



Kurzbericht zum Thema

Biomassepotential und Technologiecharakterisierung der Umwandlungsverfahren

durch

Prof. Dr. Frank Behrendt

und

Dipl.-Ing. Till Belusa

Dipl.-Ing. Marc Schaefer

Cand.-Ing. Johannes Wellmann

Cand.-Ing. Gregor Drenkelfort

Technische Universität Berlin

Institut für Energietechnik

Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken

regenerativer Energien

Berlin, den 4. November 2008



1 Einleitung

Die Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energien betrug in Deutschland 2007 ca. 224 TWh. Von den 224 TWh entfallen auf Biomasse 155 TWh (69 %). Die Aufteilung auf die Energieträger kann Abbildung 1 entnommen werden.

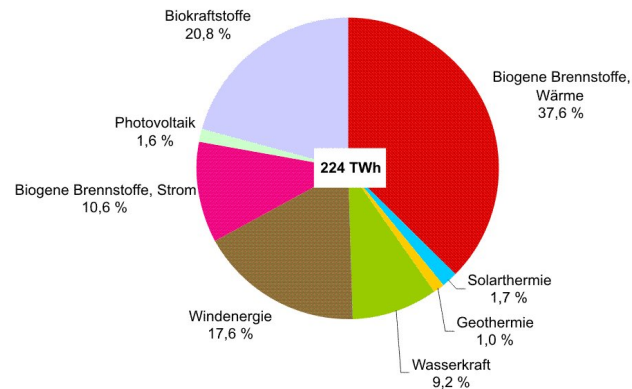


Abbildung 1: Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern 2007 [1]

Es existieren verschiedene Arten von Verfahren zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus Biomasse. Im nächsten Abschnitt werden die energetisch genutzten bzw. nutzbaren Biomassen vorgestellt und deren Potential abgeschätzt. Im darauf folgenden Abschnitt werden mögliche Konversionspfade erläutert.

2 Biomassepotential

Biomasse kann eingeteilt werden in:

1. Ölhaltige Biomasse
2. Zucker- und stärkehaltige Biomasse
3. Abfälle und Reststoffe
4. Lignin- und cellulosehaltige Biomasse

Status: In Deutschland begann der Boom im Rahmen der Förderung von Biodiesel (Fettmethylester, FAME) Ende der 1990er Jahre durch Steuerbefreiung und seit 2006 durch das Biokraftstoffquotengesetz. Der Terminpreis für Raps (Auslieferung Februar 2009) beträgt ca. 330 € / t. [4]

2.1 Ölhaltige Biomasse

In Deutschland wurden 2007 auf mehr als 1,2 Mio. ha Ölpflanzen angebaut. Den größten Anteil hat dabei der Raps mit einer Anbaufläche von 1,12 Mio. ha. Der Ertrag an Ölsaaten beträgt ca. 3 - 3,5 t / ha, mit Ölgehalten bis zu 50 %. [2]

In Zukunft könnten durch Züchtung von Algen in Biomassereaktoren große Mengen ölhaltiger Biomasse erzeugt werden, da Algen ein höheres CO₂-Bindungspotential haben als die meisten anderen Pflanzen. [3]

Potential: Das Raps-Potential gilt in Deutschland als ausgeschöpft. Es wird nicht erwartet, dass die Anbaufläche für Raps weiter zunimmt. Aufgrund der zahlreichen Probleme mit dem Rapsanbau (intensive Düngung, Schädlingsproblematik), ist es eher wahrscheinlich, dass der Raps mittel- bis langfristig zugunsten anderer Energiepflanzen substituiert wird. Allerdings wird Rapssaat trotz aller Probleme in den nächsten Jahren weiterhin eine große Quelle für regenerativen Dieselmotorkraftstoff sein. Bisher wird nur die Rapssaat verwendet, falls die Produktionsreste in anderen Verfahren energetisch genutzt werden, ist ein höherer Energieertrag / ha möglich.

2.1.1 Raps

Raps zählt zu den Kreuzblütengewächsen und ist nach Soja die am zweithäufigsten angebaute Ölnutzpflanze weltweit.

Verfahren zur Umwandlung: Das Rapsöl wird hauptsächlich zu Biodiesel umgeestert (Abschnitt 3.1.2).

2.1.2 Sonstige Ölpflanzen

Andere Ölpflanzen wie z.B. Sonnenblumen und Leinen haben in Deutschland aus energetischer Sicht bisher keine Bedeutung. Sie werden hauptsächlich als Nahrungsmittel genutzt.

2.2 Zucker- und stärkehaltige Biomasse

Zucker- und stärkehaltige Biomasse kann über Fermentation zu Biogas umgewandelt (Abschnitt 3.2.1) oder zu Bioethanol vergoren werden (Abschnitt 3.2.2).

2.2.1 Getreide

Als Getreide bezeichnet man gezüchtete Kulturpflanzen, die zur Familie der Gräser gehören und deren Samenkörner man als Lebensmittel verwendet. Bezogen auf die Anbaumengen sind Mais und Weizen die drei wichtigsten Getreidearten.

Status: In Deutschland werden in Abhängigkeit von Bodenbeschaffenheit und klimatischen Bedingungen verschiedene Getreidearten angebaut. Den größten Hektarertrag liefert Mais mit 14-18 t / ha (Ganzpflanze; Trockenmasse ohne Restfeuchte) ¹ bzw. 9 t / ha (Körner). [6] [7]
Die Produktionszahlen für 2007 können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Getreideproduktion [7]

	Welt	Deutschland
Getreide		
Produktion [Mio. t]	2342	42,29
Anbaufläche [ha]	699.813.132	6.589.400
Ertrag [t / ha]	3,34	6,41
Mais		
Produktion [Mio. t]	784,8	3,48
Anbaufläche [ha]	157.874.343	383.100
Ertrag [t / ha]	4,9	9,08
Weizen		
Produktion [Mio. t]	607,04	21,36
Anbaufläche [ha]	217.432.668	3.005.300
Ertrag [t / ha]	2,8	7,1

Der Weizenpreis betrug Ende Oktober 2008 ca. 200 US \$ / t. Damit stieg der Preis jährlich im Durchschnitt -ohne die Preisexplosion der vergangene zwei Jahre- um 20%. Der Preisanstieg wird sich wahrscheinlich in den folgenden Jahren fortsetzen. Der Haupteinfluß auf die Preise der Getreidesorten (wie auch auf andere Agrarprodukte) geht von der Nachfrage und dem Ölpreis aus. [8] [9]

¹Nach [5] beträgt der Ertrag je Hektar ca. 44 t Frischmasse. Bei einem Trockenmassegehalt von 28 % entspräche dies einem Hektarertrag von 12,3 t Trockenmasse.

Potential: Es wird angenommen, dass der Getreidepreis in den nächsten Jahren stark ansteigt. Dies ist zum einen auf das weltweite Bevölkerungswachstum und zum anderen auf die gleichzeitige Zunahme des Pro-Kopf Verbrauchs zurückzuführen. Dabei wird ein Anwachsen der Weltbevölkerung auf 9 Mrd. und eine Zunahme des Pro-Kopf Verbrauchs um 35% von 2005 bis 2050 unterstellt. Dies bedeutet eine Verdopplung des Nahrungsmittelbedarfs. Der entstehende Bedarf wird nur mit großen Anstrengungen gedeckt werden können. Im Vergleich zum Jahr 2000, in dem 25% der weltweiten Ackerfläche brach lagen, wird es im Jahr 2050 keine Brachflächen mehr geben. [10]

Umwandlungsverfahren: Getreide wird hauptsächlich als Ganzpflanze siliert und fermentiert (Abschnitt 3.2.1), oder zu Bio-Ethanol vergoren (Abschnitt 3.2.2). Eine thermo-chemische Wandlung ist aufgrund des hohen Aschegehalts und des niedrigen Ascheschmelzpunkts problematisch (ähnlich dem Stroh). Es existieren allerdings einige direkt mit Weizen befeuerte Heizsysteme in Kleinanlagen.

2.2.2 Zuckerrüben

Der Anbau von Zuckerrüben dient in Deutschland und Europa hauptsächlich der Herstellung von Zucker. Durch hohe Importzölle für Zucker wurde in der ganzen EU der Anbau von Zuckerrüben indirekt subventioniert.

Status: In Deutschland wurden 2007 auf ca. 400.000 ha Zuckerrüben angebaut, die Produktionsmenge betrug ca. 26 Mio t. Der Ertrag betrug 6,4 t / ha. [7]
Die Kosten für 1 t Zuckerrüben betragen ca. 40 €. [11]

Potential: Da die Schutzzölle für Zucker von der EU abgebaut werden und die Kosten für die Zuckerzeugung aus Zuckerrüben deutlich höher sind als die aus Zuckerrohr, ging die Anbaufläche der Zuckerrüben zurück. [7] Zuckerrüben hätten ein gewisses Potential für die Ethanolherzeugung. Da die Bioethanolherzeugung aus Zuckerrüben aber teurer ist als die aus Weizen, wird dieses Verfahren in absehbarer Zeit keine Bedeutung haben. [12]

Verfahren zur Umwandlung: Zuckerrüben können zu Bioethanol verarbeitet werden (Abschnitt 3.2.2, Verfahren [12, S. 38 ff.])

