspekte der Optionen zur Flächennutzung, die alternativ zu einem Energiepflanzenanbau realisiert werden können. Damit ist die Problematik sehr vielschichtig und kaum eineindeutig beantwortbar.

Wird unterstellt, dass die derzeitige Landwirtschaft extensiver erfolgen soll, wie es im politischen Raum verstärkt gefordert wird, dann steht ein Energiepflanzenanbau dem konsequenterweise im Wege. Unter diesen Bedingungen werden zur Bereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln mehr (knappe) Flächen in Deutschland benötigt. Aufgrund der a priori begrenzten landwirtschaftlichen Nutzflächen in Deutschland ist dann eine Interessenkollision mit einem verstärkten Energiepflanzenanbau gegeben, wenn unterstellt wird, dass sich der Nahrungsmittelbedarf und seine Zusammensetzung nicht ändert (d. h. der derzeitige Anteil beispielsweise an Fleisch beibehalten wird; anders könnte die Situation dann sein, wenn der Anteil der pflanzlichen Bestandteile in der Nahrung des durchschnittlichen Bundesbürgers deutlich zunimmt, da vegetarische Nahrung deutlich (flächen-)effizienter produziert werden kann). Zusätzlich wird dabei unterstellt, dass kein verstärkter Nahrungsmittelimport realisiert wird. Letzterer würde das Problem grundsätzlich aber auch nicht lösen, sondern nur regional verlagern (werden beispielsweise mehr Nahrungsmittel aus Polen importiert, müssen dort mehr Flächen "unter den Pflug" genommen werden oder es muss intensiver produziert werden – mit allen damit verbundenen Konsequenzen). Zusammenfassend ist damit unter der Prämisse, dass die gegenwärtige Art der Nahrungs- und Futtermittelproduktion in Deutschland als intensiv angesehen wird, mit einer deutlichen Interessenkollision bei einem verstärkten Energiepflanzenanbau auszugehen, wenn nicht Konzepte gefunden werden können, einen Energiepflanzen- und einen Nahrungsmittelanbau zu kombinieren; derartige Konzepte sind aber bisher kaum verfügbar.

Wird jedoch von einer überwiegend integrierten Landwirtschaft in Deutschland ausgegangen – und unterstellt, dass der gegenwärtige Intensitätslevel der landwirtschaftlichen Nahrungsmittel-Produktion ein guter Kompromiss zwischen den ökonomischen Zwängen und den berechtigten Forderungen des Umwelt- und Naturschutzes darstellt – dann lassen sich sehr wohl Modelle identifizieren, mit denen Energiepflanzen sinnvoll und umweltverträglich



in die entsprechenden Fruchtfolgen eingebunden werden können. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund der schon jetzt realisierten Flächenstilllegung in Deutschland. Unter diesen Prämissen kann dann ein Energiepflanzenanbau mit zusätzlichen positiven Umwelt- und Naturschutzaspekten – im Vergleich zu einer entsprechenden Nahrungs- bzw. Futtermittelproduktion – verbunden sein, da Energiepflanzen – zumindest die zur Bereitstellung biogener Festbrennstoffe – i. Allg. extensiver und damit umweltfreundlicher produziert werden als konventionelle Nahrungs- bzw. Futtermittelpflanzen. Diese Aussage gilt aber nur eingeschränkt, da sich strenggenommen ja nicht die Frage nach den Umwelt- und Naturschutzaspekten einer Nahrungsmittelproduktion im Vergleich zu einem Energiepflanzenanbau, sondern die Frage Energiepflanzenanbau versus Flächenstilllegung stellt. Aber selbst unter letzterer Prämisse kann ein Energiepflanzenanbau mit positiven Umwelt- und Naturschutzaspekten verbunden sein, wenn die Energiepflanzen sinnvoll nach guter fachlicher Praxis in die jeweiligen Fruchtfolgen eingebunden werden. Es lassen sich umweltverträgliche Wege finden, wie Energiepflanzen sinnvoll und umweltverträglich – ohne Interessenkonflikte – in die entsprechenden Fruchtfolgen unter Minimierung unerwünschter Umwelteffekte eingebunden werden können.

Im Unterschied dazu kann auch unterstellt werden, dass die gegenwärtige Art der Landwirtschaft schon extensiv ist. Unter dieser Prämisse könnte durch eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Nahrungs- und Futtermittelproduktion – wie sie beispielsweise vor 20 Jahren üblich war – Überschuss-Flächen verfügbar gemacht werden. Diese könnten dann frei von Interessenkonflikten für einen Energiepflanzenanbau genutzt werden. Dies war und ist aber nicht das Ziel der Landwirtschaftspolitik weder in Europa noch in Deutschland. Deshalb hat diese Variante keine praktische Bedeutung.

Summa summarum kann es damit durchaus eine Konkurrenzsituation zwischen einer Biomassenutzung und anderen – berechtigten – Interessen geben. Dieses Spannungsfeld ist jedoch in vielen Fällen einfach aufzulösen bzw. es lassen sich oft einfach umsetzbare und meist auch praktisch akzeptierbare Kompromisse bzw. allen berechtigten Interessen Rechnung tragende Konzepte finden. Dies gilt auf jeden Fall für Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle; hier kann eine energetische Nutzung die anderen Interessen eher noch unterstützen (dies ist auch mit ein Grund, weshalb derartige organische Stoffe bisher am weitgehendsten energetisch genutzt werden). Dies gilt jedoch für Energiepflanzen nur eingeschränkt, da für ihren Anbau (in Deutschland knappe) Flächen benötigt werden. Bleibt der Anteil an Energiepflanzen jedoch klein im Vergleich zu der gesamten bewirtschafteten



landwirtschaftlichen Nutzfläche, dann lassen sich ebenfalls sinnvolle und akzeptierbare Kompromisse finden, die durch einen entsprechenden Interessenausgleich gekennzeichnet sind. Das hat aber die Konsequenz, dass die Potenziale der Energiepflanzen – vor dem Hintergrund der Dimensionen im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland – eher klein bleiben und damit die energiewirtschaftliche Bedeutung dieser Option gering ist. Sollen nämlich Energiepflanzen einen merklichen Beitrag zur Deckung der Energienachfrage in Deutschland leisten, werden entsprechend große Flächen benötigt, die nur zur Verfügung gestellt werden können, wenn die Nahrungsmittelpflanzen intensiver – und damit die gleiche Menge auf kleinerer Fläche – erzeugt werden; dies hat dann wieder entsprechende Umweltauswirkungen zur Folge.

