



Berlin-Brandenburgische
Akademie der Wissenschaften

Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppe

**Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume
- LandInnovation -**

**Konversions-, Speicher- und
Versorgungstechnologien für die
energetische Biomassenutzung**

Dietrich Hebecker

Ingo Purr

Katja Purr

Februar 2006

MATERIALIEN Nr. 8

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume“
Jägerstr. 22/23
10117 Berlin
Tel. (030) 20370-538
Fax (030) 20370-214
<http://www.bbaw.de/bbaw/Forschung/Forschungsprojekte/Land/de/Startseite>

Materialien
Nr. 8

Dietrich Hebecker, Ingo Purr, Katja Purr
Konversions-, Speicher- und Versorgungstechnologien für die energetische Biomassenutzung
© 2006 Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, sind vorbehalten.

Lektorat: Tobias Plieninger
Satzvorlage und Umschlaggestaltung: work:at:BOOK / Martin Eberhardt, Berlin
Printed in Germany

Inhalt

Zusammenfassung	9
1 Einleitung	11
2 Stand der Konversions- und Nutzungstechnologien	13
2.1 <i>Wege der energetischen Biomassenutzung</i>	13
2.1.1 Biochemische Umwandlungsprozesse	14
2.1.2 Physikalisch – chemische Umwandlungsprozesse	18
2.1.3 Thermochemische Umwandlungsprozesse	20
2.2 <i>Umwandlungsprozesse zur Bereitstellung von Endenergie</i>	24
2.2.1 Bereitstellung von mechanischer Energie bzw. Elektroenergie	24
2.2.2 Wärmebereitstellung	27
2.2.3 Kältebereitstellung	28
2.3 <i>Entwicklungsvorhaben und Tendenzen für eine effiziente Bioenergienutzung</i>	29
3 Bewertung und Vergleich verschiedenen Nutzungswege	33
3.1 <i>Konversionsverfahren</i>	33
3.1.1 Bereitstellung flüssiger Gebrauchsenergieträger	33
3.1.2 Bereitstellung gasförmiger Gebrauchsenergieträger	36
3.1.3 Bereitstellung fester Gebrauchsenergieträger	38
3.2 <i>Verfahren zur Bereitstellung von Endenergien</i>	39
3.3 <i>Darstellung gesamtheitlicher Nutzungswege</i>	42
4 Spezifikation der Gebrauchs- und Nutzenergienträger	47
4.1 <i>Verfügbarkeit und Versorgungsfähigkeit von Bioenergieträgern in Deutschland</i>	47
4.2 <i>Verfügbarkeit und Versorgungsfähigkeit von Bioenergieträgern in Brandenburg</i>	48
4.3 <i>Speicherfähigkeit der Bioenergieträger</i>	50
4.4 <i>Transport- und Speicherfähigkeit der Gebrauchsenergien</i>	51
4.4.1 Flüssige Gebrauchsenergieträger	51
4.4.2 Feste Gebrauchsenergieträger	52
4.4.3 Gasförmige Gebrauchsenergieträger	52
4.5 <i>Speicherfähigkeit und Einspeisemöglichkeiten von Endenergien</i>	53
4.6 <i>Charakterisierung des ländlichen Nutzenergiebedarfes</i>	54
Literaturverzeichnis	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Biogaserträge verschiedener landwirtschaftlicher Stoffe	15
Tabelle 2: Darstellung der Vergasungstechniken und der zu gewinnenden Produkte	23
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Trockenfermentation	31
Tabelle 4: Eigenschaften biogener und fossiler Kraftstoffe	34
Tabelle 5: Eigenschaften gasförmiger Gebrauchsenergieträger	38
Tabelle 6: Übersicht exergetische Wirkungsgrade der Konversionsverfahren	42
Tabelle 7: Übersicht exergetische Wirkungsgrade der Nutzungstechnologien.....	43
Tabelle 8: Anbau nachwachsender Rohstoffe im Land Brandenburg.....	49
Tabelle 9: Lagereigenschaften von Energiepflanzen	50
Tabelle 10: Vergütung für Stromgewinnung aus Biomasse in Cent/kWh	53
Tabelle 11: Einsatzstoffe und deren Berechtigung zum Bezug des NawaRo-Bonus	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Konversionstechnologien	14
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Biogaserzeugung	15
Abbildung 3: Biogasanlagen in Deutschland	16
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Ethanolgewinnung	17
Abbildung 5: Bioethanolanlage in Deutschland	17
Abbildung 6: Verfahrensschritte bei der Pflanzenölgewinnung	19
Abbildung 7: Biodieselanlagen Deutschland	19
Abbildung 8: Verfahrensschritte der thermischen Konversionswege	20
Abbildung 9: Durchschnittliche Gaszusammensetzungen und Vergasungstechniken	21
Abbildung 10: Schematischer Verfahrensablauf zur Gewinnung synthetischer Kraftstoffe	22
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Flash-Pyrolyse im Wirbelbettreaktor	24
Abbildung 12: Nutzungswege zur Bereitstellung von mechanischer Energie bzw. Elektroenergie	24
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Dampf – Kraft – Prozesses	25
Abbildung 14: Überblick Brennstoffzellen	26
Abbildung 15: Feuerungsarten in Abhängigkeit der Biomasse und Anlagenleistung	27
Abbildung 16: Feuerungsarten	28
Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Absorptionskälteanlage	29
Abbildung 18: Verfahren der Firma CHOREN	30
Abbildung 19: Anwendung des FZK-Konzeptes am Beispiel von Baden-Württemberg	31
Abbildung 20: Exergieflussbild zum kleintechnischen Fertigpressen	34
Abbildung 21: Exergieflussbild zur alkoholischen Vergärung von Zuckerrüben	35
Abbildung 22: Exergieflussbild eines BTL-Verfahren	35
Abbildung 23: Exergieflussbild zur Pyrolyse	36
Abbildung 24: Exergieflussbild Methangärung	37
Abbildung 25: Exergieflussbild zur thermochemischen Vergasung	37
Abbildung 26: Exergieflussbild zur Bereitstellung des Pyrolyseprozesses	38
Abbildung 27: Einsatz von biogenen Kraftstoffen in BHKW	39
Abbildung 28: Exergieflussbild Stirlingmotor	40
Abbildung 29: Exergieflussbild Brennstoffzelle	41
Abbildung 30: Exergieflussbild DKP und Gasturbine	41
Abbildung 31: Exergetische Analyse eines Heizkessels	42
Abbildung 32: Exergetischer Wirkungsgrade bei der Bereitstellung flüssiger Gebrauchsenergeträger	43
Abbildung 33: Wirkungsgrade für die Bereitstellung von Endenergie aus gasförmigen und flüssigen Gebrauchsenergeträgern am Beispiel von Biogas und Bioethanol	45
Abbildung 34: Wirkungsgrade der Konversionsverfahren unter Berücksichtigung der Reststoffverwertung	46
Abbildung 35: Energiebereitstellung und Potential der erneuerbaren Energien	47
Abbildung 36: Einflussparameter auf das lokale Biomassepotential	48
Abbildung 37: Durchschnittliche Erträge in Brandenburg und Deutschland	49
Abbildung 38: Biomassepotential für die Landkreise Barnim und Uckermark	50
Abbildung 39: Kraftstoffverbrauch (Anbauverfahren: Pflug, Saatbettkombination)	55
Abbildung 40: Jährlicher Energiebedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes mit 1000 ha und Tierbesatz	56
Abbildung 41: Energieertrag bzw. Bedarf zur Bereitstellung flüssiger Kraftstoffe	57

Zusammenfassung

Die energetische Nutzung von Biomasse ist auf Grund des großen vorhandenen Potentials unverzichtbar bei der Substitution fossiler Brennstoffe. So kann in Deutschland rund 9% des derzeitigen Primärenergiebedarfs allein durch Biomasse gedeckt werden. Dabei stehen unterschiedliche Konversions- und Nutzungstechnologien zur Verfügung mit denen feste, flüssige und gasförmige Gebrauchsenergeträger bereitgestellt werden können.

Auf Grund der besseren Speicher- und Transportfähigkeiten und den verstärkten Bemühungen zur Substitution fossiler Kraftstoffe kommt dabei vor allem der Bereitstellung von flüssigen Energieträgern eine besondere Bedeutung zu. Dafür stehen heute schon Technologien zur alkoholischen Vergärung und Ethanolerzeugung sowie zur Gewinnung von Pflanzenöl bereit. Daneben werden Verfahren zur Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe weiter entwickelt.

Die erzeugten gasförmigen Gebrauchsenergeträger werden auf Grund ihrer Transport- und Speichereigenschaften zumeist in stationären Anlagen am Entstehungsort in Nutzenergien überführt. Die dafür zur Verfügung stehenden Konversionsverfahren wie Methangärung und Vergasung weisen einen annähernd gleichen und im Vergleich zur Bereitstellung synthetischer flüssiger Energieträger hohen Wirkungsgrad auf.