2.3 Lignin- und cellulosehaltige Biomasse

Lignin- und cellulosehaltige Biomasse wird derzeit hauptsächlich direkt verfeuert und zur Wärmebereitstellung verwendet. Man geht davon aus, dass diese Biomasse zukünftig auch zu synthetischem Kraftstoff umgewandelt wird (BtL, engl.: *Biomass-to-Liquids*).

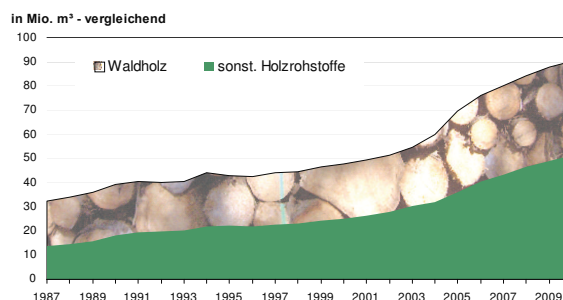


Abbildung 3: Holzaufkommen [14]

Die Erhöhung des Holzangebots führte zu einer Erhöhung des Holzeinschlags, was seit 2003 durch einen Rückgang des Holzvorrats erkennbar ist (Abbildung 4).

2.3.1 Holz

Status: Holz ist ein wichtiger Rohstoff für verschiedene Industrien und kann in einer Kaskadennutzung mehrfach verwendet werden.

Dabei ist festzuhalten, dass eine stoffliche Nutzung nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in jedem Fall einer energetischen vorzuziehen ist.

Das Gesamtholzaufkommen in der Bundesrepublik betrug im Jahr 2005 knapp 220 Mio. m³ (r).[13]

Holz zur energetischen Nutzung kann entweder über Altholz bzw. Holzresten (Stammholz, Waldrestholz, Sägenebenprodukte, Altholz etc.) oder Energiepflanzen (Kurzumtriebsplantagen) bereit gestellt werden. In Deutschland nimmt der Holzbedarf, insbesondere die energetische Nutzung seit dem Ansteigen der Energiepreise im Jahr 2003, zu (Abbildung 2).

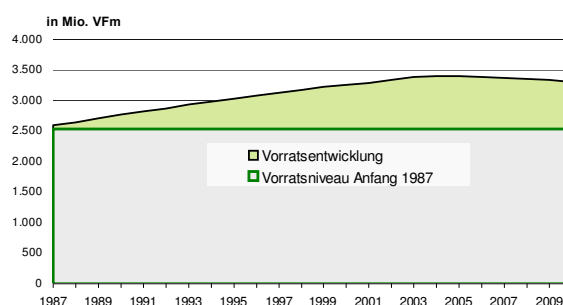


Abbildung 4: Holzvorrat Quelle: [14]

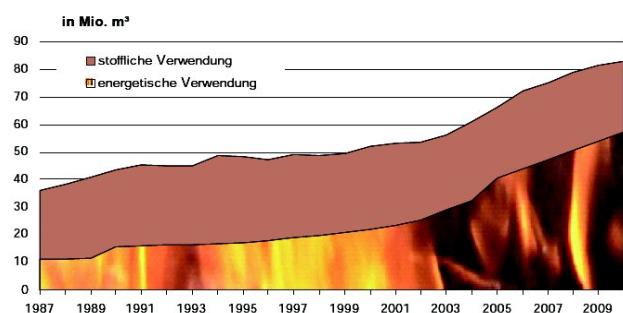


Abbildung 2: Stoffliche und energetische Nutzung von Holz [14]

Der steigende energetische Bedarf wurde bisher durch eine Erhöhung des Angebots an Holzrest- und Holznebenprodukten befriedigt. Aus Abbildung 3 geht die Herkunft der genutzten Holz mengen hervor.

Die Preise betragen für Holzbrennstoffe in € / t für aufbereitete Hackschnitzel frei Anlage : [15]

Waldrestholz	30-60
Industrierestholz	qualitätsabhängig
Sägenebenprodukte	20-40
Althölzer	-10 - 35
Hölzer aus Landschaftspflege	15-25

Potential: Das Potential an Alt- und Restholz für die energetische Nutzung ist weitgehend ausgeschöpft. Daher ist eine Ausweitung der energetischen Holznutzung nur durch Erhöhung des Holzeinschlags und somit mit einem weiteren Abbau des Holzvorrats möglich. [14]

Die Meseberger Beschlüsse des Bundeskabinetts sehen vor, bis 2020 18 % des Endenergieverbrauchs durch erneuerbare Energien bereitzustellen. Nach einer Leitstudie des BMU wird Holz für Wärme, Strom und Kraftstoffproduktion folgende Rolle spielen:

Tabelle 2: Holzbedarf gemäß den Ausbauzielen der Leitstudie "Ausbaustrategie Erneuerbare Energien" [16] [17]

	Endenergieverbrauch		Primärenergieverbrauch		Holzbedarf [Mio. FM / a]		zusätzlicher Holzbedarf [Mio. FM / a]
	2005 [PJ / a]	2020 [PJ / a]	2005 [PJ / a]	2020 [PJ / a]	2005	2020	
Wärme	261	372	377,4	471,1	40,8	50,9	10,1
Strom	19,4	53,2	23,5	61,8	2,5	6,7	4,1
Kraftstoff	-	100	-	200	-	21,6	21,6
Summe	280,4	525,2	400,9	732,9	43,3	79,2	35,8

Es ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von 35,8 Mio. FM / a. Dieser Bedarf kann bis 2022 durch einen Abbau des Holzvorrats (auf das Niveau von 1987) gedeckt werden. [17]

Langfristig widerspricht eine Erhöhung des Holzeinschlags dem Gedanken einer nachhaltigen Holznutzung. Die zusätzlich erforderlichen Mengen könnten über eine Verdrängung anderer Nutzer (vorwiegend stofflich) oder über Kurzumtriebsplantagen bereitgestellt werden. Interessant hierfür sind schnellwachsende Bäume wie z.B. Pappeln und Weiden. Der Ertrag einer Kurzumtriebsplantage beträgt ca. 12 t / ha (Trockenmasse mit 15 % Restfeuchte). [9]

Schnellwachsende Bäume in Mischsystemen aus Baumplantagen und z.B. Getreidepflanzen besitzen großes Potential, insbesondere aus Sicht der Nachhaltigkeit. Allerdings besteht hier noch großer Forschungsbedarf. [18]

Ein Import aus Ländern mit Holzüberschuss ist möglich, aber de facto ist Deutschland derzeit ein Netto-Holzexporteur.

Verfahren zur Umwandlung: Das wichtigste Umwandlungsverfahren für Holz ist die Direktverfeuerung (Abschnitt 3.3.1) zur Wärmebereitstellung und in Zukunft auch Strom und Wärme durch Kraft-Wärme-Kopplung. In diesem Zusammenhang wird der Holzvergasung zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen (Abschnitt 3.3.2) ein großes Potential zugeschrieben (Tabelle 2).

2.3.2 Biomasse aus Landschaftspflege

In der Landschaftspflege fallen Landschaftspflegeholz und Landschaftspflegematerial an. Es handelt sich hierbei um Biomasse, die aus der Pflege von öffentlichen Grün- (z.B. Parks) und Bepflanzungsflächen (z.B. Straßenrandbepflanzung) anfällt.

Status: Nach Berechnungen aus [19] ergibt sich ein Potential von Landschaftspflegeholz in Höhe von 4 PJ / a, das aus Landschaftspflegematerial beträgt 6-16 PJ / a (als Biogas) bzw. 10-22 PJ / a (als Festbrennstoff).

Potential: Die energetische Nutzung von Biomasse aus Landschaftspflege ist bisher wenig erforscht. Das Potential ist mit insgesamt ca. 20 PJ / a vergleichsweise klein.

Verfahren zur Umwandlung: Je nach Beschaffenheit kann die anfallende Biomasse entweder thermochemisch (Direktverfeuerung bzw. Vergasung, Abschnitt 3.3.1 bzw. 3.3.2) oder bio-chemisch (Fermentation, Abschnitt 3.2.1) verwertet werden.

²Diese Technologie ist voraussichtlich ab 2012 verfügbar. [21]

2.3.3 Stroh

Als Stroh bezeichnet man "trockene Halme, Stängel und Blätter der ausgedroschenen Getreidearten, Hülsenfrüchte, Öl- und Faserpflanzen". [20]

Status: Stroh wird in Europa bisher nur in Dänemark und Großbritannien in größeren Mengen (>10 % des Potentials) energetisch genutzt. [21]

Dies liegt u.a. an dem geringen Energiegehalt von Stroh (200 kWh / m³), am hohen Aschegehalt (5%), und dessen niedrigen Schmelzpunkts. Dies führt vor allem bei der thermo-chemischen Umwandlung zu Schwierigkeiten.