Hinzu kommt noch, dass Energiepflanzen zusätzlich konkurrieren mit dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen zur Bereitstellung von Werkstoffen und Produkten. Derartige Optionen, die entsprechend dem gegenwärtigen politischen Wunsch mehr an Bedeutung gewinnen sollen und dies grundsätzlich auch könnten, benötigen ebenfalls entsprechende Anbauflächen. Zusätzlich müssen Pflanzen bzw. Pflanzenkomponenten, die stofflich genutzt werden sollen, a priori mit einer höheren Wertschöpfung verbunden sein als Energiepflanzen, wenn der Anbau aus ökonomischer Sicht sinnvoll sein soll (für die Herstellung von Produkten aus Pflanzen wird Energie benötigt; folglich muss der Wert des Produktes höher sein als der der Energie). Damit besteht hier eine zusätzliche Konkurrenzsituation, die jedoch tendenziell immer zu Ungunsten der Energiepflanzen ausgehen wird; dies zeigt auch die Entwicklung der Flächenbelegung in den letzten Jahren. Und die für einen Energiepflanzenanbau verfügbaren Flächen dürften dadurch weiter eingeschränkt werden. Sinnvoll – und im Sinne einer Maximierung der Interessenbündelung – wäre hier eher – und dies wird auch angestrebt – eine optimale Kombination zwischen einer stofflichen und einer energetischen Nutzung. Derartige Beispiele könnten z. B. die Produktion von Flachsfasern für die Herstellung von Autositzen sein, die anschließend problemlos thermisch entsorgt werden können, die Herstellung von Dämmmaterialien aus Stroh, die anschließend ebenfalls problemlos verbrannt werden können, oder die Herstellung von Arzneipflanzen, die nach dem Entzug der gewünschten Inhaltsstoffe auch thermisch nutzbar sind. Damit können auch hier trotz der scheinbaren Konkurrenzsituation Konzepte entwickelt werden, wie sich auch unter ökonomischen Gesichtspunkten entsprechende Interessenausgleiche finden lassen.



3 Ökonomischer und ökologischer Vergleich von energiewirtschaftlichen Nutzungsoptionen

3.1 Analyse ökonomischer Größen

Die in II. 5.1 dargestellten Optionen zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung können auch anhand der jeweiligen ökonomischen Kenngrößen – hier der Strom- bzw. Wärmegestellungskosten – miteinander verglichen werden. Abb. III-1 zeigt einen derartigen qualitativen Vergleich der unterschiedlichen Optionen einschließlich der sich abzeichnenden Kostentendenzen.

Aus Abb. III-1 wird deutlich, dass die Situation bei den Investitionskosten und den jeweiligen Kostenreduktionspotenzialen, bei den Betriebskosten und den resultierenden Energiegestehungskosten im Wesentlichen die gegenwärtige Situation der Nutzung dieser Optionen am Markt widerspiegeln. Die Optionen, die schon seit Jahren marktgängig sind (z. B. die Wärmebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen), zeichnen sich durch die geringsten Kosten aus. Im Unterschied dazu sind die Optionen, die noch vergleichsweise fern der Markteinführung sind und sich damit noch im F&E-Stadium befinden, durch entsprechend höhere Kosten gekennzeichnet. Dies gilt nur eingeschränkt für eine RME-Produktion, da diese a priori durch einen entsprechend hohen technischen Aufwand – und damit entsprechend hohe Kosten – gekennzeichnet ist und zusätzlich nur ein (kleiner) Teil der insgesamt auf den Feldern wachsenden Biomasse auch genutzt werden kann.



	Investkosten	Kost.-Red. Potenziale	Betriebskosten	Energiegest.kost.	Kosten-Tendenz
Verbrennung - Wärme	€	gering	€(€)	€	→
Verbrennung - Strom	€€	gering	€€	€€	↘
Vergasung	€€€	hoch	€€€	€€€	↘
(Pyrolyse)	€€€€	hoch	€€€	€€€€	↘
Biogaserz.	€€	moderat	€€	€€	↘
Alkoholgew.	€€€	gering	€€	€€(€)	↘
PME-Prod.	€€	gering	€€	€€	→

Abb. III-1: Kostenrelationen und Kostentendenzen einer Strom-, Wärme- und/oder Kraftbereitstellung aus Biomasse (€ relativ sehr kostengünstig; €€ relativ kostengünstig; €€€ relativ teuer; €€€€ relativ sehr teuer)

Auch die in Abb. III-1 deutlich werdenden Kostentendenzen spiegeln diese Tendenz weitgehend wieder. Signifikante Kostenreduktionen können nur dort noch erwartet werden, wo die entsprechende Technik noch vergleichsweise am Anfang der technischen Entwicklung steht. Entsprechend sind bei diesen Optionen, die bereits seit Jahren marktgängig sind, aus gegenwärtiger Sicht kaum noch substantielle Kostenreduktionspotenziale erschließbar.

3.2 Analyse ökologischer Größen

Die in II. 5.1 dargestellten Optionen zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung werden im Folgenden zusätzlich anhand ausgewählter ökologischer Kenngrößen miteinander verglichen; dabei wird unterschieden zwischen ausgewählten Umwelteffekten der Vorketten und an der Anlage einerseits und bestimmten Umwelteffekten im Lebensweg (d. h. CO₂-Äquivalente (Aspekt "Anthropogener Treibhauseffekt"; d. h. die gewichtete Summe aus CO₂, N₂O und CH₄) und SO₂-Äquivalente (Aspekt "Versauerung von Böden und Gewässern"; d. h. die gewichtete Summe aus SO₂, NO_x, NH₃ und HCl)); deren Ermittlung liegt jeweils eine Lebenswegbetrachtung entsprechend der Ökobilanzmethodik zugrunde.