Eine effektive Nutzung von Biomasse wird vor allem durch Kraft-Wärme-Kopplung erreicht, welche sich überwiegend in dezentralen Anlagen sinnvoll darstellt. In der Praxis werden zur Bereitstellung von Endenergien überwiegend Verbrennungsmotoren mit einer relativ hohen Effizienz eingesetzt. Mit den zur Zeit in Entwicklung befindlichen Brennstoffzellen könnten zukünftig noch höhere Wirkungsgrade erzielt werden.

Um das vorhandene Biomassepotential optimal zu nutzen sollten bei Konversionsprozessen anfallende biogene Reststoffe wie Presskuchen aus Ölmühlen oder Zuckerrübenschnitzel aus der Ethanolgewinnung, einer weiteren Nutzung zu geführt werden.

Im Land Brandenburg ist auf Grund der geringen Bevölkerungsdichte und des hohen Anteils an Acker- und Waldfläche die komplexe energetische Versorgung mit biogenen Kraftstoff, Heizwärme und Elektroenergie der Bevölkerung im ländlichen Raum möglich.

1 Einleitung

Die politische und ökologische Diskussion zur nachhaltigen und umweltschonenden Energiewirtschaft führte in den vergangenen Jahren zum Ausbau erneuerbarer Energien. Neben der Nutzung von Wasserkraft, Sonnen- und Windenergie wird hierunter auch die Verwendung von Biomasse gezählt. Dieser kommt neben der ökologisch nachhaltigen Energiegewinnung die Sicherung und Schaffung neuer Arbeitsplätze in den strukturschwachen ländlichen Räumen Bedeutung zu.

Im Rahmen dieser Expertise werden im ersten Teil die verschiedenen Verfahren der Biomassenutzung dargestellt und die Wege zur komplexen Energieversorgung mit Verbrauchs- und Endenergien aufgezeigt. Um einen Überblick zur Effektivität der einzelnen Prozesse zu erhalten, wird im Weiteren eine exergetische Analyse und Bewertung vorgenommen. An Hand dieser können in Kombination mit dem aufgezeigten Biomassepotential und dem Bedarf an Energieträgern für landwirtschaftliche Unternehmen für den jeweiligen Standort und dessen spezifischen Gegebenheiten Aussagen über effiziente Wege zur Biomassenutzung abgeleitet werden.

2 Stand der Konversions- und Nutzungstechnologien

2.1 Wege der energetischen Biomassenutzung

Unter dem Begriff Biomasse wird ein sehr breites Spektrum an Energieträgern zusammengefasst. Prinzipiell werden darunter sämtliche Stoffe organischer Herkunft verstanden, also die gesamte in der Natur lebende und wachsende Materie und die Abfallstoffe aller lebenden und toten Lebewesen. Die Abgrenzung zu fossilen Energieträgern beginnt bei den Sekundärprodukten der Verrottung also Torf.

Die Heizwerte der verschiedenen Biomassen werden stärker durch den produktspezifischen Feuchtegehalt beeinflusst als durch die Art der Biomasse. Für trockene Biomasse kann von einem Heizwert von 19 MJ/kg_{TS} ausgegangen werden.

Die energetische Nutzung der Biomasse weist gegenüber anderen erneuerbaren Energien erhebliche Vorteile auf. So sind Probleme der Energiespeicherung und Bevorratung vergleichsweise gering und damit die Anpassung an den schwankenden Nutzenergiebedarf relativ problemlos. Dies gilt im besonderen Maße für eine dezentrale Nutzung.

Auf Grund der Vielfalt der Biomasse gestalten sich die Nutzungsmöglichkeiten ebenfalls vielfältig. Ein Überblick über die verschiedenen Verfahrensweisen ist in Abb.1 gegeben. Dabei wird der Einfluss der Erntetechniken nicht mit berücksichtigt.

Prinzipiell stellen sich drei Möglichkeiten zur Bereitstellung von Gebrauchsenergien aus Biomasse dar. Zum einem die biochemische Umwandlung durch mikrobielle Abbauprozesse. Dabei werden flüssigen oder gasförmigen Gebrauchsenergieträger durch Gärungsprozesse bereitgestellt.

Weiterhin kann über die physikalisch – chemischen Prozesse vor allem ölhaltiger Pflanzen ein flüssiger Kraftstoff gewonnen werden.

Den dritten Nutzungsweg für Biomasse stellen die thermochemischen Prozesse, wie Pyrolyse und Vergasung, dar. Hier können je nach Prozessführung feste, flüssige und gasförmige Energieträger erzeugt werden.

Diese drei Wege sind durch unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzte Biomasse gekennzeichnet. Dementsprechend eignen sich Biomassen mit hohem Feuchtegehalt besonders für den ersten Weg, mit hohem Ölgehalt für den zweiten und mit hohem Trockensubstanzgehalt für den dritten Konversionsweg.

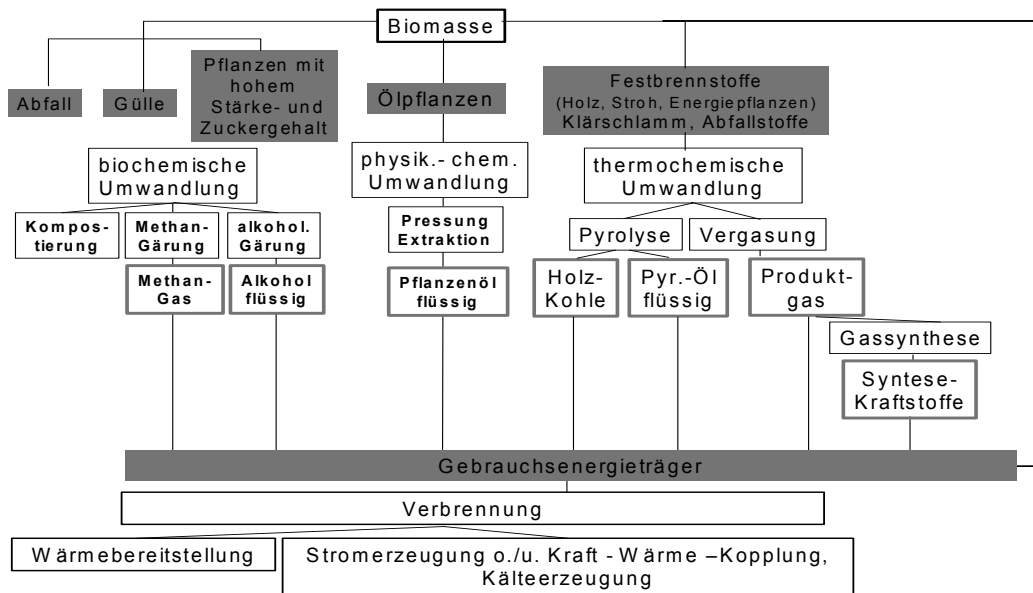


Abbildung 1: Darstellung der Konversionstechnologien

2.1.1 Biochemische Umwandlungsprozesse

Zur Bereitstellung von Gebrauchsenergien mit Hilfe von biochemischen Prozessen eignen sich grundsätzlich nahezu alle biogenen Rohstoffe. Jedoch erfolgt der Abbau unterschiedlich effektiv, so sind ligninhaltige Stoffe nur schwer biologisch abbaubar. Daher werden vor allem zucker-, stärke- und cellulosehaltige Rohstoffe verwendet.

Bei den biologischen Prozessen unterscheidet man in anaerobe und aerobe Abbauvorgänge, wobei die anaeroben Prozesse zur Biogas- und Ethanolgewinnung angewendet werden. Die biochemischen Prozesse eignen sich zur Bereitstellung von flüssigen und gasförmigen Gebrauchsenergieträgern. Während für die Biogaserzeugung eine breite Palette von Biomasse verwendet werden kann, ist diese bei der Gewinnung von Bioethanol auf wenige Pflanzenarten mit besonders hohem Zucker- oder Stärkegehalt beschränkt. Dies ist besonders unter dem Aspekt der Fruchtfolge und Bodenqualität zu beachten.

Ein weiteres spezifisches Merkmal der biochemischen Wandlungsprozesse ist der unvollständige Umsatz zu den Zielprodukten. Dies führt zu einer Mehrstufigkeit der Konversionsprozesse bzw. ein Reststoffanfall und dessen Ausbringung auf die Felder. Beides ist unter Umständen mit zusätzlichen Aufwendungen verbunden.

Methangärung

Bei der Methangärung erfolgt die mikrobielle Biomasseumsetzung unter Sauerstoffabschluss zu einem Biogas. Dieses Gas stellt ein Gemisch aus vornehmlich Methan und Kohlendioxid dar. Als Einsatzmaterial eignet sich eine breite Palette biogener Materialien und deren Gemische. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Zusammensetzung des zu vergärenden Materials Einfluss auf die Methanausbeute nimmt. So haben neben den Prozessparametern wie Temperatur, pH-Wert oder Verweilzeit vor allem auch der Wassergehalt bzw. Trockensubstanzgehalt, Hemmstoffgehalt und Art der Biomasse entscheidenden Einfluss auf die Biogasausbeute. Unter den derzeitigen gesetzlichen Vergütungsbestimmungen entsprechend EEG gewinnt der Einsatz von Energiepflanzen immer mehr

Bedeutung. Während bei der Nassfermentation die Gehalte an Trockensubstanz kleiner 12% sein sollten, können bei der Trockenfermentationen Materialien mit TS-Gehalten bis zu 35% verwendet werden. Diese ist jedoch mit einigen technischen Schwierigkeiten verbunden. Neben Problemen bei der Durchmischung, Sedimentation und Förderung des Materials während des Gärprozesses läuft die biochemische Zersetzung im Vergleich zur Vergärung von Gülle nur sehr langsam ab. Hierfür sind also größere Verweilzeiten und technisch höhere Aufwendungen notwendig, so dass in den derzeit betriebenen Biogasanlagen vorrangig die Vergärung von Gülle stattfindet.