Stroh wird hauptsächlich in der Landwirtschaft eingesetzt (Einstreu, Futter), außerdem verbleibt ein erheblicher Teil auf dem Feld, wo es zur Humusbildung beiträgt. Die auf dem Feld zu verbleibende Menge Stroh wird mit Hilfe der *Humusbilanz* bestimmt, zu der gesetzliche Regelungen existieren. [22]

In der aktuellen Forschung wird Miscanthus als potentielle Energiepflanze diskutiert. Miscanthus ist ein schnellwachsendes Schilfgras aus China, er wird bisher nur zu Forschungszwecken eingesetzt. Sein Ertrag beträgt ca. 15 t / ha (Trockenmasse mit 15 % Restfeuchte). [9]

Der Preis von Stroh beträgt ca. 65 € / t. [23]

Potential: In Deutschland beträgt das Potential des energetisch nutzbaren Strohs ca. 120 PJ / a. [21]

Miscanthus könnte in Deutschland auf nicht genutzten Flächen angebaut werden. Die Pflanze zeichnet sich durch einen geringen Düng- und Wasserbedarf aus. [24]

Verfahren zur Umwandlung: Die Umwandlung von Stroh erfolgt hauptsächlich thermo-chemisch. Es wird direkt verfeuert. In Zukunft könnte lignocellulosehaltige Biomasse zu BtL umgesetzt oder in einer Bioraffinerie zu Chemieprodukten und Kraftstoffen verarbeitet werden². So kann z.B. Ethanol durch Hydrolyse der Cellulose gewonnen werden. [25]

Bzgl. der Kosten besteht hier Optimierungsbedarf (Abschnitt 3.2.2).

2.4 Sonstige Biomasse

2006 fiel in Deutschland Biogas (inkl. Deponie- und Klärgas) mit einem Heizwert von ca. 22,4 Mrd. kWh an.

2.4.1 Deponiegas

Status: Deponiegas entsteht durch den biochemischen Abbau organischen Materials im Deponiekörper. Nachdem der mit dem Müll eingelagerte Luftsauerstoff aufgebraucht ist, werden nach einer Stabilisierung methanbildende Bakterien aktiv. Unter anaeroben Bedingungen werden die organischen Bestandteile zu Methan und Kohlendioxid abgebaut. Es entsteht ein wasserdampfgesättigtes Gas, das zu 50-70% aus Methan und zu 30-50% aus Kohlendioxid besteht. Mit fortschreitendem Abbau des organischen Materials verändert sich die Gaszusammensetzung. Im Verlauf von 15-20 Jahren entstehen so aus einer Tonne Hausmüll ca. 100-200 m³ Deponiegas mit einem Heizwert von 5-6 kWh / m³.

Potential: Nach dem nationalen Inventarbericht [26] liegen auf Bundesebene derzeit noch keine detaillierten Angaben zur Gasfassung der einzelnen Deponien vor. Die Anlagenbetreiber müssen z.Z. lediglich den Landesbehörden Bericht erstatten. Nach Auskunft des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2006 auf 263 Deponien ca. 641 Mio. m³ Deponiegas erfasst, wovon 37 Mio. m³ abgefackelt wurden. Der Rest wurde einer energetischen Nutzung zugeführt. [27]

Nach dem Bericht des Statistischen Bundesamtes zur Elektrizitätserzeugung belief sich die Nettoelektrizitätserzeugung der Energieversorgungsunternehmen (Engpassleistung > 1 MW) im Jahr 2007 auf 169.711 MWh, die Nettowärmeerzeugung auf 101.327 MWh. Der Brennstoffeinsatz betrug 551.000 MWh.

Seit dem Inkrafttreten der Technischen Anleitung Siedlungsabfall 2005 darf nur noch vorbehandelter Müll mit einem sehr niedrigem Kohlenstoffanteil auf Deponien eingelagert werden. Dementsprechend wird das Potential der Deponiegasnutzung weiter abnehmen. [28]

Verfahren zur Umwandlung: Das Deponiegas wird in sogenannten Gasbrunnen erfasst und meist der Verstromung in einem BHKW zugeführt.

2.4.2 Klärgas

Status: Das durch die anaerobe Faulung (Abschnitt 2.4.1) des Klärschlammes gewonnene Biogas wird in den meisten Fällen direkt in einem BHKW verstromt. Der Strom wird zur Deckung des Eigenbedarfes der Kläranlagen eingesetzt, die Wärme unter anderem zur Beheizung des Faulturms. Im Jahr 2007 wurden 5 Mio. MWh Klärgas gewonnen. Davon wurden 3,7 Mio. MWh zur Stromproduktion und 800.000 MWh zu Heizzwecken in den Kläranlagen eingesetzt. Erzeugt wurden knapp 1 Mio. MWh Strom, die überwiegend in den Klärwerken selbst verbraucht wurden. Klärgas hat einen Heizwert von 6-7 kWh / m³. [29]

Potential: Das Potential von Klärgas ist ausgeschöpft. Das Klärgas wird in den Klärwerken verwendet, der kleine Überschuss (Strom) ins Netz abgegeben. Da die entsprechende Infrastruktur zur Wasserreinigung vorhanden ist und auch die demographische Entwicklung rückläufig ist, sind keine größeren Neuerrichtungen von Kläranlagen in Deutschland zu erwarten.

2.4.3 Ernterückstände und tierische Abfälle

Als Ernterückstände werden alle nicht dem Stroh zugeordneten Pflanzenreste verstanden, die bei der Ernte anfallen. Tierische Abfälle sind Exkremate und Einstreu.

Status: Jährlich fallen in Deutschland große Mengen Ernterückstände, z.B. Rübenblätter und Kartoffelkraut, und tierische Abfälle, z.B. Gülle, an. Die Ernterückstände werden zum Teil als Futter und Gründünger verwendet, so dass nur ein Teil energetisch verwendet werden kann. Tierexkremate können zu fast 100 % energetisch genutzt werden (Fermentation zu Biogas, Abschnitt 3.2.1).

Man geht davon aus, dass Tierexkremate kostenlos zur Verfügung stehen (niedriger Brennwert, Entsorgungskosten). Für Ernterückstände orientieren sich die Preise an den Nutzungsmöglichkeiten (Futterzusatz).

Potential: Aus Ernterückständen sind ca. 9-16 PJ / a energetisch nutzbar. Aus Gras von Dauergrünland schwanken die Zahlen erheblich: Das Potential liegt zwischen 19,5 und 55 PJ / a.

Tierexkremate besitzen ein Energiepotential von ca. 96 PJ / a.

Die energetische Nutzung von Ernterückständen und tierischen Abfällen begann in den 1990er Jahren. Das Potential ist immer noch sehr groß (Abschnitt 3.2.1). [19]

2.4.4 Industrielle und gewerbliche Abfälle

Unter industriellen und gewerblichen Abfällen werden vergärbare/fermentierbare organische Substrate verstanden, die in nennenswerten Mengen anfallen und für eine energetische Nutzung geeignet sind. [19]

Status: Die anfallenden Abfälle stammen z.B. aus der Bierherstellung und aus der Zuckerindustrie. Die gesamte nutzbare Energiemenge wird auf 9 PJ / a geschätzt. [19]

Preise sind derzeit nicht bekannt.

Potential: Das Potential wird teilweise genutzt. Zuverlässige Angaben über die bisherige Nutzung sind nicht möglich.

Verfahren zur Umwandlung: Industrielle und gewerbliche Abfälle können zu Biogas fermentiert werden (Abschnitt 3.2.1).

2.4.5 Siedlungsabfälle

Unter Siedlungsabfällen versteht man hauptsächlich den biogenen Anteil des Hausmülls sowie Abfälle aus Groß- und Wochenmärkte. Auch Garten-, Park- und Bioabfälle der Kommunen zählen dazu. Bisherige Berechnungsmethoden legen eine bestimmte Menge pro Einwohner zugrunde, die dann auf die Gesamtbevölkerung hochgerechnet wird. [19]

Status: Das jährliche Biogaspotenzial aus Siedlungsabfällen wird auf 12 PJ / a geschätzt. Bis 2005 wurde Hausmüll zum Großteil deponiert (Abschnitt 2.4.1). [19] Preise sind derzeit nicht verfügbar.

Potential: Das Potential ist mit 12 PJ / a vergleichsweise klein, doch ist hier aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen mit einer verstärkten energetischen Nutzung zu rechnen (Abschnitt 2.4.1).

Verfahren zur Umwandlung: Siedlungsabfälle können zu Biogas fermentiert werden (Abschnitt 3.2.1).

3 Verfahren

Die Umwandlungsverfahren lassen sich in drei verschiedenen Kategorien einordnen:

1. Physikalisch-chemische Umwandlungsverfahren (Abschnitt 3.1)
2. Biologisch-chemische Umwandlungsverfahren (Abschnitt 3.2)
3. Thermo-chemische Umwandlungsverfahren (Abschnitt 3.3)

3.1 Physikalisch-chemische Umwandlung

Physikalisch-chemisch Umwandlungsverfahren beziehen sich auf ölhaltige Biomassen. Die Möglichkeiten zur energetischen Nutzung sind in Abbildung 5 dargestellt.