Aus Abb. III-2 wird deutlich, dass auf der Basis der hier summarisch betrachteten Umwelteffekte bei den Vorketten alle die Optionen, die Biomasse, die aus Abfall-,



Nebenprodukt- und/oder Rückstands-Fractionen stammt, einsetzen, i. Allg. durch entsprechend geringe Umwelteffekte gekennzeichnet sind. Im Unterschied können die Umwelteffekte in den Vorketten dann ggf. hoch sein, wenn Biomasse speziell – mit einem hohen Aufwand bzw. einem hohen Betriebsmitteleinsatz – angebaut werden muss; dies ist beispielsweise bei der Ölsaatenproduktion auf der Basis von Raps der Fall.

Bezüglich der Umwelteffekte an der Anlage kann i. Allg. davon ausgegangen werden, dass diese immer dann gering bis sehr gering sind, wenn die Anlagentechnologie bereits seit Jahren – auch in Bezug auf die Einhaltung der administrativen Umweltschutzvorgaben – optimiert wurde. Bei den Möglichkeiten einer Biomassenutzung, die noch vergleichsweise am Anfang der technischen Entwicklung stehen, kann dies anders sein, da hier dann die Anlagentechnologie noch in Bezug auf die Minimierung der Umwelteffekte optimiert werden muss. Unabhängig davon sind aber auf jeden Fall die gesetzlichen Vorgaben zum Umweltschutz einzuhalten. Deshalb ist bei allen Optionen, die genehmigungsfähig sind – und das müssen sie sein, wenn sie großtechnisch kommerziell eingesetzt werden sollen –, davon auszugehen, dass sie mit insgesamt relativ geringen Umwelteffekten verbunden sind.

	U-Effekte Vorketten	U-Effekte Anlage	CO ₂ -Äqui- valente	SO ₂ -Äqui- valente
Verbrennung - Wärme	gering	gering	- - -	- - (-)
Verbrennung - Strom	gering	moderat	- - (-)	- - (-)
Vergasung	gering	hoch	- -	- -
(Pyrolyse)	gering	hoch	-	-
Biogaserz.	gering	moderat	-	- -
Alkoholgew.	moderat	moderat	- -	- -
PME-Prod.	hoch	moderat	- -	- -

Abb. III-2: Vergleich ausgewählter Umwelteffekte einer Strom-, Wärme- und/oder Kraftbereitstellung aus Biomasse (- gering; - - sehr gering; - - - noch geringer)

Werden von den Effekten, die sinnvoll im Lebensweg quantifizierbar sind, exemplarisch die CO₂- und SO₂-Äquivalente analysiert, zeigt sich, dass alle Optionen einer Biomassenutzung im Hinblick auf eine Reduktion derartiger energiebedingter Umwelteffekte



vielversprechend sind. Dies gilt jedoch für die unterschiedlichen Optionen in einem verschiedenen Ausmaß. Bei den Optionen, die – da systemtechnisch-immanent oder aufgrund des Standes der Technik – noch durch einen geringen Umwandlungsnutzungsgrad gekennzeichnet sind, sind die hier exemplarisch betrachteten Umwelteffekte im Lebensweg vergleichsweise hoch. Dies gilt im umgekehrten Sinn nicht für die Optionen, die durch einen entsprechend hohen Nutzungsgrad der gesamten Bereitstellungskette gekennzeichnet sind; derartige Optionen sind i. Allg. aus ökologischer Sicht vergleichsweise vielversprechend.

3.3 Zusammenfassung

Ziel dieser Ausführungen ist es, die Möglichkeiten einer Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung aus Biomasse anhand technischer, ökonomischer und ökologischer Kenngrößen sowie der Potenziale und der Kosten zu vergleichen.

Die erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden (Abb. III-3).

- Die Technik insbesondere zur Wärme-, aber auch zur Strom- und Krafterzeugung aus Biomasse ist für eine ganze Reihe von Möglichkeiten vorhanden und kommerziell verfügbar. Dies gilt bei der Nutzung von Biomasse insbesondere für eine Wärmebereitstellung über die Verbrennung. Eine Strombereitstellung aus Biomasse über eine Zufeuerung in vorhandenen Kohlekraftwerken und in Feuerungsanlagen mit einem konventionellen Dampfprozess ist ebenfalls Stand der Technik wie eine Produktion und Nutzung von Biogas. Demgegenüber befindet sich die Stromerzeugung durch Vergasung noch im Demonstrationsstadium und durch Pyrolyse noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Auch eine Kraftbereitstellung aus PME ist Stand der Technik und marktgängig. Demgegenüber ist ein Einsatz von Ethanol aus zucker-, stärke- und/oder cellulosehaltiger Biomasse ebenso wie ein Einsatz von Biogas und Bioöl im Traktionsbereich noch in der Entwicklung.



	Technik	Ökonomie	Ökologie	Potenziale	Nutzung
Verbrennung - Wärme	+++	€	+++	+++	+++
Verbrennung - Strom	++(+)	€€	++(+)	+++	++
Vergasung	+(+)	€€€	+(++)	+++	
(Pyrolyse)	(+)	€€€€	(+++)	++(+)	
Biogaserz.	++(+)	€€	++(+)	++(+)	++
Alkoholgew.	+(++)	€€€	++(+)	+(+)	
PME-Prod.	+++	€€(€)	++(+)	+	+

Abb. III-3: Qualitativer Vergleich der untersuchten Optionen einer Strom-, Wärme- und/oder Kraftbereitstellung aus Biomasse (+ relativ weniger vielversprechend bzw. relativ gering; +++ relativ sehr vielversprechend bzw. relativ hoch; € relativ kostengünstig; €€€€ relativ teuer)

- Alle untersuchten Optionen sind durch vergleichsweise hohe technische Potenziale und eine bisher nur sehr eingeschränkte Nutzung gekennzeichnet. Damit steht von Seiten der vorhandenen Potenziale einer weitergehenden Nutzung der Biomasse nichts im Wege.
- Werden die Möglichkeiten einer Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung aus Biomasse anhand ökonomischer Größen verglichen, zeigt sich, dass eine Wärmebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen in vielen Fällen vergleichsweise kostengünstig ist. Auch eine Stromerzeugung in Anlagen mit einem Dampfprozess und/oder aus Biogas kann aus ökonomischer Sicht vergleichsweise vielversprechend sein.
- Ein Vergleich aus ökologischer Sicht macht deutlich, dass alle Möglichkeiten zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung aus Biomasse – in einem unterschiedlichen Ausmaß – zur Entlastung der Umwelt beitragen können. Besonders vielversprechend erscheinen hier die Optionen, die bereits weitgehend im Hinblick auf eine Minimierung der Umwelteffekte optimiert wurden.