Tabelle 1: Biogaserträge verschiedener landwirtschaftlicher Stoffe

	Gasertrag in m ³ /t Substrat
Rindergülle	25
Schweinegülle	36
Futterrüben	135
Silomais	190
Weidegras	110

Quelle: [22]

Der Vergärungsprozess erfolgt dabei zumeist kontinuierlich in einem Fermenter, worin in mehreren Stufen durch verschiedene Bakterienarten das Gasmisch erzeugt wird. In einem ersten Schritt, der Hydrolyse, werden Proteine, Fette und Kohlenhydrate zu niedermolekularen Verbindungen gespalten. Diese können anschließend von essigsäurebildenden Bakterien zu Essigsäure und Wasserstoff zersetzt werden. Bei der darauf folgenden Methanisierung entsteht das energiereiche Biogas mit bis zu 65% Methan und 35% Kohlendioxid.

Dieser Prozess läuft bei Umgebungstemperatur nur sehr langsam ab, so dass bei den technischen Anwendungen der Reaktor beheizt wird, um somit einen effektiven Substratumsatz zu erzielen. Weiterhin ist auch eine gleichmäßige Durchmischung des Materials im Fermenter einzuhalten, damit wird gewährleistet, dass die Umsetzung zu Methan gleichmäßig und vollständig erfolgt.

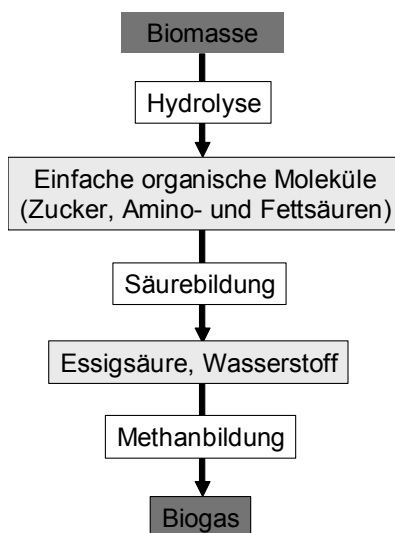


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Biogaserzeugung

Die Biogaserzeugung insbesondere die Verfahren zur Nassfermentation finden immer mehr Anwendung. Ausgehend von etwa 850 in Betrieb befindlichen Anlagen im Jahr 1999 hat sich deren Anzahl in den letzten Jahren mehr als verdoppelt. Dabei ist die installierte elektrische Gesamtleistung aller in Deutschland betriebenen Anlagen auf über 190 MW angestiegen.

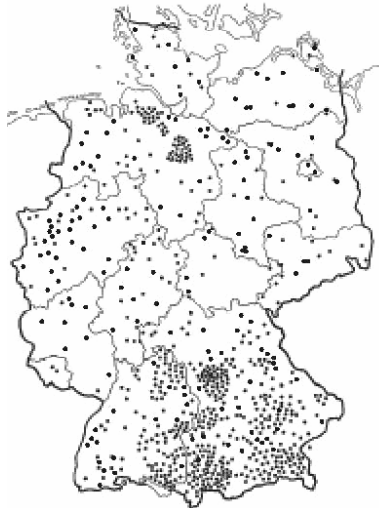


Abbildung 3: Biogasanlagen in Deutschland

Quelle: [1]

Alkoholische Gärung

Bei der Gewinnung von Ethanol als flüssigen Kraftstoff werden vor allem Zuckerrüben, Zuckerhirse oder Zuckerrohr verwendet. Der in der Zuckerrübe enthaltene Zuckergehalt von rund 17,5% mit einem Saccharoseanteil von über 90% wird durch mikrobielle Prozesse zu Ethanol und Kohlendioxid umgesetzt. Dabei kann aus einer Tonne Zuckerrüben rund 70 kg Ethanol gewonnen werden.

Bei der Verwendung von stärkehaltigen Einsatzstoffen, wie Kartoffeln, Topinambur, Weizen oder Roggen, ist ein vorgeschalteter Prozess für den Stärkeaufschluss notwendig bevor der eigentliche Vergärungsprozess erfolgt. Hierfür stehen eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, so kann Stärke sowohl in drucklosen als auch in Verfahren unter Druck für den Gärprozess gewonnen werden. Auch beim Einsatz von cellulosehaltigen Stoffen ist ein Aufschlussverfahren notwendig.

Diese zusätzlichen technischen Prozesse sind mit weiteren Aufwendungen verbunden, wobei insbesondere der Celluloseaufschluss aufwendig ist, so dass die Vorteile für die biochemische Ethanolgewinnung grundsätzlich bei den zuckerhaltigen Biomassen liegen.]

Aus der eingesetzten Biomasse wird nach der Reinigung und Zerkleinerung sowie notwendigen Vorbehandlungen entsprechend Abb.4 Ethanol gewonnen. Das eingemaischte Material wird in diskontinuierlichen aber auch in kontinuierlichen Prozessen mit Hefe fermentiert, wobei die vergärbaren Bestandteile unter Freigabe von Kohlendioxid zu Ethanol umgesetzt werden. Dieses wird aus dem Gärsubstrat in einer Destillation gewonnen. Der dabei erzeugte Rohalkohol mit Alkoholgehalten von 82 bis 87 Vol.% kann auch ohne die Weiteraufkonzentrierung als alleiniger Treibstoff eingesetzt werden, wie es zum Beispiel in Brasilien angewendet wird. Der Rohalkohol kann in mehreren Destillationsstufen und einer Absolutierung weiter aufkonzentriert werden, um den Wassergehalt im Ethanol auf unter 0,3 Vol.% abzusenken und damit die Mischbarkeit mit

herkömmlichem Benzin zu gewährleisten. Dabei kann eine Zumischung von 5 Vol.% Ethanol problemlos erfolgen ohne Veränderungen an den Motoren vornehmen zu müssen.

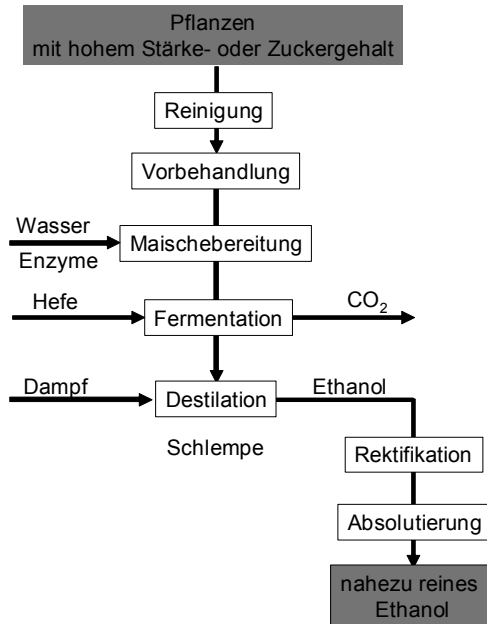


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Ethanolgewinnung

Großtechnische Anlage zur Gewinnung von Bioethanol sind bisher nur in geringem Maße realisiert, wie in Abb.5 deutlich wird steigt jedoch die Umsetzung dieser Technologie verstärkt. Wobei vor allem in Nord- und Ostdeutschland Anlagen mit Produktionskapazitäten über 100.000 t/a errichtet werden.



Abbildung 5: Bioethanolanlage in Deutschland

Quelle: [27]

Kompostierung

Die Kompostierung von biogenen Stoffen dient im Vergleich zu den vorhergehenden Verfahren nicht hauptsächlich der energetischen sondern der stofflichen Nutzung. Dabei werden neben pflanzlichen und tierischen Abfallstoffen auch Hausmüll und Klärschlamm aerob umgesetzt. Der erzeugte Kompost kann in der Landwirtschaft wieder eingesetzt werden. Die bei der Zersetzung freiwerdende Wärme fällt auf einem sehr geringen Temperaturniveau an, so dass eine effektive Nutzung nur schwer möglich ist.

2.1.2 Physikalisch – chemische Umwandlungsprozesse

Für die Produktion von flüssigen Gebrauchsenergieträgern durch physikalische – chemische Umwandlung kommen im Mitteleuropa vor allem Raps und Sonnenblumen als Ölsaaten auf Grund ihres hohen Ölertragspotentials in Frage.

Diese Produktionsvorgänge können sowohl in großtechnischen Anlagen aber auch in dezentralen Kleinanlagen erfolgen. In der Regel erfolgt immer eine Vorreinigung des Erntegutes, um Verunreinigungen zu entfernen und eventuelle Abbauprozesse durch die Feuchte der Saat und Pilze zu verhindern und damit die Saat lagerfähig zu konditionieren.