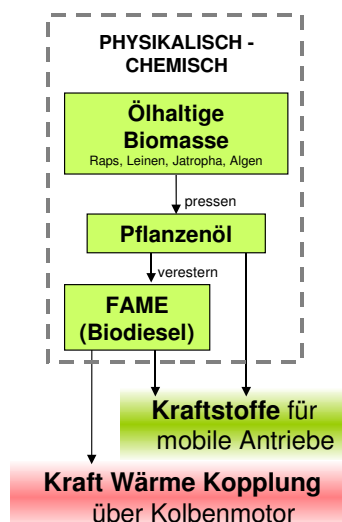


Abbildung 5: Physikalisch-chemische Umwandlungsverfahren

3.1.1 Pflanzenöl (Pöl).

Beschreibung: Unbehandelte Pflanzenöle, die aus den ölhaltigen Samen der Pflanzen durch einfache Pressung gewonnen werden, können in Dieselmotoren in mobilen und stationären Anwendungen eingesetzt werden. Weltweit gibt es etwa 1000 verschiedene Ölpflanzen. Pflanzenöle weisen gegenüber Dieselmotoren eine erhöhte Viskosität und eine niedrigere Cetanzahl aus, so dass Anpassungsmaßnahmen für die Verbrennung im Motor notwendig sind.

Anwendung: In Deutschland gibt es nach einer Schätzung des Verkehrsclubs Deutschland ca. 20.000 Fahrzeuge, die mit Pflanzenölen betrieben werden. Pflanzenöl kostet durchschnittlich 1,20 € / l (Steuer 0,0815 € / l ; Juli 2008). Nach erfolgter Reinigung ist auch der Einsatz von Altölen und flüssigen Speisefetten möglich.

Status: Pflanzenöl wird in Deutschland insgesamt in ca. 700 dezentralen Ölmühlen hergestellt. Pflanzenöl ist als Kraftstoff nicht so verbreitet wie Biodiesel. Es wurden 2007 an ca. 250 Tankstellen ca. 0,5 Mio. t abgesetzt.

Kosten: Die Herstellkosten für Rapsöl betragen 0,51 € / l Kraftstoffäquivalent. [30]

3.1.2 Fettsäuremethylester (FAME), Biodiesel

Beschreibung: Biodiesel ist ein nach DIN V 51605 auf Dieselmotorenqualität aufbereitetes Pflanzenöl (in Deutschland meist Rapsöl). Zur Herstellung wird das

Pflanzenöl mit ca. 10% Methanol und verschiedenen Reagenzien (Kalium- oder Natriumhydroxid) versetzt. Bei Normaldruck und einer Temperatur von ca. 64°C werden die Esterbindungen der Triglyzeride des Öls getrennt und die entstehenden Fettsäuren mit dem Methanol verestert (Umesterung). Als Nebenprodukt entsteht Glycerin, das in der chemischen Industrie Verwendung findet.

Status: In Deutschland existieren 40 Biodiesel-Raffinerien mit einer Kapazität von 3,1 Mio. t. Dem konventionellen Diesel werden bis zu 5 Massen-% Biodiesel zugemischt. An 1.300 Tanksellen wurde 2007 reiner Biodiesel (B100) angeboten.

Anwendung: Durch die Aufbereitung des Pflanzenöls ist eine Verwendung mit bestehender Motorentechnik möglich. Prinzipiell kann jedes Dieselfahrzeug unter Beachtung der Herstellerangaben Biodiesel tanken. Allerdings werden Probleme mit den Hochdruck Einspritzpumpen beobachtet, was auf die verminderte Schmierfähigkeit ggü. konventionellem Diesel zurückzuführen ist. Außerdem müssen die Dichtungen im Kraftstoffsystem für die Verwendung von Biodiesel geeignet sein.

FuE-Bedarf: Abgasforschung aufgrund steigender emissionsrechtlicher Anforderungen, Erprobung von Abgasnachbehandlungsverfahren wie Dieselpartikelfiltern und Stickoxidminimierungssystemen, Erforschung von Nutzungsmöglichkeiten für das Koppelprodukt Glycerin.

Kosten: Die Herstellkosten für Rapsöl beträgt 0,69 € / l Kraftstoffäquivalent.

3.2 Biologisch-chemische Umwandlung

Biochemische Verfahren werden hauptsächlich für stärke- und zuckerhaltige Biomassen eingesetzt. Prinzipiell können alle Biomassen bzw. biogenen Abfälle fermentiert werden. Eine Übersicht gibt Abbildung 6.

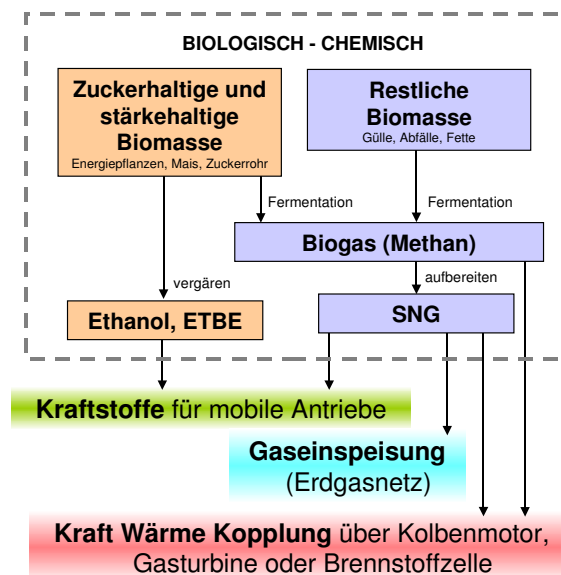


Abbildung 6: Umwandlungsmöglichkeiten von zucker- und stärkehaltiger Biomasse

3.2.1 Fermentation

Verfahrensbeschreibung: Zur fermentativen Erzeugung von Biogas könnten prinzipiell alle Ackerfrüchte und Wirtschaftsdünger eingesetzt werden. Hauptsächlich eingesetzt werden heute Mais, Getreide, Gras und Gülle. Der anaerobe Abbau (Faulung) von Biomasse besteht aus vier biochemischen Einzelprozessen. Während der Hydrolyse werden die Biopolymere in monomere Grundbausteine zerlegt. In der Acidogenese werden die monomeren Interdukte in niedere Alkohole, Fett- und Carbonsäuren umgesetzt. In der Phase der Acetogenese werden diese durch acetogene Mikroorganismen zu Essigsäure. Der Hauptanteil des Biogases entsteht während der Methanogenese durch die Umwandlung von Essigsäure in Methan. Etwa 30% des Biogases entstehen aus Wasserstoff und Kohlendioxid. Das Produkt Biogas enthält neben dem Hauptbestandteil Methan (40-70%) vor allem Kohlendioxid. Weitere mögliche Bestandteile sind u.a. Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Siloxane.

Der Fermentationsprozess kann bei drei verschiedenen Temperaturniveaus betrieben werden (psychrophil < 25°C; mesophil 30-45°C; thermophil >50°C). Man unterscheidet die Verfahren zur Biogasproduktion nach dem Trockensubstanzgehalt des eingesetzten Substrates. Bei einem Trockensubstanzgehalt von weniger als 15% spricht man von Trockenfermentation, bei einem höheren Gehalt von der weiter verbreiteten Nassfermentation. Da meist keine ausreichenden Wärmesenken im ländlichen Raum zur Verfügung stehen, verspricht die Aufbereitung auf Erdgasqualität (Biomethan, SNG) und die anschließende dezentrale Nutzung einen höheren Gesamtwirkungsgrad. Die Aufbereitung besteht aus der Trocknung und dem Entfernen von unerwünsch-

ten Gasbestandteilen (Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Siloxane). Anschließend erfolgt eine Anreicherung des Methans und eine Verdichtung des Gases auf die Druckstufe des Netzes.

Anwendung: Meist wird das produzierte Biogas in einem BHKW am Standort der Biogasanlage verstromt. Die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas als SNG gewinnt an Bedeutung.

Status: 2007 wurden in Deutschland 3.711 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von 1.270 MW betrieben. Aus dem Biogas wurden 8,9 Mrd. kWh Strom erzeugt, was einem Anteil von 1,5 % des gesamten Stromverbrauchs der Bundesrepublik entsprach. Nach dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) wird nicht das produzierte Biogas vergütet, sondern der daraus erzeugte Strom. Durch die, voraussichtlich am 01.01.2009 in Kraft tretende, Novelle des EEG ist durch die Erhöhung der Vergütung für Strom aus Biogas, das aus nachwachsenden Rohstoffen produziert wurde, in diesem Bereich mit höheren Investitionen zu rechnen. Ebenso wird durch einen Technologiebonus von 2 ct / kWh ein Anreiz für die Aufbereitung des Biogases auf Biomethanqualität gesetzt. Die zentrale Nutzung des aufbereiteten Biogases verspricht durch eine effektivere Wärmenutzung einen höheren Gesamtwirkungsgrad.

FuE-Bedarf: Prozessoptimierung, Verringerung des Methanschlupfes, Verbesserung der Aufbereitungstechnologien, Analyse der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit.

Kosten: Spezifische Investitionskosten Biogasanlage: 2.000-4.000 €/ kWh_{el} sowie 200-400 €/ m³ Fermentervolumen. Die Gestehungskosten des Biogases hängen sehr stark von den Substratpreisen sowie der Anlagengröße ab. Wird Gülle als Hauptsubstrat eingesetzt belaufen sich die Kosten pro kWh Rohbiogas zwischen 3,3 ct (Anlagenkapazität: 500 Nm³/h) und 5,3 ct (50 Nm³/h). Werden hauptsächlich nachwachsende Rohstoffe eingesetzt bewegen sich die Kosten zwischen 5,6 ct (500 Nm³/h) und 8 ct (50 Nm³/h). Die Aufbereitung wird beim aktuellen Stand der Technik erst bei einer Anlagengröße von ca. 500 Nm³/h wirtschaftlich (ca. 1,3 ct/kWh).