Zusammengenommen erscheint damit eine Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung aus Biomasse auf der Basis der hier analysierten Kenngrößen sehr vielversprechend. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund der Tatsache, dass viele Optionen zur Biomassenutzung im Rahmen laufender und zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zukünftig zunehmend günstigere energietechnische und -



wirtschaftliche Rahmendaten aufweisen werden. Biomasse kann damit – ggf. auch in Kombination mit anderen regenerativen und fossilen Energieträgern – durchaus einen merklichen Beitrag zu einer zukünftig umwelt- und klimaverträglicheren Energieversorgung in Deutschland und Europa leisten.

Im Hinblick auf sinnvolle Machbarkeiten erscheint eine Wärmebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen die bei weitem vielversprechendste Option. Diese ist im kleinen Leistungsbereich ohne und im größeren Leistungsbereich (d. h. Nahwärmenetze) mit einer (begrenzten) Zufeuerung fossiler Energieträger sinnvoll einsetzbar.

Hinzu kommt eine ausschließliche Stromerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen, die infolge des EEG in der jüngsten Vergangenheit erheblich an Bedeutung gewonnen hat und weiter gewinnen wird. Diese Option ist – obwohl marktgängig und zumindest mit Altholz ökonomisch darstellbar – insgesamt zwar vielversprechend, bisher jedoch aufgrund der meist nur vergleichsweise geringen Stromwirkungsgrade eher zweite Wahl (hier erscheint – wenn denn technisch verfügbar – eine Vergasung sehr vielversprechend, da sie deutlich höhere Stromwirkungsgrade verspricht). Diese Situation kann dann völlig anders sein, wenn die zusätzlich anfallende Wärme sinnvoll z. B. in einem Industriebetrieb oder in einem Nahwärmenetz (zumindest teilweise) genutzt werden kann. Etwas anders liegen die Zusammenhänge bei einer Biogaserzeugung. Hier ist – da Biogas i. Allg. aus Stoffströmen gewonnen wird, die mit einem hohen Wassergehalt anfallen (z. B. Gülle, organisch belastete Abwässer) – eine andere sinnvolle energetische Nutzung meist nicht möglich. Trotzdem wird das Biogas heute meist in Gasmotoren zur ausschließlichen Stromerzeugung mit einem Wirkungsgrad von unter 40 % genutzt; d. h. rund zwei Drittel der Energie werden an die Atmosphäre in Form von Wärme abgegeben. Deshalb könnte eine Biogaserzeugung aus energiewirtschaftlicher Sicht durchaus sinnvoller realisiert werden, wenn die notwendigerweise anfallende Wärme ebenfalls genutzt werden könnte; aufgrund einer mangelnden Wärmenachfrage auf den landwirtschaftlichen Höfen ist dies oft jedoch nicht der Fall.

Der Einsatz von Kraftstoffen aus Biomasse auf der Basis der heute bereits verfügbaren Techniken und Verfahren ist tendenziell eher weniger vielversprechend. Eine Kraftstoffbereitstellung aus Pflanzenölen kann – aufgrund a priori beschränkter Potenziale – immer nur einen (sehr) kleinen Anteil der nachgefragten Treibstoffmenge decken – bei aufgrund der aufwändigen Bereitstellungskette immer relativ hohen Kosten. Deshalb sollten pflanzenölbasierte Kraftstoffe nur dort eingesetzt werden, wo die ökologischen Vorteile (u. a.



gute biologische Abbaubarkeit) voll zum tragen kommen und die Mehrkosten aufwiegen. Ähnliches gilt auch für Bioethanol, der insgesamt – bei jedoch nur eingeschränkt vorhandener Anlagentechnik – insgesamt jedoch etwas positiver zu bewerten ist. Demgegenüber ist Pyrolyseöl nur eine Option für die fernere Zukunft.



4 Möglichkeiten und Grenzen der Biomassenutzung

Biomasse hat damit ein beachtliches technisches Potenzial sowohl in Deutschland und Europa als auch weltweit, das bisher weitgehend ungenutzt ist. Zusätzlich ist mit derzeit 3 bis 9 % und potenziell 12 bis 44 % der gegenwärtig anthropogen verursachten zusätzlich klimawirksamen CO₂-Emissionen die Biomasse vermutlich die Option unter den regenerativen Energien mit dem größten CO₂-Reduktions-potenzial, das zudem mit vorhandener Technologie und vergleichsweise kostengünstig erschlossen werden kann. Einer damit aus globaler Sicht wünschenswerten weitergehenden Erschließung dieses Energieträgers stehen jedoch eine Vielzahl von Restriktionen entgegen. Sie können nachfolgend nur ansatzweise diskutiert werden.