In Großanlagen mit Verarbeitungsleistungen von rund 4000t/d wird meist ein kombiniertes Verfahren aus Pressen der Ölsaaten und Extraktion angewendet. Es gibt aber auch Verfahren, bei denen ausschließlich meist zweistufig durch Pressen das Öl gewonnen wird. Dabei verbleiben jedoch Restölgehalte von 4 bis 10% im Presskuchen. Auch die Direktextraktion wird eingesetzt, da sie auf Grund der einfachen Prozessführung im Vergleich zum kombinierten Verfahren wirtschaftliche Vorteile aufweist. In der Regel wird jedoch das kombinierte Verfahren angewendet, da hierbei mit bis zu 99% die höchsten Ölausbeuten erreicht werden können. Bei der dezentralen Pflanzenölgewinnung sind der verfahrenstechnische Aufwand und die erreichbare Ölausbeute entsprechend geringer. Bei ca. 80 bis 85%. Hier finden vorrangig Schneckenpressen mit einer Verarbeitungskapazität von 5 bis 1000 kg/h Anwendung. Eine Konditionierung wie in großtechnischen Anlagen entfällt, so dass direkt nach der Reinigung der Saat von Fremdkörpern die Pressung der Ölfrucht erfolgt. Da die Ölreinheit bzw. die Feststoffbelastung ein wichtiges Qualitätsmerkmal des Pflanzenöles darstellt, muss der Feststoff durch Sedimentation oder Filtration abgetrennt werden. Das aus der Pressung und Extraktion gewonnene Pflanzenöl kann auch direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Hierfür ist jedoch eine Modifizierung der Motoren notwendig, so dass diese Anwendung noch recht selten erfolgt. In Deutschland wird in der Regel Biodiesel durch Umesterung des Pflanzenöls mit Methanol zu Pflanzenölmethylester (PME) hergestellt. Dieser kann in nahezu allen Dieselmotoren problemlos verwendet werden. Die Umesterung erfordert den Einsatz von ca. 10% Methanol, das in einem komplizierten Syntheseprozess aus fossilen Energieträgern gewonnen werden muss, und ist mit dem Anfall des Nebenproduktes Glycerin verbunden, für welches bereits gegenwärtig Absatzprobleme entstanden sind. Damit führt die Umesterung zusätzlich zu Markt- und Logistikproblemen.

Auch dieser Konversionsweg ist mit einer unvollständigen Nutzung der Biomasse verbunden und kann eine mehrstufige Prozesskette bedingen.

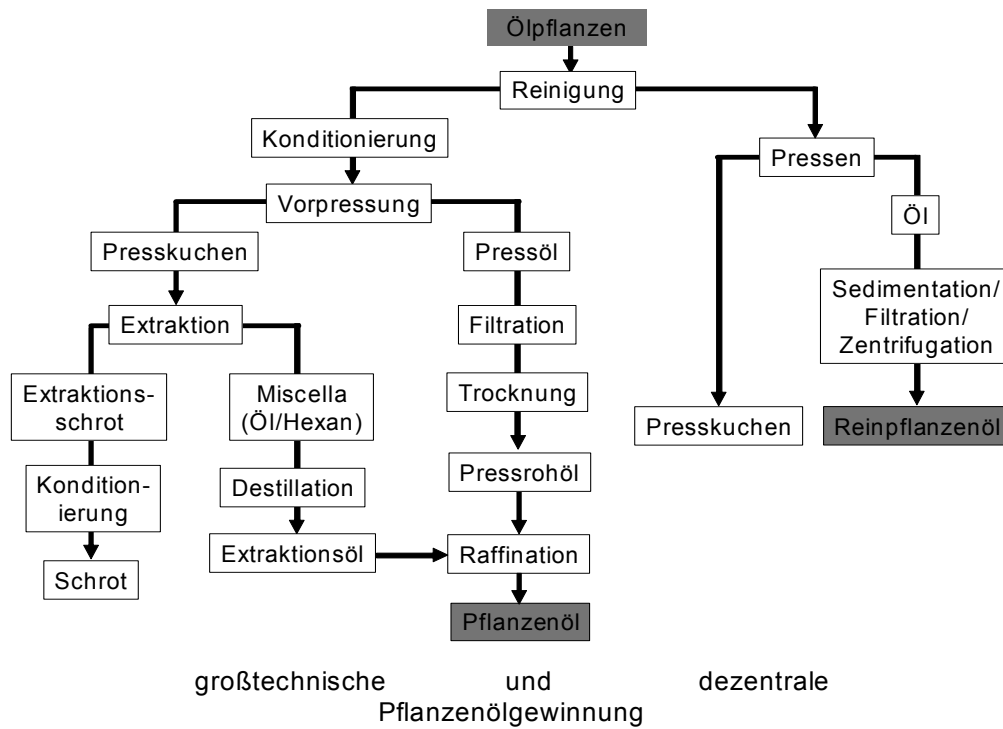


Abbildung 6: Verfahrensschritte bei der Pflanzenölgewinnung

Die Biodieselproduktionskapazität in Deutschland wurde in den letzten Jahren von 250.000 Tonnen im Jahr 2000 auf rund 1,17 Mio. Tonnen 2003 gesteigert. Die hierfür installierten Anlagen mit den installierten Kapazitäten sind in Abb. 7 dargestellt.

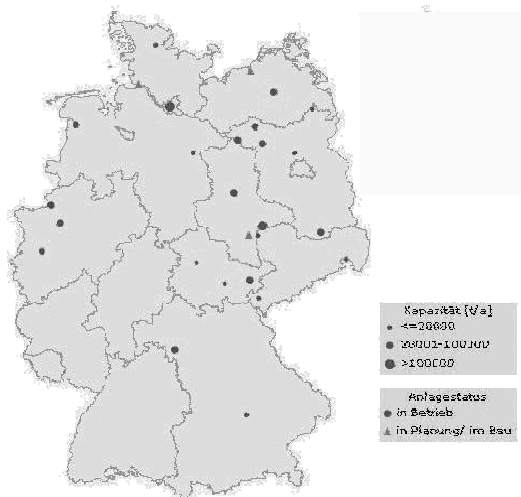


Abbildung 7: Biodieselanlagen Deutschland

Quelle: [27]

2.1.3 Thermochemische Umwandlungsprozesse

Unter thermochemischen Verfahren versteht man chemische Umwandlungsprozesse der Biomasse bei hohen Temperaturen. Dabei unterscheidet man die Prozesse an Hand des stöchiometrischen Sauerstoffverhältnisses in Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung. Die Verbrennung ist dabei das älteste angewendete Konversionsverfahren und hat bis heute die größte Bedeutung.

Bei direkter Verbrennung von biogenen festen Brennstoffen wird die freigesetzte Wärme als End- bzw. Nutzenergie für Heizzwecke verwendet. In großtechnischen Anlagen lohnt sich die Integration eines Dampfkraftprozesses wodurch neben Wärme auch Elektroenergie über Kraft –Wärme–Kopplungsprozesse bereitgestellt werden kann. Auf einige klein- und großtechnische Anwendungsfälle von direkter Verbrennung wird in den Kapitel 2.2 näher eingegangen. Im Folgenden wird daher auf die zwei innovativen Verfahrenstechnologien Pyrolyse und Vergasung eingegangen, bei denen vor der Bereitstellung von Endenergie ein vielfältig einsetzbarer biogener Gebrauchenergieträger entsteht.

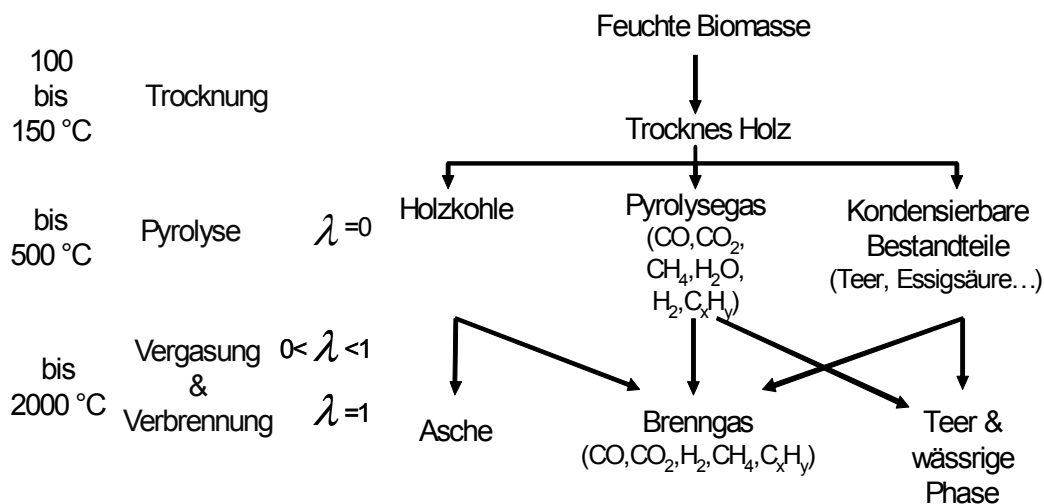


Abbildung 8: Verfahrensschritte der thermischen Konversionswege

Vergasung

Die Vergasung zielt auf die Gewinnung eines gasförmigen Energieträgers durch vollständigen Umsatz des festen biogenen Kohlenstoffträgers mit Hilfe eines Vergasungsmittels ab. Diese thermische Zersetzung kann mit Luft bzw. Sauerstoff durch Teiloxidation des Brennstoffes oder mit Wasserdampf und Wärmezufuhr von außen ablaufen. In Abhängigkeit des Vergasungsmittels werden so unterschiedliche Brenngasqualitäten erzeugt. Die Wahl des Vergasungsmittels richtet sich nach der möglichen Weiternutzung und wirtschaftlichen Aspekten. So erfordern Sauerstoff- und Dampferzeugung bzw. die externe Bereitstellung der notwendigen Prozesswärme hohe Investitions- und Betriebskosten. Neben der Einteilung nach dem Vergasungsmittel erfolgt eine Unterscheidung der Vergasungstechniken hinsichtlich der Strömungsführung von Brennstoff zum Vergasungsmittel. Ein Überblick der Technologien ist in Abb.9 gegeben.