Anlagengröße [MW]	Gestehungskosten Strom (Gülle)	Gestehungskosten Strom (NaWaRo)	
0,1	22-44	32-54	[28]
0,5	14-18	19-24	
1	12-14	17-21	

3.2.2 Alkoholische Gärung (Ethanol, ETBE)

Beschreibung: Ethanol wird durch die Vergärung von zucker- und stärkehaltigen Materialien gewonnen. Bei der alkoholischen Gärung wandeln Hefen oder Bakterien Kohlenhydrate in Ethanol und Kohlendioxid um. Bisher wurde Bioethanol hauptsächlich aus Zucker (Zuckerrohr) und stärkehaltigem Getreide gewonnen. Neue Technologien verwenden auch zellulosehaltige Biomasse (Holz, Chinaschilf) als Einsatzstoffe. Aus Ethanol und Isobuten lässt sich das Additiv Ethyl-tertiär-butylether (ETBE) herstellen, das zur Erhöhung der Klopfestigkeit als Ersatz des fossilen Methyl-tertiär-butylether (MTBE) dem Ottokraftstoff zugesetzt wird.

Anwendung: Reines Ethanol (E100) ist ein klopfester Kraftstoff mit einer Oktanzahl von mindestens 104 ROZ. Nach der europäischen Norm DIN EN 228 ist eine Zumischung von 5% zum fossilen Kraftstoff erlaubt (E5), bei einer höheren Zumischungsquote ist eine Anpassung der Fahrzeugtechnik erforderlich. Sogenannte Flexible-Fuel-Vehicles (FFV) können mit wechselnden Ethanolanteilen von bis zu 85% (E85) betrieben werden.

Status: FFV werden seit 2005 in Deutschland angeboten. Seit dem 1. Januar 2007 wird in Deutschland dem Benzin durchschnittlich 1,2 % Bioethanol beigemischt. In Deutschland wurden insgesamt 0,5 Mio t im Jahr 2007 an Bioethanol als Kraftstoff verbraucht. In Deutschland existieren derzeit 5 Anlagen zur Bioethanol-Herstellung mit einer Kapazität von 0,6 Mio t / a . Bioethanol wird als Zusatz zum Ottokraftstoff entweder in reiner oder in veretherter Form zugegeben. Es kommen Ethyltertiärbuthylether (ETBE) sowie veretheretes Leichtbenzin (nur eine Anlage in Deutschland; Standort: PCK-Raffinerie Schwedt/Oder). Es ist nach der entsprechenden Kraftstoffnorm ein Grenzwert für den Gesamterthergehalt sowie für den Gesamtsauerstoffgehalt einzuhalten. Ethanol in reiner Form wird an ca. 100 Tankstellen angeboten.

Derzeit werden in den USA ca. 62,7 Mio. t Mais zu Bioethanol vergoren³. Folgender Bedarf an Einsatzstoffen besteht zur Erzeugung von 1 t Ethanol:

Rohstoff	t _{Rohstoff} / t _{EiOH}	Daten für Berechnung aus
Mais	3,22	[31],[32] und [33]
Weizen	3,59	[12] und [7]
Zuckerrüben	1,25	[12] und [7]

FuE-Bedarf: Erhöhung der Ethanolausbeute aus Getreideganzpflanzen, die Optimierung der Fruchtfolge sowie der Einsatz von mehrjährigen Energiepflanzen zur Kraftstoffherstellung.

Kosten: Herstellungskosten von Bioethanol aus verschiedenen Substraten nach [30] in € / l (Kraftstoffäquivalent):

³Berechnungen mit Zahlen aus [31], [32] und mittlerem Ethanol-Mais Konversionsfaktor aus [33]

Getreide	0,72
Zuckerrüben	0,88
Zuckerrohr (Brasilien)	0,34
Lignocellulose	0,98

Da die Herstellung in Deutschland deutlich teurer ist als in Brasilien ist, wird ein Teil der in Deutschland verbrauchten Menge importiert.

3.3 Thermo-chemische Umwandlungsverfahren

Neben den biologischen Verfahren (Fermentation, Vergärung) kommen auch thermische Verfahren zur Umwandlung von holzartiger Biomasse in Betracht. Die thermo-chemischen Umwandlungsverfahren können Abbildung 7 entnommen werden.

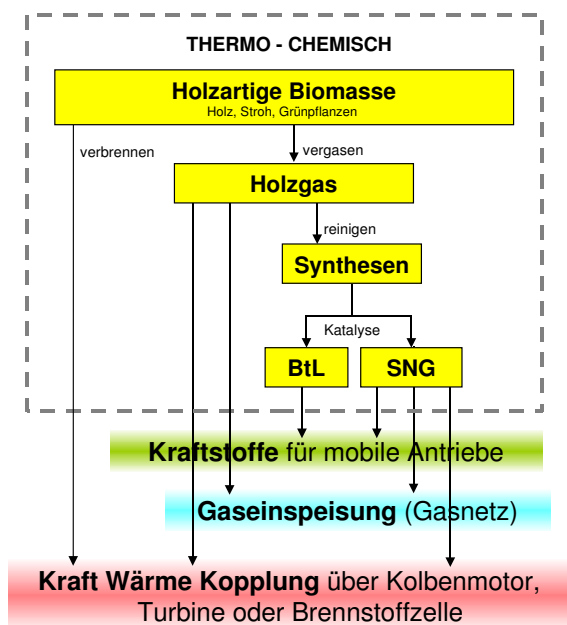


Abbildung 7: Thermochemische Umwandlungsmöglichkeiten von Biomasse

3.3.1 Direktverfeuerung

Verfahrensbeschreibung: Holz wird in Form von Scheitholz, Hackschnitzeln, Briketts und Pellets entweder direkt in den Holzfeuerungsanlagen (HFA) der Haushalte (Ofen, Kamin) eingesetzt oder zur Erzeugung von Wärme (und Strom) in Holzheiz(kraft)werken verbrannt. Pellets werden aus getrockneten Sägenebenprodukten (Restfeuchte 12 %) gepresst, Hackschnitzel werden durch Häckseln von minderwertigem Holz hergestellt. Stroh wird ebenfalls in Biomassekraftwerken eingesetzt. Zur Erzeugung von Strom wird Holz oder Stroh im Kessel eines Biomassekraftwerks verbrannt, um mit dem dabei produzierten Dampf wird eine Turbine zu beaufschlagen. Der elektrische Wirkungsgrad η_{el} beträgt maximal 15 %. Durch die Auskopplung von Dampf aus dem Prozess kann Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus bereitgestellt werden (Kraft-Wärme-Kopplung). Stroh wird derzeit praktisch noch nicht verheizt. Es existieren momentan nur wenige Strohheiz(kraft)werke (Rostfeuerung) zur Wärme- (und Strom)bereitstellung (Stroheinsatz ≤ 3.000 t / a). [20] [34] [21]

Anwendung: Der Gesamtbestand an Holzheizungen in Haushalten beläuft sich auf ca. 9 Mio. mit steigender Tendenz. Die FNR rechnet für das Jahr 2008 mit der Installation der 100.000sten Pelletheizung in Deutschland. Kamine werden zunehmend mit Wärmetauschern zur Unterstützung der Heizung angeboten.

Status: In Deutschland wurden 2005 39,8 Mio. Festmeter Holz energetisch genutzt. Davon entfielen 3,6 Mio. FM auf Anlagen unter 1 MW Feuerungswärmeleistung, 15,5 Mio. FM auf Anlagen größer 1 MW und 20,7 Mio. FM auf die Nutzung in privaten Haushalten.

Die in anderen Ländern praktizierte Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken hat in Deutschland momentan noch keine Bedeutung, da diese Art der Nutzung nicht nach dem EEG gefördert wird.

FuE-Bedarf: Verbrennungsoptimierung zur Verringerung der Emissionen, Entwicklung von Katalysatoren für die Holzfeuerung

Kosten: Die Stromgestehungskosten sind abhängig von der Anlagengröße, eingesetztem Holz (Rohstoffkosten siehe Abschnitt 2.3.1) und Wärmenutzung. Sie liegen real bei Anlagen mit 1 MW_{el} zwischen 16,8 und 19,8 ct / KWh, bei Anlagen mit 20 1 MW_{el} zwischen 6,9 und 8,9 ct / KWh. [35]

3.3.2 Vergasung, Pyrolyse

Diese Vergasungsverfahren sind großtechnisch zur Umwandlung von Kohle schon seit Jahrzehnten bekannt und erprobt. Die besondere Herausforderung besteht in der Anpassung auf Biomasse, insbesondere (Rest-)Holz und Stroh. Obwohl noch einige Probleme gelöst werden müssen, ist diese regenerative Umwandlungsform sehr vielversprechend.