- Die traditionelle Biomassenutzung im **Haushaltsbereich** in Ländern der **Dritten Welt** im Drei-Steine-Herd – und derart dürfte weltweit und auch in Brasilien und insbesondere in Indien ein Großteil der Biomasse genutzt werden – ist durch sehr geringe Wirkungsgrade und die Emissionen einer Vielzahl unerwünschter Stoffen gekennzeichnet. Bei letzteren handelt es sich neben lokal wirksamen Stoffen, die insbesondere beim Betrieb in geschlossenen Räumen gesundheitsschädlich sein können, auch um global und damit klimawirksame Stoffe (u. a. CH₄, N₂O). Außerdem kommt es durch die oft ökonomisch erzwungene Übernutzung der vorhandenen Biomasse-Ressourcen in Ländern der Dritten Welt – und hier insbesondere in Asien bzw. Indien und weniger in Südamerika bzw. Brasilien – zu einer Degradation der jeweiligen Flächen mit der daraus resultierenden Gefahr einer Versteppung und Wüstenbildung. Dies lässt eine forcierte Biomasse-Nutzung im Haushaltsbereich in Entwicklungsländern nur auf der Basis einer deutlich verbesserten und einfach bzw. betriebssicher bedienbaren Verbrennungstechnik – mit entsprechenden Begleitmaßnahmen zur nachhaltigen Bereitstellung des Biobrennstoffs – wünschenswert erscheinen. Solche verbesserten Biomassebrenner sind jedoch für einen potenziellen Anlagenbetreiber u. a. mit höheren Kosten, einer "anderen" Bedienung und damit ggf. einem Bruch mit den (wichtigen) Traditionen verbunden. Deshalb sind entsprechende Programme in verschiedenen Ländern der Dritten Welt in der Vergangenheit oft gescheitert. Damit müssten hier – soll Biomasse in Entwicklungsländern einen wünschenswerten weiteren Beitrag zur Deckung der



Energienachfrage leisten – neue und umfassende Konzepte auf der Basis einer entsprechenden zu optimierenden und an die jeweiligen Bedingungen anzupassenden Konversionsanlagen-Technologie entwickelt werden, wie Biomasse effizienter, umwelt- und klimaverträglicher sowie akzeptabler und vor allem kostengünstig genutzt werden kann. Derartige realistische und umsetzbare Konzepte, die an die jeweiligen Bedingungen vor Ort angepasst sein müssten, fehlen aber bisher.

- Auch im **Industriesektor** von **Entwicklungsländern** – dies gilt auch für die Länder Brasilien und Indien – wird Biomasse zum Teil sehr ineffizient eingesetzt; z. B. wird Bagasse, die weltweit durch erhebliche Potenziale gekennzeichnet ist, oft – im Rahmen eines Abfallmanagements – ohne eine vollständige Nutzung der anfallenden Energie nur thermisch "entsorgt". Dies liegt zum einen an dem oft schlechten wirtschaftlichen Umfeld, in dem sich die Unternehmen – insbesondere auch im gewerblichen Bereich – bewegen, das billige und einfache technische Lösungen erzwingt, die aus Effizienz- und Umweltschutzgründen oft nicht optimal sind. Zum anderen dürfte auch eine meist nicht verfügbare an die lokalen Bedingungen angepasste Technik, der oft mangelhafte Ausbildungsstand des Bedienpersonals, eine ungenügende Anlagenwartung, der Betrieb einer vielfach überholten und aus heutiger Sicht veralteten Technik und eine oft durch traditionelle Werte geprägte Vorgehens- bzw. Bedienweise eine effizientere Biomassenutzung behindern. Zusätzlich wurden (und werden) teilweise Biomassenutzungstechniken in Entwicklungsländer exportiert, die auch unter den Bedingungen eines Industrielandes kaum erfolgreich betrieben werden können (z. B. Festbettvergaser zur Stromerzeugung). U. a. daraus resultieren sehr geringe Anlagennutzungsgrade, die ohne eine bessere und ordnungsgemäß bediente Technik, die nur in einem entsprechenden ökonomischen Umfeld auch vor Ort eingesetzt wird, kaum zu verbessern sind. Ausgehend von dieser Gesamtsituation muss es auch im Industriesektor das Ziel sein, Randbedingungen zu schaffen und angepasste Technologien bereitzustellen, damit Biomasse effizienter und umweltverträglicher eingesetzt werden kann. Dabei geht es nicht in erster Linie darum, mehr Biomasse in den Markt zu bekommen, sondern die bereits genutzte Biomasse effizienter und umweltverträglicher zu nutzen. Dies ist wiederum kein ausschließlich technisches Problem. Vielmehr müssen auch hier Gesamt-Konzepte – in enger Abstimmung mit der Bereitstellung einer entsprechenden Anlagentechnologie – angepasst an die lokalen Bedingungen vor Ort entwickelt und umgesetzt werden. Dabei erscheint oft die zusätzliche Bereitstellung



elektrischer Energie – mit dem Ziel einer rural electrification – als vielversprechend. Aufgrund der oft jedoch nur vergleichsweise geringen Leistungen – und der nicht bzw. kaum vorhandenen KWK- bzw. Kraftwerkstechnologie in diesem Leistungsbereich – scheitert dies deshalb oft an der mangelnden Anlagentechnik. Hier wäre deshalb die Entwicklung einer Technologie zur Stromerzeugung aus Biomasse im Bereich einiger 100 kW elektrischer Leistung hilfreich.

- Im **Haushaltssektor** vieler **Industriestaaten** genießt – aufgrund der in der Vergangenheit hier eingesetzten aus emissionsschutztechnischen Gründen oft unbefriedigenden Feuerungsanlagen – eine Biomassenutzung nicht den besten Ruf; auch haben biogene Festbrennstoffe teilweise das Image, überholt, umweltverschmutzend, unmodern und arbeits- bzw. bedienintensiv zu sein. Wird eine ökonomische Gesamtanalyse ohne Berücksichtigung von Steuern und Subventionen gemacht, erweist sich außerdem eine Wärmebereitstellung aus Biobrennstoffen im Vergleich zu der jeweils substituierbaren fossilen Option meist als die deutlich ungünstigere. Primär deshalb war im Haushaltssektor der Industriestaaten – trotz z. T. erheblicher administrativer Maßnahmen in Form einer Besteuerung fossiler Energieträger und/oder der Subventionierung von Bioenergie – in den letzten Jahren keine signifikante Zunahme der Biomassenutzung zu verzeichnen; vielfach ist sogar eher das Gegenteil der Fall. Grundsätzlich wäre das aber der Markt, in dem die Biomasse vielversprechend und effizient eingesetzt werden könnte. Hier wurden auch in den letzten Jahren entsprechende Feuerungsanlagen und Brennstoffe entwickelt, die eine umweltfreundliche und wenig bedienintensive Biomassenutzung insbesondere im kleinen Leistungsbereich ermöglichen (d. h. Pelletsöfen mit Holzpellets bzw. Hackschnitzelfeuerungen mit Holzhackgut). Aufgrund der Tatsache, dass derartige Anlagen in vielen Ländern staatlich gestützt werden (direkt über Subventionen zu den Investitionskosten oder indirekt über die Besteuerung der fossilen Energieträger) haben sie in den letzten Jahren in einigen Ländern – und auch in Deutschland – an Bedeutung gewonnen. Dies gilt insbesondere für Pelletsfeuerungen, die in Deutschland und Österreich in den letzten Jahren exponentiell zugenommen haben. Dies erscheint auch – zusammen mit den Hackschnitzeln und eingeschränkter mit den Scheitholzfeuerungen der jüngsten Generation – als der Markt insbesondere für den ländlichen Raum mit den potenziell höchsten Zuwachsraten, falls Biomasse verstärkt genutzt werden soll. Dies gilt auf jeden Fall für Deutschland und für nahezu alle europäischen Länder.