Neben den herkömmlichen Festbettvergaser, die nur eine geringe Effizienz um 50% aufweisen und den Wirbelschichtverfahren, die vor allem für Großanlagen und für Anlagen im Leistungsbereich über 1 MW geeignet sind, werden immer neue Techniken entwickelt, die nicht dieser klassischen Einordnung gerecht werden. Ursache dieser ständigen Weiterentwicklung ist die Verbesserung der

Gasqualität hinsichtlich Teer- und Staubgehalt sowie die Erhöhung des Wirkungsgrades. Die für den Betrieb von motorischen BHKWs vorgeschriebenen Grenzwerte können nur mit hohen technischen und finanziellen Aufwendungen erreicht werden, da dies jedoch vor allem in dezentralen Anlage einen wirtschaftlichen Betrieb in Frage stellt, werden Verfahrenstechniken entwickelt, bei denen bereits nach dem Reaktor bessere Qualitäten gewährleistet werden. Dies kann zum Beispiel erreicht werden durch hohe Reaktortemperaturen, um die höhere Kohlenwasserstoffe zu spalten.

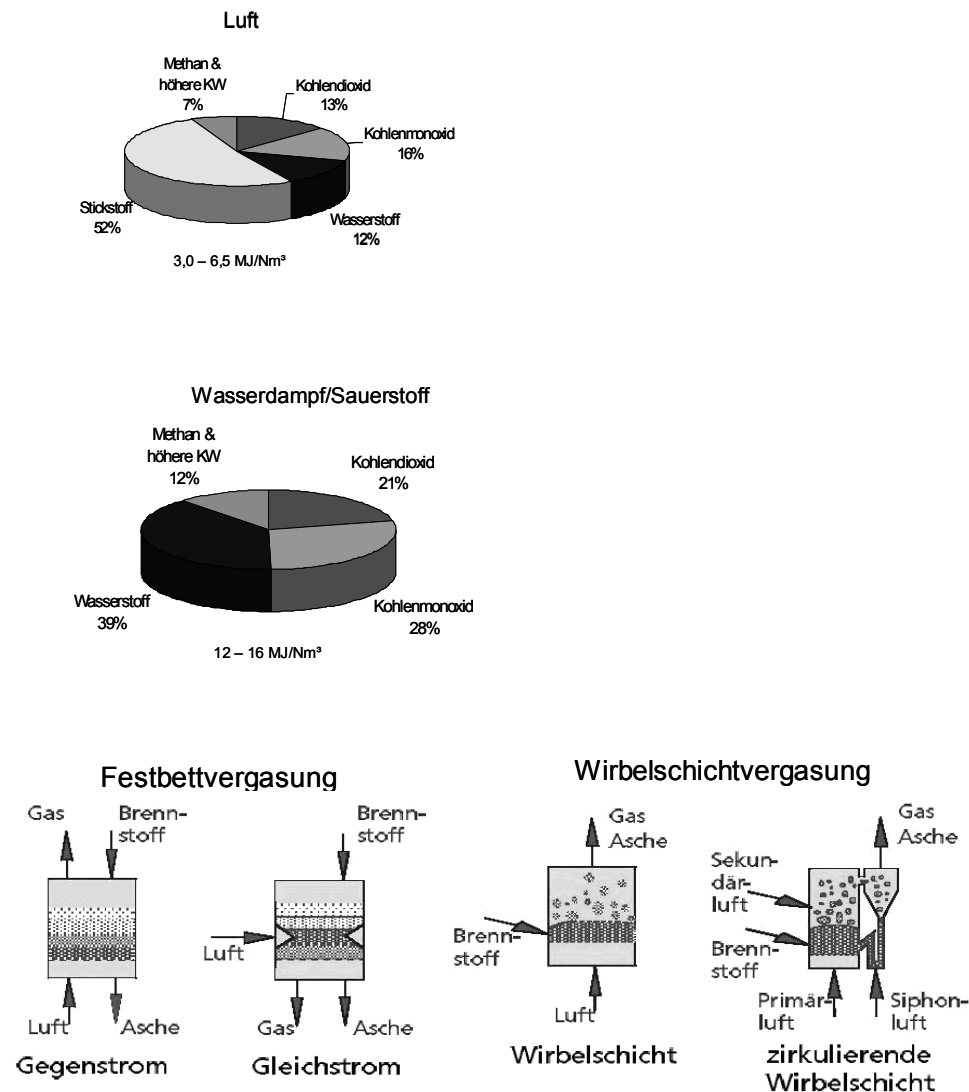


Abbildung 9: Durchschnittliche Gaszusammensetzungen und Vergasungstechniken

Quelle: [15]

Die Bandbreite an möglichen Einsatzstoffen für die Vergasung ist sehr groß, kann aber in Abhängigkeit der Verfahrenswahl eingeschränkt werden. So können in Festbettreaktoren nur Materialien bestimmter Korngröße eingesetzt werden, da es bei einem zu großen Feinanteil zu hohen Druckverlusten und damit zum Erliegen des Prozesses kommt. Auch in Hinblick auf Wassergehalte und Aschegehalte des Brennstoffes sind je nach Verfahren dem Prozess Grenzen gesetzt. Dabei ist mit sinkendem Energiegehalt bzw. höherem Feuchtegehalt des Einsatzmaterials ein geringerer Wirkungsgrad des Vergasungsprozesses unumgänglich.

Synthetische Kraftstoffe

Der Anreiz fossile Rohstoffe auch auf dem Kraftstoffmarkt zu substituieren, führt zu Erzeugung synthetischer Kohlenwasserstoffe aus Biomasse. Um das bei der Vergasung erzeugte Gas zur Kraftstoffgewinnung zu nutzen, stehen die katalytischen Verfahren der Fischer-Tropsch-Synthese zur Verfügung. An das Synthesegas aus der Vergasung werden dabei hohe Anforderungen gestellt, so sollte es frei von Teer, Partikeln und Katalysatorgiften sein auch der Inertanteil sollte so gering wie möglich sein. Aus diesem Grund wird zur Bereitstellung von Kraftstoffen das Synthesegas durch die Vergasung von Biomasse mit reinem Sauerstoff und/oder Dampf erzeugt. Diese Vergasungsmittel verursachen im Vergleich zu Luft höher Betriebskosten. Neben der Gasreinigung ist ebenfalls eine Konditionierung des Gases hinsichtlich des stöchiometrischen Verhältnisses von Wasserstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid notwendig. Dies kann zum einem durch die Zugabe von Wasserstoff oder durch die Abtrennung von Kohlendioxid erfolgen. Entsprechend Gleichung 1 ist ein Stöchiometriefaktor von $S=2$ zu realisieren [6].

$$S = \frac{P_{H_2} - P_{CO_2}}{P_{CO} - P_{CO_2}} \quad (\text{GL.1})$$

Die notwendigen Konditionierungen führen zu hohen Investitions- und Betriebskosten. Der Wirkungsgrad dieses Bereitstellungspfades ist geringer im Vergleich zur reinen motorischen Nutzung und die hierfür notwendigen Gasqualitäten sind anspruchsvoller und damit finanziell und technisch schwerer zu realisieren. Auf Grund der höheren Flexibilität flüssiger Gebrauchsenergieträger durch bessere Speicher- und Transporteigenschaften können diese BTL – Verfahren (Biomass to liquid) grundsätzlich sinnvoll sein. Wegen der komplexen Verfahrensstruktur und des hohen anlagentechnischen Aufwandes ist dieser Umwandlungsweg ausschließlich für Großanlagen geeignet und dementsprechend mit einem großem Transport- und Logistikaufwand verbunden.

Die über diese Verfahren bereitgestellten Stoffe können als reine Kraftstoffe oder durch Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen verwendet werden.