Verfahrensbeschreibung: Im Gegensatz zur Verbrennung findet bei einer Vergasung keine komplette Reaktion des Brennstoffs mit dem Vergasungsmittel statt. Dadurch wird der Gasanteil aus der Reaktion maximiert, der sich je nach Verfahren aus unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt. Hauptbestandteile sind CO, H₂ und unerwünschte Nebenprodukte. Je nach Anwendung können die Bezeichnungen zwischen Produktgas (producer gas), Brenngas (Holzgas, Generatorgas, fuel gas) oder Synthesegas (synthesis gas) variieren. (s. Abbildung 8).

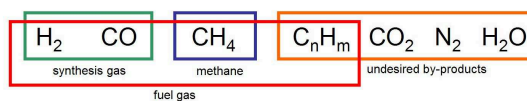


Abbildung 8: Typische Komponenten des Produktgases

Die thermische Zersetzung gliedert sich dabei in drei Hauptphasen, die in unterschiedlichen Temperaturbereichen stattfinden. Während bei der Trocknung verbliebene Restfeuchtigkeit aus dem Brennstoff verdampft, finden bei der Pyrolyse mehrere Zersetzungsvorgänge statt, aus denen eine Vielzahl von Zwischenprodukten (z.B. unterschiedlichste Arten von Teer) resultieren. Die schlechte Kontrollierbarkeit dieses Vorgangs ist eines der Hauptprobleme. Bei der Vergasung reagieren die Zwischenprodukte durch oxidierende und reduzierende Vorgänge untereinander (Gasphasen Reaktionen), bei denen vor allem die gewünschten Produkte H₂ und CO entstehen. Das Vergasungsmittel (z.B. Luft, Wasserdampf oder reiner Sauerstoff) liefert hierfür den benötigten Sauerstoff, bis der Kohlenstoff in der Biomasse abreagiert ist. Die Vorgänge werden in Abbildung 9 dargestellt:

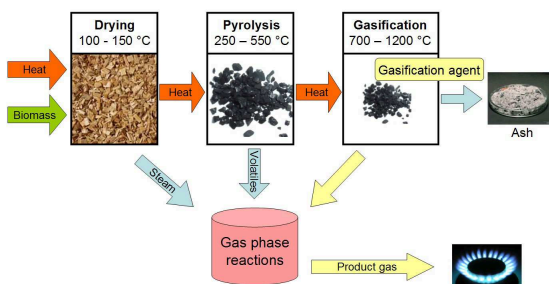


Abbildung 9: Thermische Zersetzung von Biomasse

Diese Vorgänge finden in speziellen Vergasungsanlagen statt, wobei nach Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstrom-Reaktoren unterschieden wird. Festbett Reaktoren eignen sich für kleinere Leistungsbereiche zur dezentralen Kraft-Wärme Kopplung (KWK) bis 1 MW_{th}, Wirbelschichtreaktoren erfordern mittlere Anlagengrößen im Bereich von 1-50 MW_{th} und Flugstromreaktoren sind bei Anlagen über 50 MW_{th} sinnvoll. Die Gasreinigung zu der erforderlichen Gasqualität wird hauptsächlich aus der Anwendung determiniert, wobei vor allem für katalytische Synthesen ein erheblicher Reinigungsaufwand besteht. Als Brenngas für KWK Anlagen sind die Anforderungen an die Gasreinheit niedriger.

Ein weiteres Verfahren der thermochemischen Umwandlung ist die Pyrolyse. Dabei zielt dieses Verfahren auf eine Maximierung der flüssigen Komponenten der thermischen Reaktion ab. Man unterscheidet zwischen langsamen und schnellen Verfahren (z.B. Flash-Pyrolyse), bei denen eine schnelle Aufheizung und Abkühlung des Brennstoffs entscheidend für die Ausbeute ist. Allerdings eignen sich diese Slurry Produkte (auch BioOil) nicht direkt als Kraftstoffe, da der Wasseranteil bis zu 30% beträgt und zu einer Schädigung der Kraftmaschinen führt. Daher sind diese Verfahren vor allem als Brennstoff Vorbehandlung interessant, um die niedrige Energiedichte von lignozellulöser Biomasse zu erhöhen.

Anwendung: Die Anwendungen von Gas aus thermochemischer Umwandlung (Holzgas) lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

- Strom und Wärme: KWK (CHP) mit Brenngas in konventionellen BHKWs (Kolbenmotor, Gasturbine, auch Brennstoffzelle möglich).
- Kraftstoffe: Katalytische Synthesen von Kohlenwasserstoffen (Fischer-Tropsch Verfahren, Methanol Synthese, DME, BTL Kraftstoffe) oder Methan (SNG) und
- Herstellung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff.

Abbildung 10 fasst dies zusammen.

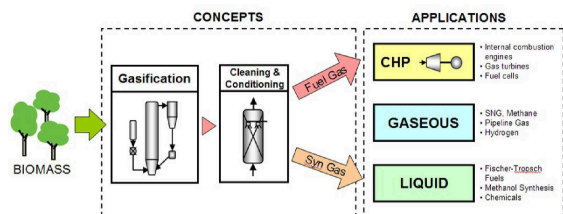


Abbildung 10: Umwandlungsmöglichkeiten von Holzgas

Alle drei Anwendungen sind für die zukünftige regenerative Energieerzeugung von großem Interesse. Am einfachsten realisierbar sind dezentrale KWK-Anlagen mit Verbrennungskraftmaschinen im kleinen

Leistungsbereich, die jedoch an das niederkalorische Holzgas angepasst werden müssen. Der elektrische Wirkungsgrad solcher Anlagen liegt bei ca. 30%. Zukünftige Entwicklungen zielen auf die Nutzung von Hochtemperatur Brennstoffzellen (MCFC und SOFC), womit elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50% möglich werden.

Status: Die bestehenden Vergasungsanlagen in Europa arbeiten heute noch nicht wirtschaftlich genug, um einen nennenswerten Beitrag zur Stromerzeugung durch Biomasse zu leisten. Es gibt noch zu wenig marktreife Entwicklungen kompletter Systeme, die einen zuverlässigen Betrieb über 6.000 Jahresstunden gewährleisten können. Die Potenziale der thermochemischen Umwandlung von holzartiger Biomasse sind jedoch nur mangelhaft ausgeschöpft. Insbesondere in Österreich und den skandinavischen Ländern ist diese Technologie weiter verbreitet als in Deutschland. Die meisten Anlagen sind Demonstrationsprojekte unterschiedlicher Größe, wobei teilweise schon über Jahre wertvolle Betriebserfahrungen gesammelt werden konnten. Mit steigender Anlagengröße kommen zusätzliche Herausforderungen auf die Anlagenbetreiber zu, die vor allem von den Standortbedingungen abhängen (Brennstofflogistik und Wärmenutzung).

In Abbildung 11 sind kleine dezentrale Anlagenstandorte abgebildet, die 2006 in Betrieb genommen wurden. Bis Ende 2006 waren in Deutschland insgesamt 44 Anlagen in Betrieb, die eine kumulierte elektrische Leistung von 6,5 MW besitzen. [36]

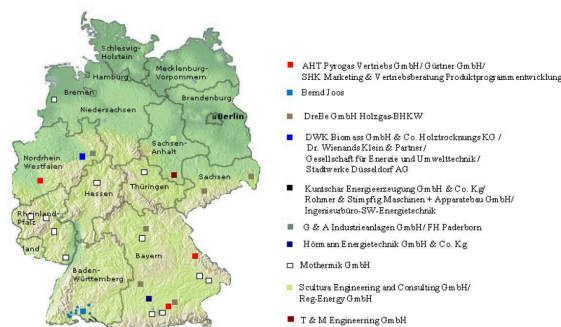


Abbildung 11: Dezentrale Vergasungsanlagen

Für den Betrieb größerer Anlagen über 50 MW_{th} mit Flugstromvergasung müssen weitere Verfahren zur Brennstoffkonditionierung (siehe Pyrolyseverfahren) in Betracht gezogen werden. Die aussichtsreichsten Verfahren sind der BioLiq Prozess des FZK Karlsruhe und das CARBO-V Verfahren von CHOREN (beide Kraftstoffherstellung, BTL).

FuE-Bedarf: Die Technologie der Vergasung von Biomasse ist seit über 100 Jahren bekannt, jedoch konnten die anlagenseitigen Probleme noch nicht zufriedenstellend gelöst werden. Darunter ist vor allem das Verständnis der pyrolytischen Zersetzung von Biomasse zu nennen. Hier entsteht unerwünschter Teer, der in der Gasreinigung wieder entfernt werden muss. Teer verursacht in der Gasnutzung Ablagerungen und maschinentechnische Probleme. Die räumliche Trennung der Umwandlungsvorgänge in speziell gestalteten Reaktoren kann die Kontrollierbarkeit der Reaktionen erhöhen und den Gasreinigungsaufwand verringern. Äußerst vielversprechend sind auch "in-situ" Konditionierungsverfahren, wie z.B. der AER-Prozess (absorption enhanced reforming) oder der oxygen donor process (Kohleverarbeitung), da hier eine Gaskonditionierung direkt im Reaktor erfolgt.