- Biomasse wird im **Industriesektor** der **Industriestaaten** – einmal unterstellt, dass keine gesetzlichen Vorgaben (z. B. EEG, CO₂-Steuer) andere Lösungen erzwingen bzw. ermöglichen – aufgrund des vergleichsweise geringen Energieträgerpreisniveaus für fossile Brennstoffe oft nur dort großtechnisch eingesetzt, wo eine Energiegewinnung mit einem Abfallmanagement einher geht; dies ist z. B. in der Holzbe- und -verarbeitenden sowie der Lebensmittelverarbeitenden Industrie der Fall. Dort steht aber oft der Entsorgungsgedanke im Vordergrund (d. h. die anfallenden organischen Stoffe müssen kostengünstig entsorgt werden); daraus resultieren geringe Konversionsgrade und eine ungenügende Nutzung der bereitgestellten Nutzenergie. Eine Verbesserung ist hier – bei verfügbarer Technik – nur zu erwarten, wenn die effiziente Biomassenutzung mit einem ökonomischen Vorteil für den jeweiligen Anlagenbetreiber verbunden ist. Dies ist dann der Fall, wenn die bereitgestellte Energie auf den jeweiligen Energiemärkten verkauft werden kann (z. B. Nahwärme, Stromerzeugung mit Netzeinspeisung). Insbesondere eine Stromerzeugung – möglichst in Kraft-Wärme-Kopplung – erscheint hier vielversprechend; aufgrund technischer Restriktionen ist dies derzeit jedoch nur im größeren Leistungsbereich umsetzbar (d. h. für kleine elektrische Leistungen ist eine marktgängige und verlässliche Stromerzeugungstechnik bisher nicht verfügbar). Dieser Weg wird aber in Deutschland infolge von EEG und KWK-Gesetz angegangen. Sowohl die Stromerzeugung als auch die Kraft-Wärme-Kopplung werden – und hierzu gibt es auch vergleichbare Beispiele in anderen europäischen Ländern – finanziell nicht unerheblich unterstützt. Dies hat in Deutschland den (erwünschten) Nebeneffekt, dass Altholz nicht mehr abgelagert, sondern energetisch genutzt wird. Die vergleichsweise hohen Vergütungssätze des EEG haben in der Bundesrepublik jedoch den (ungewollten) Nebeneffekt, dass primär Strom aus Biomasse erzeugt wird und die dabei notwendigerweise anfallende Wärme in vielen Fällen ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird; dies hat zwar keine signifikanten Umwelteffekte, ist jedoch aus Gründen eines nur geringen Gesamtwirkungsgrades wenig vorteilhaft. In der Summe erscheint jedoch eine Kraft-Wärme-Kopplung im industriellen Maßstab aus Biomasse ein vielversprechender Weg, Biomasse vergleichsweise einfach und umweltfreundlich in den Markt zu bekommen.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine weitergehende Biomassenutzung kurzfristig weltweit nur eingeschränkt möglich. Dies gilt insbesondere auch aufgrund der ökonomischen Gegebenheiten, die – neben bzw. zusätzlich zu den diskutierten Überlegungen – die



Möglichkeiten einer effizienteren Biomassenutzung ebenfalls signifikant beeinflussen und vielfach eine weitergehende Nutzung behindern. Jedoch müssen hier die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Entwicklungs- und den Industrieländern beachtet werden. In den Entwicklungsländern stellt sich nicht die Frage, mehr Biomasse zu nutzen; tendenziell sollte hier die Nutzung – aus Gründen einer Erhaltung der vorhandenen Biomasseressourcen – eher eingeschränkt werden. Hier stellt sich die Zielstellung, die bereits genutzte Biomasse effizienter zu nutzen. Im Unterschied dazu können auch in den Industriestaaten Bioenergieträger effizienter genutzt werden; jedoch sind hier die Möglichkeiten eingeschränkter, da – trotz der aufgezeigten Zusammenhänge – man sich schon auf einem deutlich höheren (Effizienz-)Niveau bewegt. Auch ist in diesen Ländern – und dazu zählt auch Deutschland – eine weitergehende Biomassenutzung aus Sicht der Potenziale gut denkbar. Maßnahmen, die dies aus Umwelt- und Klimaschutzgründen zum Ziel haben, wurden aber in vielen Ländern der EU bereits eingeleitet, so auch mit EEG und KWK-Gesetz in Deutschland.

Aufgrund des unbestritten großen Potenzials stellt sich damit die Frage, durch welche Maßnahmen Biomasse weltweit in Entwicklungsländern und in Industriestaaten verstärkt genutzt werden kann – unter Ausnutzung der positiven Aspekte und unter Vermeidung der damit zusammenhängenden unerwünschten Auswirkungen. Hierzu erscheinen u. a. folgende Maßnahmen sinnvoll.