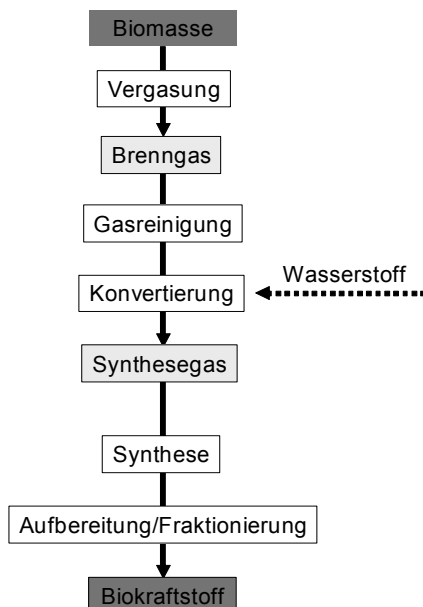


Abbildung 10: Schematischer Verfahrensablauf zur Gewinnung synthetischer Kraftstoffe

Pyrolyse

Die pyrolytische Zersetzung ist wie die Vergasung und Trocknung ein Zwischenschritt zur vollständigen Oxidation. Sie nimmt als Einzelprozess eine wichtige Funktion in der Bereitstellung fester und flüssiger Gebrauchsenergeträger aus Biomasse ein. Die Zersetzung der Biomasse erfolgt dabei unter Luftabschluss und Wärmeeinwirkung. Durch die Wahl der Reaktionsparameter kann der Pyrolyseprozess gezielt gesteuert werden und damit Einfluss darauf genommen werden, welcher Gebrauchsenergeträger vorrangig entsteht. So kann je nach Temperatur, Aufheizrate und Druckniveau die Ausbeute der Hauptprodukte Kohle, Öl und Gas gesteuert werden. Ein Überblick der Verfahren und deren Einflussfaktoren wird in der Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Darstellung der Vergasungstechniken und der zu gewinnenden Produkte

Pyrolyseverfahren	Einflussparameter	Produkte
Verkohlung	lange Verweilzeit, geringe Aufheizrate	Koks
Flashpyrolyse	Schnelle Aufheizraten	Pyrolyseöle
Druckverflüssigung	hoher Wasserstoffpartialdruck	Pyrolyseöle

Die Verkohlung von Holz mit dem Meilerverfahren ist dabei ein seit Jahrhunderten bekanntes und angewendetes Verfahren, welches auf die Gewinnung von Holzkohle abzielt. Die Kohleausbeute bei diesen Verfahren liegen bei ca. 25% bezogen auf die eingesetzte Holz trockenmasse. Moderne Techniken wie die verschiedensten Retortenverfahren erzielen Kohleausbeuten von 30% und mehr, da hier für die Wärmebereitstellung nicht ein Teil der Biomasse verbrannt wird sondern die bei der Verbrennung des Pyrolysegases freiwerdende Wärme genutzt wird [4]. Der größte Teil der weltweit produzierten Kohle wird in Ländern der Dritten Welt energetisch zur direkten Verbrennung genutzt.

Für die energetische Nutzung in Industrieländern sind jedoch vorrangig die Verfahren zur Gewinnung von Pyrolyseöl relevant. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Flash-Pyrolyse zur Verfügung. Dabei wird das biogene Material schnell aufgeheizt und unter Sauerstoffabschluss thermisch zersetzt. Anschließend erfolgt die Abtrennung der festen Fraktion also des entstandenen Kokes. In einer Quenche wird das Gas abgekühlt, so dass die flüchtigen Bestandteile auskondensieren und aufgefangen werden können. Die restlichen brennbaren Gasbestandteile wie Kohlenmonoxid und Methan werden zur Prozesswärmebereitstellung verbrannt. Ein solches Verfahren ist in Abb.11 schematisch dargestellt. Mit Hilfe der Flash-Pyrolyse können bis zu 75% Pyrolyseölausbeuten bezogen auf die trockene Biomasse erzeugt werden. Dabei werden Massendurchsätze im Bereich von 20 kg/h bis hin zu 30 t/d realisiert [4]. Für das feste Nebenprodukt gibt es gegenwärtig in großem Umfang keinen Markt, es besteht jedoch die Möglichkeit dieses energetisch durch Mitverbrennung in Kraftwerken zu nutzen.

Ein weiteres Verfahren zur Bereitstellung von Pyrolyseölen stellt die Druckverflüssigung dar, bei der unter hohem Wasserstoffdruck die Biomasse unter Wirken eines Katalysators zersetzt wird. Dabei können aus 100 kg Holz etwa 36 kg Pyrolyseöl bereitgestellt werden [4]. Die Technologie ist dabei an die Kohleverflüssigung angelehnt. Das so gewonnene Bioöl bedarf vor dem Einsatz zur energetischen Nutzung in Form von Kraftstoff jedoch noch weiteren Aufbereitungsprozessen, deshalb scheint eine solche Technologie nur in zentralen Großanlagen mit entsprechenden Logistikproblemen realisierbar zu sein.

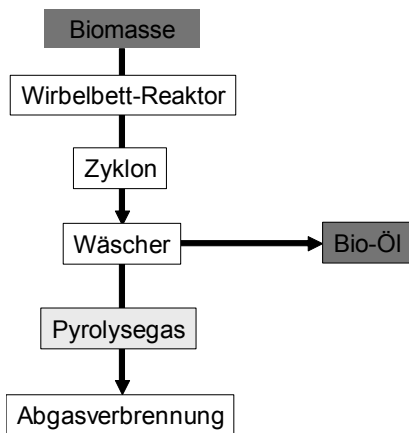


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Flash-Pyrolyse im Wirbelbettreaktor

2.2 Umwandlungsprozesse zur Bereitstellung von Endenergie

Aus den in den Konversionsprozessen gewonnenen Gebrauchsenergieträger können in unterschiedlichen Prozessen mechanische Energie, Wärme und Kälte bereitgestellt werden. Dabei steht vor allem die komplexe Energieversorgung auf Grundlage der Biomassennutzung im ländlichen Raum im Vordergrund. So gilt es neben dem Bedarf an flüssigen Kraftstoffen zum Betrieb von Kraftfahrzeugen, die Versorgung mit Heizwärme insbesondere in den Wintermonaten und Kälte für Lager- und Kühlzwecke zu realisieren. Durch effektive Kraft-Wärme bzw. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung kann diese komplexe Energieversorgung auch mit der Bereitstellung von Elektroenergie gewährleistet werden.

2.2.1 Bereitstellung von mechanischer Energie bzw. Elektroenergie

Für die unterschiedlichen Gebrauchsenergieträger stehen verschiedene Verfahren zur Bereitstellung mechanischer Energie zur Verfügung. Ein Überblick der möglichen Nutzungswege ist in Abb. 12 gegeben.

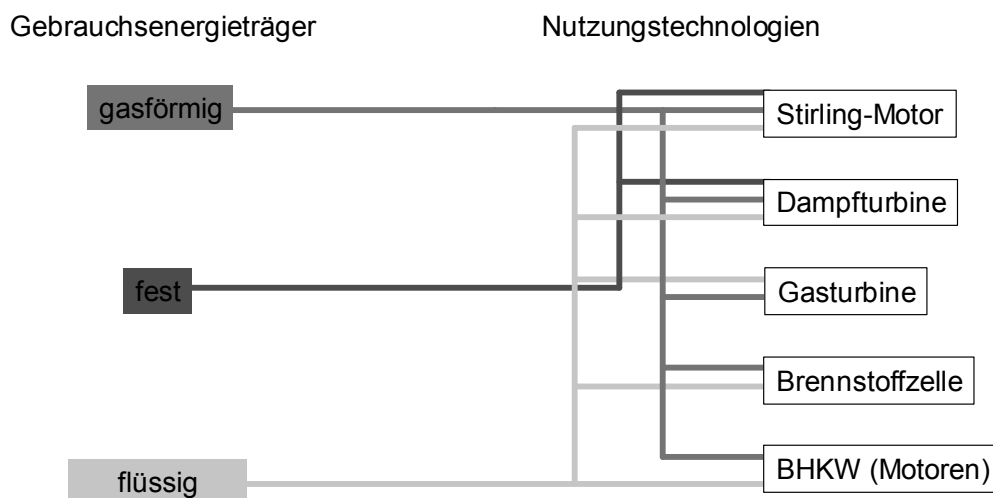


Abbildung 12: Nutzungswege zur Bereitstellung von mechanischer Energie bzw. Elektroenergie

Großtechnisch erfolgt die reine Verbrennung oder Mitverbrennung in konventionellen Kraftwerken der biogenen Gebrauchsenergieträger mit anschließendem Dampf-Kraft-Prozess zur Stromgewinnung. Dabei wird im Dampferzeuger durch die Verbrennungswärme Dampf bereitgestellt, welcher in einer nachgeschalteten Turbine entspannt und durch diese Druckabsenkung elektrische Energie erzeugt wird. Der Entspannungsdruck und die dazu gehörige Kondensationstemperatur richten sich dabei in der Regel nach der gewünschten Temperatur der Wärmeauskopplung. Die angewendeten Frischdampfparameter sind deutlich niedriger als in konventionellen Heizkraftwerken, so dass auch die Effizienz der Stromerzeugung relativ gering ist.