Neben logistischen Herausforderungen zur sicheren und kostengünstigen Versorgung mit Brennstoffen mangelt es vor allem an Betriebspraxis aus laufenden Anlagen, um Lernkurveneffekte zu erzielen. Dabei haben viele Anlagen noch einen starken Demonstrationscharakter und erfordern einen hohen personellen Betreuungsaufwand. Eine systemtechnische Anlagensteuerung und Überwachung kann ebenfalls zu ei-

ner höheren Anlagenverfügbarkeit beitragen und die Wirtschaftlichkeit erhöhen.

Die integrative Abstimmung der einzelnen Anlagenkomponenten ist einer der Forschungsschwerpunkte, wobei die einzelnen Anlagenteile auf die jeweilige Anwendung optimiert werden müssen. Von besonderem Interesse sind auch die sogenannten "Polygeneration"-Anlagen, bei denen gleichzeitig neben Strom und Wärme auch Kraftstoffe (flüssig und gasförmig) hergestellt werden können (siehe Anlage Güssing, Österreich). Dabei können Gesamtwirkungsgrade von über 80% erreicht werden, sofern die Wärmenutzung in das Konzept integriert ist.

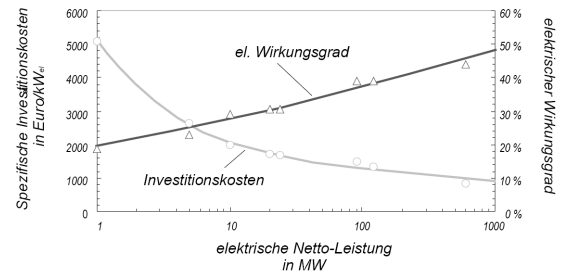


Abbildung 12: Kenngrößen von Vergasungsanlagen

Wie Abbildung 12 zeigt, haben gerade Kleinanlagen relativ hohe Investitionskosten. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass mit steigender Anlagenzahl eine Reduzierung der Investitionskosten durch Standardisierung der Baugruppen erreicht werden kann. Außerdem eignen sich kleine Anlagen besser zur KWK, da bei größeren Anlagen eine zuverlässige Wärmeabnahme nicht gesichert werden kann. Für Rohstoffkosten siehe Direktfeuerung. [37] [38] [39] Für BtL ergeben sich Herstellungskosten von 1,03 € / l Kraftstoffäquivalent. [15]

Kosten: Wie schon eingangs erwähnt, ist die Vergasungstechnologie heutzutage gegenüber anderen regenerativen Energieerzeugungsförmern noch nicht konkurrenzfähig. Dies liegt vor allem an den hohen Investitionskosten von 4-8 Mio. € / MW_{el}, den Betriebskosten und der stark standortabhängigen Brennstoffversorgung. Allerdings sind Konzepte unter optimalen Bedingungen denkbar, die einen wirtschaftlichen Betrieb in ein paar Jahren ermöglichen können. Dazu müssen aber weiterhin konsequent Forschungsgelder für den Bau und Betrieb neuer Anlagen bereit gestellt werden, damit diese Technologie einen Beitrag zur regenerativen Stromerzeugung leisten kann.

Die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Investitionskosten und wirtschaftlichen Kenngrößen zeigt die Abbildung 12. Hier lässt sich der degressive Verlauf der Investitionskosten ablesen, wobei der Wirkungsgrad mit steigender Anlagengröße zunimmt. Ein besonderes Interesse liegt vor allem bei den Kleinanlagen zwischen 200-500 kW_{el}, da hier eine starke Nachfrage zu verzeichnen ist.

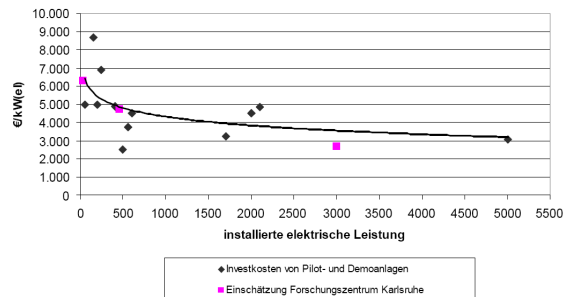


Abbildung 13: Spezifische Investitionskosten

4 Zusammenfassung und Ausblick

- Die energetische Verwendung von Biomasse hat im Jahr 2007 in Deutschland Emissionen in Höhe von 53,7 Mio. t CO₂ vermieden. Damit ist Biomasse für fast die Hälfte des Klimaschutzbeitrags der Erneuerbaren Energien verantwortlich.
- Die Entwicklung des Biomassepotenzials hängt von zukünftigen Flächen- und Ertragssteigerungen ab, die aus heutiger Sicht nur schwer abgeschätzt werden können.
- Die bestehende Konkurrenz um die Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche zwischen Energiepflanzen- und Nahrungsmittelproduktion ist nicht geklärt (Teller-Tank-Diskussion) und erschwert die Potenzialabschätzung zusätzlich.
- Die Nutzungskonkurrenz der Verfahren zur energetischen Nutzung von Biomasse untereinander lässt sich erst durch eine belastbare Bewertung der ökologischen und ökologischen Nachhaltigkeit lösen. Auf Grund dieser Bewertung ist es möglich die effizientesten Verfahren zu identifizieren und deren Entwicklung gezielt zu fördern.
- Viele Verfahren haben noch keine Marktreife erlangt und sind hinsichtlich ihrer Entwicklungspotenziale schwer zu bewerten.
- Ziel ist ein maximierter Hektarertrag mit minimierten ökologischen Folgekosten in Verbindung mit der optimalen energetischen Ausbeute bei der Umwandlung von Biomasse.

- Die für den Anbau nachwachsender Rohstoffe zur Verfügung stehende Fläche wird weiter ansteigen. Die Potentiale werden insgesamt weiter wachsen. [40]
- Eines der bisher größten ungelösten Probleme der energetischen Nutzung von Biomasse ist das der Nährstoffabtrennung zur Schließung des Stoffkreislaufs. Hier gibt es großen Forschungsbedarf.
- **Strom:**
Im Jahr 2007 hatte die Biomasse an der Bruttostromproduktion in Deutschland mit 23,8 TWh einen Anteil von 3,8 % (Abbildung 14).

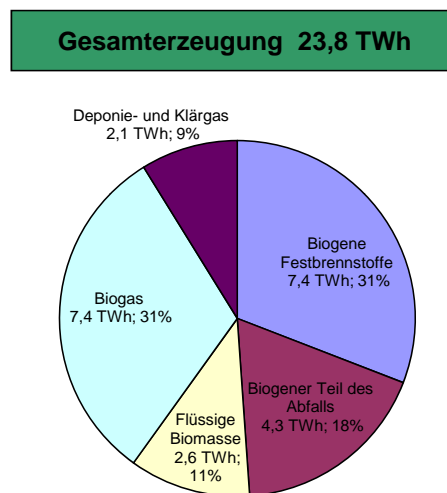


Abbildung 14: Struktur der Stromerzeugung aus Biomasse in Deutschland 2007
Eigene Berechnungen mit Zahlen aus [41]

- **Wärme:**
Der Biomasseanteil an der Wärmebereitstellung betrug 2007 87,5 TWh und erreichte damit über 90 % des Beitrags der Erneuerbaren Energien (Abbildung 15).

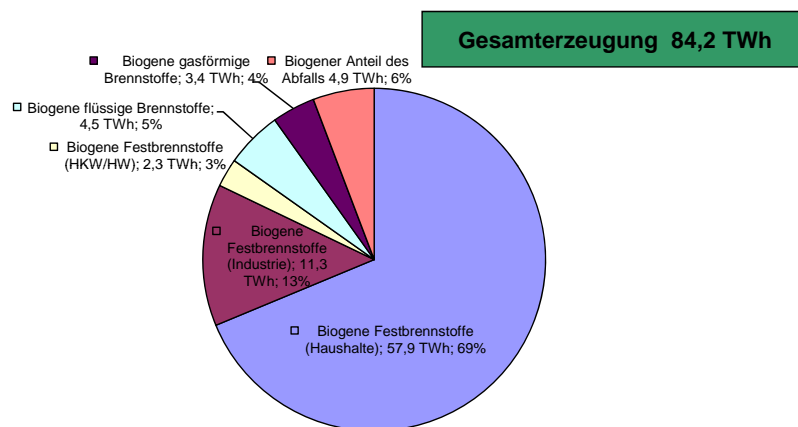


Abbildung 15: Struktur der Wärmebereitstellung aus Biomasse in Deutschland 2007
Eigene Berechnungen mit Zahlen aus [41]

- **Kraftstoff:**
In Deutschland wurden 2007 6,9 % der Kraftstoffe aus regenerativen Quellen hergestellt. Es wurden 0,5 Mio. t Bioethanol, 0,7 Mio. t Pflanzenöl und 3,1 Mio. t Biodiesel Primärkraftstoff verbraucht (Abbildung 16).