- Zur Verbesserung der Situation in ländlichen Gebieten im **Haushaltssektor** von **Entwicklungsländern** in Bezug auf die Vermeidung einer weitergehenden Abholzung und eine Verminderung u. a. der gesundheitlichen Belastung infolge von Emissionen an toxischen Stoffen ist die Einführung von gegenüber den Drei-Steine-Herden deutlich verbesserten Feuerungen unerlässlich. Dies ist jedoch ein langer und mühsamer Prozess, dem primär nicht-technische Restriktionen entgegen stehen, da die entsprechende Technologie verfügbar ist. Hier wäre deshalb eine langfristig angelegte, die regionalen Besonderheiten, politischen Randbedingungen und vorhandenen Traditionen berücksichtigende sowie stabile und kalkulierbare Markteinführungsstrategie anzustreben, in deren Rahmen verbesserte und an die lokalen Gegebenheiten angepasste Feuerungstechnologien eingeführt, die entsprechende Vertriebs- und Wartungsinfrastruktur aufgebaut und gleichzeitig durch entsprechende Informationskampagnen deren weitgehende Akzeptanz sowie fachgerechte Bedienung und Wartung sichergestellt wird. Parallel dazu sind in den Gebieten, in denen die



vorhandenen Biomasseressourcen bereits geschädigt sind, Aufforstungsprogramme – ebenfalls unterstützt durch entsprechende Informationskampagnen – unter Einbeziehung der lokalen Bevölkerung zu initiieren.

- Bei Biomasseverbrauchern in der **Industrie** im größeren Leistungsbereich in **Entwicklungsländern** dürfte die Akzeptanz einer neuen Technik eher mit den jeweiligen ökonomischen Randbedingungen korreliert sein. Aber auch hier ist eine ordnungsgemäße Bedienung und Wartung dieser Technik – ggf. entgegen den ortsüblichen Traditionen – sicherzustellen. Geeignete Maßnahmen zu Verbesserung der Nutzungsgrade des vorhandenen Anlagenbestandes müssten damit zum einen eine geeignete (d. h. an die lokalen Bedingungen angepasste) Technik kostengünstig verfügbar machen und zum anderen langfristig angelegte Hilfe bei der Bedienung und Wartung gewährleisten. Außerdem müssen die Betriebe über die entsprechenden Mittel verfügen, um solche verbesserten Anlagen erwerben und damit betreiben zu können. Hinzu kommt, dass dort, wo Biomasse durch traditionelle Techniken mit überlieferter Bedienung genutzt wird, durch entsprechende Informationskampagnen die daraus resultierenden Akzeptanzprobleme überwunden werden müssen.
- Im **Haushaltsbereich** der **Industriestaaten** kann Biomasse – bei vorhandener Technik – nur durch eine weitere Verbesserung der (ökonomischen) Randbedingungen für einen potenziellen Anlagenbetreiber – unter gleichzeitiger Verbesserung der Akzeptanz – weitergehend genutzt werden. Letzteres dürfte nur durch eine entsprechende Informationsoffensive möglich sein, durch die dem potenziellen Nutzer die Vorteile einer Biomassenutzung i. Allg. und die der modernen, automatisch beschickten, einfach bedienbaren und emissionsarmen Feuerungsanlagentechniken im Speziellen nahegebracht werden. Dies kann durch den Aufbau von Biobrennstoffmärkten – die Verfügbarmachung von Biobrennstoffen ist auch in ländlichen Gebieten mit einem z. T. großen Aufwand verbunden – und klar definierter Brennstoffeigenschaften signifikant unterstützt werden.
- Im **Industriesektor** in den **Industriestaaten** wird die bereits gegebene Biomassenutzung nur dann effizienter realisiert, wenn dies ökonomisch vorteilhaft ist und damit die aus Biobrennstoffen produzierte Wärme bzw. der bereitgestellte Strom auf dem Energiemarkt mit Gewinn verkauft werden kann. Eine weitergehende Nutzung ist nur dann – vor dem Hintergrund der ökonomischen Notwendigkeiten – wahrscheinlich, wenn es sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht für einen Industriebetrieb "rechnet", Biomasse einzusetzen. Dies ist z. B. durch eine Verbesserung des Marktwertes des aus Biomasse gewinnbaren



Produktes (d. h. Wärme, Strom) möglich, wie es z. B. in Deutschland durch das EEG und das KWK-Gesetz angestrebt wird. Durch die Verfügbarmachung einer verlässlichen Stromerzeugungstechnologie im kleineren Leistungsbereich könnte dies unterstützt werden.

Zusammenfassend lassen sich damit folgende Aussagen treffen.

- Biomasse trägt mit weltweit 20 bis 60 EJ/a zur Deckung der Energienachfrage bei – bei Potenzialen von rund 104 EJ/a. Oft sind die vorhandenen Konversionsanlagen jedoch – insbesondere in Entwicklungsländern – durch geringe Konversionsnutzungsgrade und hohe Emissionen an lokal (z. B. Staub, VOC) sowie global und damit auch klimawirksamen Stoffen (z. B. N₂O) gekennzeichnet. Außerdem werden die Biomasseressourcen z. T. deutlich übernutzt, was – außer mit den damit verbundenen Klimagasfreisetzungen – mit einer Vielzahl weiterer unerwünschter Umweltauswirkungen verbunden ist.
- Eine weitergehende schnelle und einfache Erschließung der vorhandenen Potenziale ist mit einer Vielzahl von Restriktionen verbunden. Nur durch eine Politik des langen Atems erscheint hier eine Erschließung sowohl in den Entwicklungsländern als auch in den Industriestaaten mittel- bis langfristig möglich, zumal eine weitergehende Biomassenutzung weniger ein technisches – die benötigte Anlagentechnik ist i. Allg. verfügbar – als vielmehr ein ökonomisches und ein Akzeptanzproblem ist. Entsprechende Maßnahmen laufen in Deutschland und in anderen europäischen Ländern an bzw. sind angelaufen und zeigen – zumindest in Deutschland – auch Wirkung.
- Biomasse könnte damit – würde sie in den Industriestaaten weitergehend und in den Entwicklungsländern effizienter und nachhaltiger genutzt – deutlich weitergehend zur umweltfreundlichen und klimaverträglichen Deckung der Energienachfrage beitragen. Aufgrund der jedoch a priori begrenzten Potenziale – und dem bisher nicht diskutierten Verteilungsproblem (d. h. hohe Biomassepotenziale sind dort gegeben, wo keine Nachfrage vorliegt bzw. vice versa) – sowie dem hohen Niveau, auf dem sich der Energieverbrauch weltweit und insbesondere in den Industriestaaten der westlichen Welt bewegt (bei weiter steigender Tendenz), scheint Biomasse immer nur einen bestimmten Beitrag zur Deckung der Energienachfrage leisten zu können. Dieser Anteil ist von Land zu Land und von Region zu Region unterschiedlich. Für Deutschland dürfte er beispielsweise deutlich unter 10 % bezogen auf den gegenwärtigen Endenergieverbrauch liegen. In anderen Ländern – und insbesondere in bestimmten Entwicklungsländern unter den dort