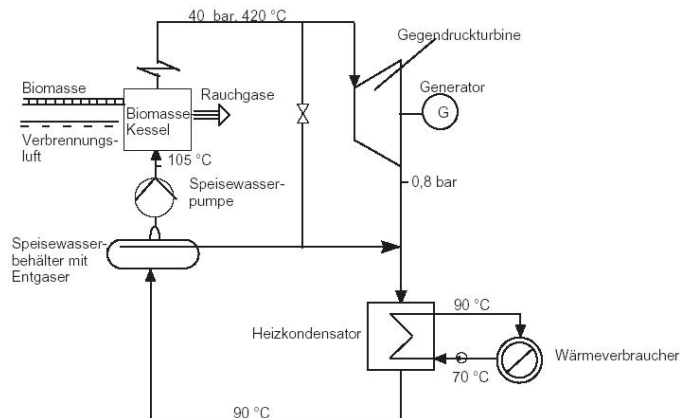


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Dampf-Kraft-Prozesses

Gasförmige biogene Gebrauchsenergieträger können weiterhin großtechnisch in Gasturbinen und kleintechnisch in Mikrogasturbinen angewendet werden. Hierbei wird Luft verdichtet und in der Brennkammer dem Brennstoff zugeführt. Das entstehende heiße Abgas wird in der Turbine wieder entspannt und abgekühlt. Für den wirtschaftlichen Betrieb einer solchen Turbine ist der im Gas enthaltene Methangehalt bzw. Heizwert ausschlaggebend.

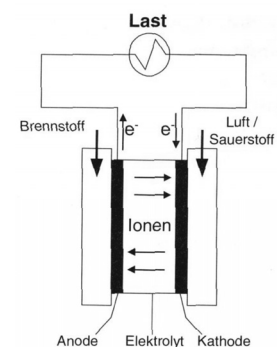
In so genannten Kombikraftwerken werden Gas- und Dampfturbinen (GuD) eingesetzt und damit höhere Wirkungsgrade realisiert. Bei Dampfkraftwerken liegt das obere Temperaturniveau niedriger als bei Gasturbinenanlagen. So wird in Kombikraftwerken nach der Gasturbine mit dem Abgasstrom und einem Abhitzeessel ein Dampfkraftprozess realisiert. Damit werden die thermodynamischen Vorteile der Gasturbine, also Wärmezufuhr bei hoher Temperatur, mit dem des Dampfkraftprozesses, der Wärmeabfuhr auf niedrigem Temperaturniveau, vereinigt.

Kleintechnisch ist der Einsatz von Gasturbinen bzw. Mikrogasturbinen auf Grund der geringen Betriebserfahrungen, hoher Investitionskosten und hohen Reinheitsanforderungen insbesondere hinsichtlich des Staubgehaltes begrenzt, hier im dezentralen Bereich werden gegenwärtig vorrangig die motorischen Blockheizkraftwerke (BHKW) eingesetzt. Für die motorische Nutzung eignen sich gasförmige und flüssige Kraftstoffe entsprechend der eingesetzten Technologien von Otto- und Dieselmotoren. Ottomotoren werden bei gasförmigen Gebrauchsenergieträgern eingesetzt. Dabei wird das Gas mit der notwendigen Verbrennungsluft angesaugt, verdichtet und durch installierte Zündkerzen fremd gezündet. Der Einsatz von Dieselmotoren ist sowohl bei flüssigen als auch bei gasförmigen Substanzen möglich, bei schwankender Gasqualität bietet sich die Anwendung von Zündstrahlmotoren an. Dabei wird das Brenngas mit der Luft angesaugt und durch das Einspritzen von zusätzlichem Diesel wird die Selbstzündung infolge der Druck- und Temperaturerhöhung gewährleistet. Unabhängig vom Brennstoff und damit bei allen biogenen Gebrauchsenergieträgern kann der Stirling-Motor für die Stromerzeugung in dezentralen Kleinanlagen angewendet werden.

Dieser arbeitet mit einer äußeren Verbrennung das bedeutet, dass das Arbeitsgas des Motors durch indirekte Beheizung mit dem Verbrennungsabgas erwärmt wird. Der Wirkungsgrad der Stirling-Motoren ist aus diesem Grunde als gering einzustufen.

Daneben ist die Nutzung von biogenen Brenngasen in Brennstoffzellen möglich. Diese ermöglichen die direkte Umwandlung der im Brennstoff enthaltenen Energie in elektrische Energie. Das dafür eingesetzte System aus Elektrolyt und Elektroden wird nicht verbraucht. Der Brennstoff wird an der Elektrode in Ionen umgewandelt, welche den Elektrolyt durchdringen. Die leichter beweglichen Elektronen werden über die Elektrode ab- bzw. zugeführt und treiben durch die bei der Ionisation auftretenden Spannungsdifferenzen einen elektrischen Verbraucher an. Die zur Verfügung stehenden Brennstoffzellen werden entsprechend dem verwendeten Elektrolyt und dem Temperaturniveau des Prozesses klassifiziert. So laufen Niedertemperatur-brennstoffzellen schon bei 60°C und in Hochtemperatur-Brennstoffzellen können Temperaturen bis 1000°C erreicht werden [16]. Um Hemmungen der ablaufenden Reaktionen zu verhindern werden hohe Anforderungen an die Gasreinheit gestellt, die mit zunehmendem Temperaturniveau etwas sinken. Biogene Brenngase können in den Brennstoffzellen eingesetzt werden, welche für Erdgas geeignet sind, vor allem in Hochtemperatur-Brennstoffzellen, aber auch hier muss eine hohe Gasqualität gewährleistet werden, wodurch unter Umständen ein Reformieren notwendig ist. Ein Überblick über die verschiedenen Brennstoffzellen, die unterschiedlichen Entwicklungsstand bisher erreichen, und das Funktionsprinzip ist in Abb. 14 gegeben.

Brennstoffzelle	Brenngas	Temp.	Elektrolyt
alkalische BZ (AFC, ABZ)	H ₂	60– 100°C	KOH
Membran BZ (PEFC, PMBZ)	H ₂ , Methanol	60– 80°C	Protonen- leitende Membran
Phosphosaure BZ (PAFC, PSBZ)	H ₂ , Erdgas	160– 220°C	H ₃ PO ₄
Karbonatschmelzen BZ (KSBZ, MCFC)	H ₂ , CO, Erdgas, Kohlegas	600– 660°C	Li ₂ CO ₃ + K ₂ CO ₃
Oxidkeramische BZ (OKBZ, SOFC)	H ₂ , Erdgas, Kohlegas	800– 1000°C	ZrO ₂



Prinzipaufbau einer Brennstoffzelle

Abbildung 14: Überblick Brennstoffzellen

Quelle: [16]

2.2.2 Wärmebereitstellung

Die Bereitstellung von Wärme erfolgt durch die thermische Umsetzung der Gebrauchsenergieträger. Neben der direkten Verbrennung der Biomasse und der dabei freiwerdenden Wärme kann Heizwärme auch kombiniert in Kraft – Wärme – Kopplungsprozessen bereitgestellt werden. Die direkte Erzeugung von Heizwärme aus Bioenergieträgern erfolgt mit einer äußerst geringen Effektivität. Für die Effizienzsteigerung sollte also perspektivisch die Kraft-Wärme-Kopplung angestrebt werden. In dezentralen Anlagen findet dies in Blockheizkraftwerken (BHKW) statt, bei denen die Wärme durch die Abgas- und Motorkühlung gewonnen wird. Großtechnisch folgt auf den Verbrennungsprozess der Biomasse ein Dampf-Kraft-Prozess. Die bei dem Verbrennungsprozess entstehenden Rauchgase werden durch Kessel bzw. Wärmetauscher geführt um so die Wärme an das Wärmeträgermedium abzugeben. In kleinen dezentralen Anlage ist dies in der Regel Wasser mit Temperaturen bis ca. 90 °C und großtechnisch Dampf je nach Nutzung bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen.

In Abhängigkeit der Eigenschaften fester Gebrauchsenergieträger und der Leistungsgröße der Feuerungsstätte stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Diese beginnen mit Kaminen und Zimmeröfen über Feuerungen zur zentralen Hausversorgung bis hin zu Heizkraftwerken im Bereich mehrer Megawatt. Eine Darstellung dieser ist in den Abbildungen 15 und 16 gegeben.