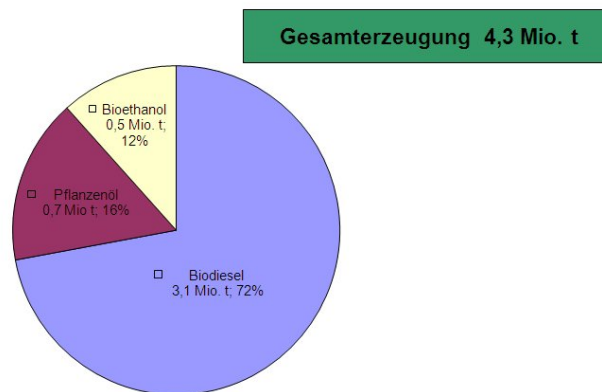


Abbildung 16: Struktur der Kraftstofferzeugung aus Biomasse in Deutschland 2007
Eigene Berechnungen mit Zahlen aus [41]

2030: Nach den Ausbauzielen der Bundesregierung sollen im Jahr 2030 16 % des Stroms, 10 % der Wärme und 12 % des Kraftstoffes aus Biomasse gewonnen werden. Das Umweltministerium rechnet damit, dass im Jahr 2030 4,4 Mio. ha, was 25 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands entspricht, zum Anbau von Energiepflanzen genutzt werden. Ohne die Beseitigung der erwähnten Schwierigkeiten erscheint es allerdings fraglich, ob der Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse wie geplant umgesetzt werden kann.

Literatur

- [1] UMWELTBUNDESAMT: Graphik: Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern 2007. Link vom 30.10.2008. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=14415>
- [2] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR): Anbau nachwachsender Rohstoffe. Link vom 31.10.2008. <http://www.fnr-server.de>
- [3] RÜTH, Christine: Kohlendioxid-Fresser Algen. In: *Online Ausgabe der Zeitschrift Energie Perspektiven*. Link vom 2.11.2008. http://www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep200802/0208_algen.html
- [4] LANDWIRTSCHAFTLICHE ZEITSCHRIFT RHEINLAND (ONLINE AUSGABE): Agrarmarkt NRW. Link vom 4.11.2008 <http://www.agrarmarkt-nrw.de/getreidemarkt.shtm>
- [5] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND – GENESIS ONLINE DATENBANK: Ertrag je Hektar (Feldfrüchte und Grünland) für die Jahre 2001–2005. Link vom 31.10.2008. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon>
- [6] LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN: Energiemais mit Vorteilen. Link vom 1.11.2008. <http://www.landwirtschaftskammer.de/fachangebot/technik/biogas/veroeffentlichungen/energiemais.htm>
- [7] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO): Production statistics. Link vom 1.11.2008. <http://faostat.fao.org>
- [8] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR): Bioenergy – Plants, Raw Materials, Products. (2008)
- [9] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR): Bioenergie – Basisdaten Deutschland. (2008)
- [10] ZEDDIES, Jürgen: Kosten und Verfügbarkeit von Biomassen. In: *Beiträge zum 3. BtL-Kongress* Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2008
- [11] PUTENSEN, Christian: Ökonomische Bewertung von Kulturfrüchten zur Ethanolherstellung in Deutschland. Institut Landwirtschaftliche Betriebslehre, Universität Hohenheim
- [12] SCHMITZ, Norbert: Bioethanol in Deutschland. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2003)
- [13] DIETER, Matthias: Holzbilanzen 2004 und 2005 für die Bundesrepublik Deutschland / Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. 2006. – Forschungsbericht
- [14] MANTAU, Udo: Holz – Potenzial und Verfügbarkeit. In: *Beiträge zum 3. BtL-Kongress* Fachagentur nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2008
- [15] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR): Preise Holzbrennstoffe. Link vom 31.10.2008. www.fnr.de
- [16] NITZSCH, Joachim: Leitstudie 2007: Ausbastrategie Erneuerbare Energien. (2007), Februar
- [17] DIETER, Matthias: Ergebnisse der bundesweiten Clusterstudie Forst und Holz im Rahmen der Charta für Holz. In: *Tagungsbeiträge zum Kongress: Holz – Rohstoff der Zukunft* Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2008
- [18] HECK, Peter: Nachwachsende Rohstoffe als Option für den Naturschutz. In: *Symposium Energiepflanzen der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe* Fachagentur nachwachsende Rohstoffe, 2007, S. 171–182
- [19] ARETZ, Astrid ; HIRSCHL, Bernd: Biomassepotenziale in Deutschland – Übersicht maßgeblicher Studienergebnisse und Gegenüberstellung der Methoden. Dendrom-Diskussionspapier Nr. 1 (2008), März
- [20] VETTER, Arnim: Stroh- Potenziale, Eigenschaften, Rahmenbedingungen. In: *Beiträge zur 1. Internationale Fachtagung Strohenergie* Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 2008
- [21] TRÄHN, Daniela ; JUNOLD, Michael: Energetische Nutzung von Stroh in Europa – Rahmenbedingungen, Potenzial und Entwicklungen. In: *Beiträge zur 1. Internationale Fachtagung Strohenergie* Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 2008
- [22] ROGASIK, Jutta ; KÖRSCHENS, Martin: Humusbilanz und Maßnahmen für optimale Humusgehalte. (2005)
- [23] PEISKER, Denis: Stand der Technik der Strohverbrennung / Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 2007. – Forschungsbericht
- [24] MESLE, Andrea: *Miscanthus – die Pflanze, deren Züchtung und Anbau sowie die Verwendungsmöglichkeiten und heutige Bedeutung*, Hochschule Nürtingen, Diplomarbeit, 2005
- [25] KAMM, Birgit ; GRUBER, Patrick R. ; KAMM, Michael: Biorefineries – Industrial Processes and Products. In: *Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie*. Wiley-VCH, 2005
- [26] UMWELTBUNDESAMT: Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar (1990–2006). (2008)
- [27] BUTZ, Wolfgang: Gedächtnisprotokolls des Telefonats mit Herrn Knichel (Statistisches Bundesamt) vom 3.11.2008.
- [28] THRÄN, Daniela ; SCHOLWIN, Frank: Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz – Stand und Perspektiven. Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig (2007)
- [29] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND – GENESIS ONLINE DATENBANK: Brennstoffeinsatz nach Energieträgern. Link vom 31.10.2008. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon>
- [30] FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR): Herstellungskosten Biokraftstoffe. Link vom 1.11.2008. www.fnr.de
- [31] RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (ONLINE AUFTRITT): Industry Statistics: Ethanol Production. Link vom 4.11.2008 <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>
- [32] DEIFIN: DIE FINANZSEITE: Maßsysteme und Maßeinheiten. Link vom 4.11.2008 <http://www.deifin.de/fumas.htm>
- [33] SHAPOURI, Hosein ; DUFFIELD, James A. ; GRABOSKI, Michael S.: Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol / United States Department of Agriculture. 1995. – Forschungsbericht

- [34] VETTER, Arnim: Statusbericht zur Energiepflanzenproduktion. In: *Beiträge zum 3. BtL-Kongress* Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2008
- [35] STAISS, Frithjof ; BADEN-WÜRTTEMBERG, Stiftung E. (Hrsg.): *Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007*. Biebrich, Radebeul 2007
- [36] BRÄKOW, Dipl.-Ing. D. ; OETTEL, Eberhard ; RICKERT, Dr.-Ing. I.: Untersuchungen zur Optimierung des Zusammenwirkens von Technologien zur dezentralen Energieerzeugung mit Brenngasen aus erneuerbaren Energieträgern. In: *Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V., Netze Erneuerbare Energieforschung - Eine Förderinitiative des BMBF* (2007)
- [37] KALTSCHMITT, M. ; HARTMANN, H.: *Energie aus Biomasse*. Springer Verlag, 2001. – 770 S.
- [38] SPECHT, Michael ; MARQUARD-MÖLLENSTEDT, Tonja ; SICHLER, Peter ; ZUBERBÜHLER, Ulrich: Der AER-Prozess: Neues thermochemisches Biomasse-Vergasungsverfahren mit flexiblen Edukt- und Produktströmen. In: *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Baden Württemberg, ZSW* (2006)
- [39] HENRICH, Edmund ; DINJUS, Eckhard: Die Pyrolyseslurry-Vergasung des Forschungszentrums Karlsruhe. In: *Nachwachsende Rohstoffe Synthetische Biokraftstoffe - Techniken, Potentiale, Perspektiven* Band 25 (2005)
- [40] SCHÜTTE, Andreas: Energiepflanzen in Deutschland - Rahmenbedingungen und Potenziale. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2007)
- [41] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung (Stand: Juni 2008).
- [42] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN: Der volle Durchblick in Sachen Bioenergie. (2008)
- [43] AGRARPLUS.AT: Heizwerte - Faustzahlen, Kennzahlen aus dem NaWaRo-Bereich. Link vom 31.10.2008. www.agrarplus.at/kennzahlen.heizwerte.php
- [44] FRÜHWALD, Arno: Rohstoffeffiziente Holzverwendung Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, 2008
- [45] KALTSCHMITT, Martin: Stand und Potenziale der Biomassenutzung in Deutschland. In: *Symposium Energiepflanzen der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe* Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2007
- [46] PEISKER, Denis: Das Strohheizkraftwerk Schkölen - Erfahrungen aus 13 Jahren Betrieb. In: *Beiträge zur 1. Internationale Fachtagung Strohenergie* Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 2008
- [47] PUDE, Ralf: Miscanthus Informationswebseite. Link vom 1.11.2008. <http://www.miscanthus.de>