gegebenen deutlich anderen Randbedingungen – kann dies grundsätzlich anders sein. Trotzdem wird die Biomasse immer nur ein (unterschiedlich großer) Teil des jeweiligen Energiesystems darstellen können.



Literaturverzeichnis

- /1/ Schneider, S.: Potenziale regenerativer Energien in Deutschland in: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M.: Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 3, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag, Münster, überarbeitete Auflage, in Vorbereitung, unveröffentlicht.
- /2/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer, Heidelberg, 2001, 770 S..
- /3/ FNR (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2000
- /4/ Kaltschmitt, M.; Ullrich, S.: Bioenergieträger in Entwicklungsländern, Stuttgart, 2001.
- /5/ Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2001. Münster: Landwirtschaftsverlag, 2001.
- /6/ Goessler, Ralf (Hrsg.): Agrarmärkte in Zahlen. Europäische Union 2002. Tier- und Pflanzenproduktion. Bonn: Verlag ZMP Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle GmbH, 2002.
- /7/ Oberai, C.P.: Agenda to Increase Forest and Tree Cover – Implications for Woodful Supply in Wood Energy News, Vol. 14 No. 2, Oktober 1999.
- /8/ Indian Institute of Forest Management (IIFM), Bhopal, India: Public Forests, Fuelwood Collection and Migration, A Case Study in North – West – Bengal; Food and Agricultural Organisation of the United Nations; FAQ Regional Wood Energy Development Programme in Asia, Bangkok, Thailand, Januar 2001.
- /9/ Smouse, S.M.; Staats, G.; Rao, S.N.; Goldman, R.; Hess, D.: Promotion of Biomass Cogeneration with Power Export in the Indian Sugar Industry; Pittsburgh, New Dehli, 23S..
- /10/ IE: Berechnungen des Instituts für Energetik und Umwelt (IE), Leipzig unter Verwendung von Daten aus www.cenbio.org.br
- /11/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomassen; Gülzower Fachgespräche, Band 17, 2001



- /12/ Kaltschmitt, M.: Persönliche Mitteilung; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, 2002
- /13/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer, Berlin, Heidelberg, 1997, 2. Auflage
- /14/ Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G. A. (Hrsg.): Nachwachsende Energieträger - Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung; Vieweg, Braunschweig/ Wiesbaden, 1997
- /15/ Kaltschmitt, M.; Bridgwater, A. V. (Hrsg.): Biomass Gasification and Pyrolysis - State of the Art and Future Prospects; CPL Scientific, Newbury, Großbritannien, 1997
- /16/ Sontow, J.; Siegle, V.; Spliethoff, H.; Kaltschmitt, M.: Biomassezufeuerung in Kohlekraftwerken; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47(1997), 6, S. 338 – 344
- /17/ Neubarth, J.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Regenerative Energien in Österreich – Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer, Wien, 2000
- /18/ Kaltschmitt, M.; Heinz, A.: Kraftstoffe aus Biomasse – Eine Option zur Minderung energiebedingter Stofffreisetzung?; Der Nahverkehr (2001), 6, S. 26 – 32
- /19/ Thrän, D.; Kaltschmitt, M.: Stroh als biogener Festbrennstoff in Europa; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 52(2002) (im Druck)
- /20/ Kaltschmitt, M.; Merten, D.; Falkenberg, D.: Regenerative Energien – Stand 2001; BWK 54(2002), 4, S. 66 – 74
- /21/ Brenndörfer, M.; Dreiner, A.; Kaltschmitt, M.; Sauer, N.: Energetische Nutzung der Biomasse - Technik, Potentiale, Kosten; KTBL-Arbeitspapier 199; Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 1994
- /22/ Diepenbrock, W.; Kaltschmitt, M.; Nieberg, H.; Reinhardt, G. (Hrsg.): Umweltverträgliche Pflanzenproduktion - Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen; Zeller, Osnabrück, 1997
- /23/ Härdtlein, M.; Kaltschmitt, M.; Lewandowski, I.; Wurl, H. (Hrsg.): Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Ökonomie, Ökologie und Sozialwissenschaften; Erich Schmid, Berlin, 1999
- /24/ Dieter, M.; Englert, H.; Klein, M.: Abschätzung des Rohholzpotenzials für energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg 2001



/25/ Manthau, U.: Standorte der Holzwirtschaft, Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF), Hamburg 2000

**Annex: Verwendete Einheiten**Energie

J	Joule (1J = 1 Ws $0,2778 \cdot 10^7$ kWh)
MJ/a	Megajoule pro Jahr (1 MJ = 10^6 J)
PJ/a	Petajoule pro Jahr (1 PJ = 10^{15} J)
MW	Megawatt (1MW = 10^6 W)
TWh	Tera Watt Stunde (1 TWh = 10^9 kWh)
Nm	Newton Meter (1 Nm = 1 J)

Masse

t/a	Tonnen pro Jahr
Mio. t/a	Millionen Tonnen pro Jahr (1 Mio. t = 10^6 t)
TM	Trockenmasse
W	Wassergehalt
Wf	Wasserfrei

Fläche

fm	Festmeter
ha	Hektar (1ha = 10^4 m ²)

Länge

km	Kilometer (1km = 10^3 m)
----	----------------------------

Volumen

m ³	Kubikmeter
m ³ /a	Kubikmeter pro Jahr