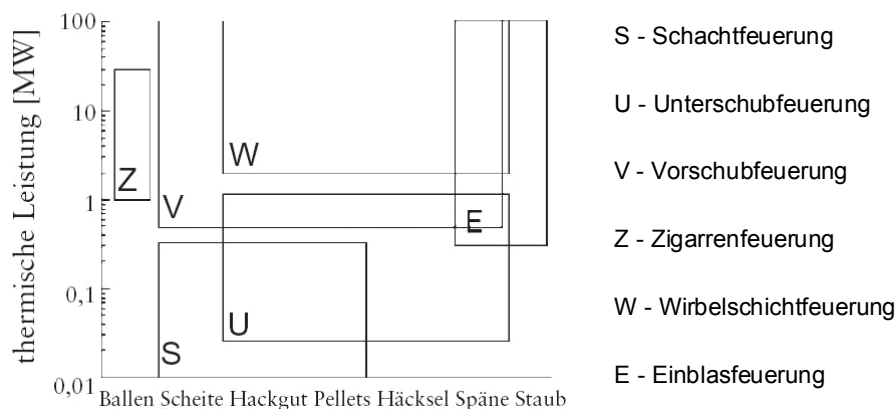


Abbildung 15: Feuerungsarten in Abhängigkeit der Biomasse und Anlagenleistung

Quelle: [9]

So wird stückiges Holz überwiegend in Schachtf Feuerungen in dezentralen Anlagen eingesetzt. Hackschnitzel und Pellets können dagegen in nahezu allen verfügbaren Feuerungssystemen und Leistungsbereichen verwendet werden, während Häckselgut aus halmartiger Biomasse sich überwiegend für die Unter- und Vorschubrostfeuerungen eignen. Späne und staubförmige Biomasse finden hingegen Einsatz in Einblas- und Wirbelschichtfeuerungen.

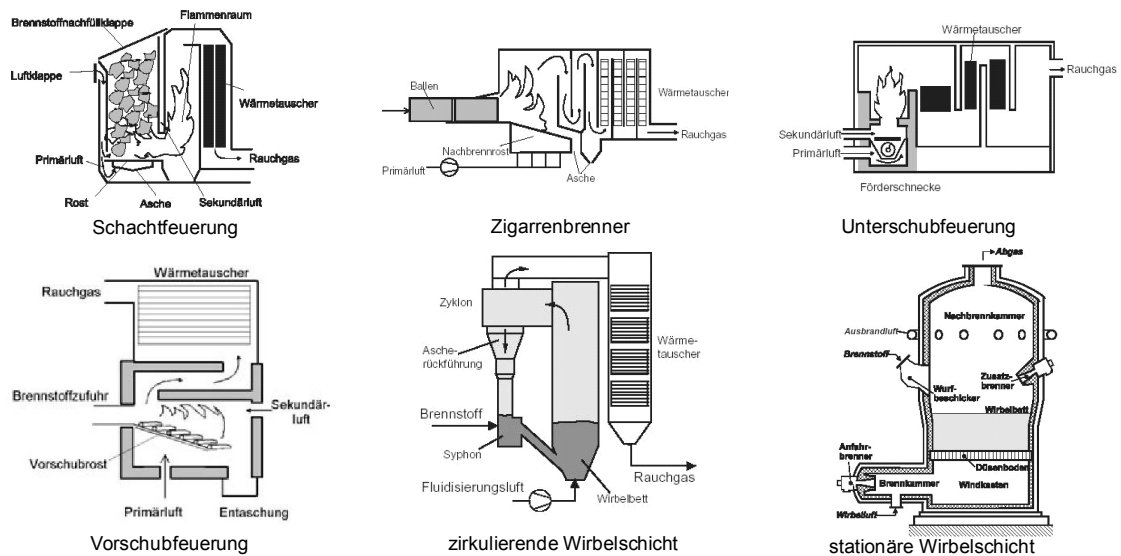


Abbildung 16: Feuerungsarten

Quelle: [9]

Neben dem Einsatz von aufbereiteter Biomasse können natürlich auch die Produkte der Konversionsprozesse in einfachen Verbrennungssystemen genutzt werden. So kann Brenngas aus der Vergasung und Pyrolyse in modifizierten Gasbrenner und flüssige Kraftstoffe in Heizölbrennern mitverbrannt werden. Dies ist in der Regel jedoch energetisch ineffektiv, da die auftretenden Verluste des Nutzungsverfahrens sich um die Konversionsverluste erhöhen und damit höher liegen im Vergleich zur direkten Verbrennung. Eine solche Vorgehensweise macht Sinn im Hinblick auf die Möglichkeit Produkte der Konversionsverfahren unabhängig vom Entstehungsort flexibel einzusetzen und somit den Verbrauch fossiler Energieträger in vielen dezentralen Anlagen zu substituieren.

2.2.3 Kältebereitstellung

In landwirtschaftlichen Betrieben ist meist eine komplexe Energieversorgung notwendig. So kann neben der Stromversorgung und Wärmebereitstellung auch die Bereitstellung von Kälte für Lager- und Kühlzwecke notwendig sein.

Hierfür stehen zwei Technologien zur Verfügung. Zum einem die Kompressionskälteanlage, die als Antriebsenergie Elektroenergie benötigt, und die Absorptionskälteanlage, bei der Heizwärme notwendig ist. Mit Absorptionskälteanlagen kann ausschließlich Klimakälte bis ca. 5°C bereitgestellt werden. Wird Tieftiefkühlkälte benötigt so wird der Einsatz von Kompressionskälteanlagen notwendig. Auf Grund der technischen Aufwendungen zur Stromerzeugung aus Biomasse und der durch das EEG gegebenen hohen finanziellen Vergütungen der Stromabgabe ist vorrangig der Einsatz von Absorptionskälteanlagen sinnvoll. Dabei kann zum Beispiel die in einem dezentralen BHKW anfallende Wärme als Antriebsenergie zur Kälteerzeugung verwendet werden, wodurch eine sinnvolle und effektive Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung realisiert werden kann.

Der Aufbau einer Kälteanlage ist in Abb. 17 schematisch dargestellt. In einer Absorptionskälteanlage durchläuft das Arbeitsmedium, in der Regel Wasser, unterschiedliche Apparate auf verschiedenen Temperatur- und Druckniveaus.

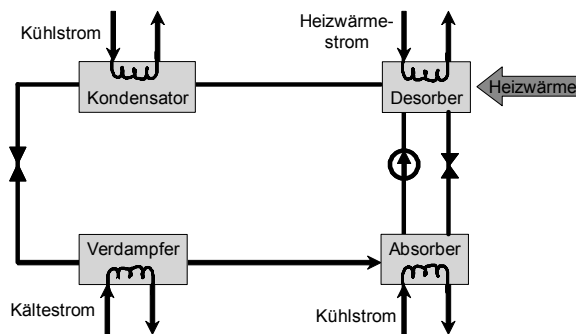


Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Absorptionskälteanlage

Das Wasser wird in einem Absorber unter Wärmeabgabe in einer Trägerflüssigkeit absorbiert. Anschließend erfolgt eine Druckerhöhung auf das Druckniveau des Desorber. Hier wird mit Hilfe der Antriebsenergie bzw. Heizwärme das Wasser dampfförmig ausgetrieben. Bei anschließender Kondensation des Wasserdampfes wird Wärme auf mittlerem Temperaturniveau abgegeben. Nach Druckabsenkung wird das Wasser im Verdampfer verdampft und stellt hier die gewünschte Kälteleistung bereit. Als Heizwärme für den Desorber ist Warmwasser mit einer Temperatur von ca. 85–95°C notwendig. Die anfallenden Abwärmen im Kondensator und Absorber können in der Regel nicht mehr technisch zur Energiebereitstellung genutzt werden. In der Praxis werden vor allem die Stoffsysteme Ammoniak-Wasser oder Lithiumbromid-Wasser in Absorptionskälteanlagen verwendet.

2.3 Entwicklungsvorhaben und Tendenzen für eine effiziente Bioenergienutzung

Auf Grund besserer Transport- und Lagereigenschaften und der erhöhten Substitution von fossilen Kraftstoffen werden die Bemühungen zur Bereitstellung flüssiger Gebrauchsenergieträger verstärkt. Zur Zeit steht ausschließlich Biodiesel als biogener Kraftstoff flächendeckend in Deutschland zur Verfügung. Die Gewinnung von Kraftstoffen aus Ölsaaten insbesondere Raps reicht jedoch nicht aus um die Zielvorgaben zur Substitution fossiler Kraftstoffe zu realisieren. Aus diesem Grund werden zum einen Anlagen zur alkoholischen Vergärung insbesondere von Getreidepflanzen errichtet. Weiterhin werden so genannte BTL-Verfahren entwickelt bei denen synthetische Kraftstoffe bereitgestellt werden können. Hierbei wird im Anschluss an die thermochemische Vergasung eine Synthese des erzeugten Gases mit Hilfe von Katalysatoren durchgeführt. Die so gewonnenen synthetischen Kraftstoffe weisen identische Eigenschaften wie mineralische Kraftstoffe auf. Auch die Mineralöl- und Automobilindustrie erkennt die Notwendigkeit und Chancen dieser Technologie. So ist zum Beispiel Shell an den Vorhaben der Firma CHOREN beteiligt, welche ein mehrstufiges BTL-Verfahren entwickelt hat. Das eingesetzte Holz wird hierbei zu erst in einem Niedertemperaturvergaser zu Pyrolysegas und Koks zersetzt, welche anschließend in einem Flugstromvergaser bei hohen Temperaturen zur Gewinnung eines Synthesegases umgesetzt werden. Bei der anschließenden Fischer-Tropsch-Synthese wird ein Gemisch verschiedener höherer Kohlenwasserstoffe gewonnen. Die erste kommerzielle Anlage soll in Freiberg errichtet werden und eine Leistung von 50 MW mit einer Tagesproduktion von 300 barrel Sunfuel aufweisen [18].

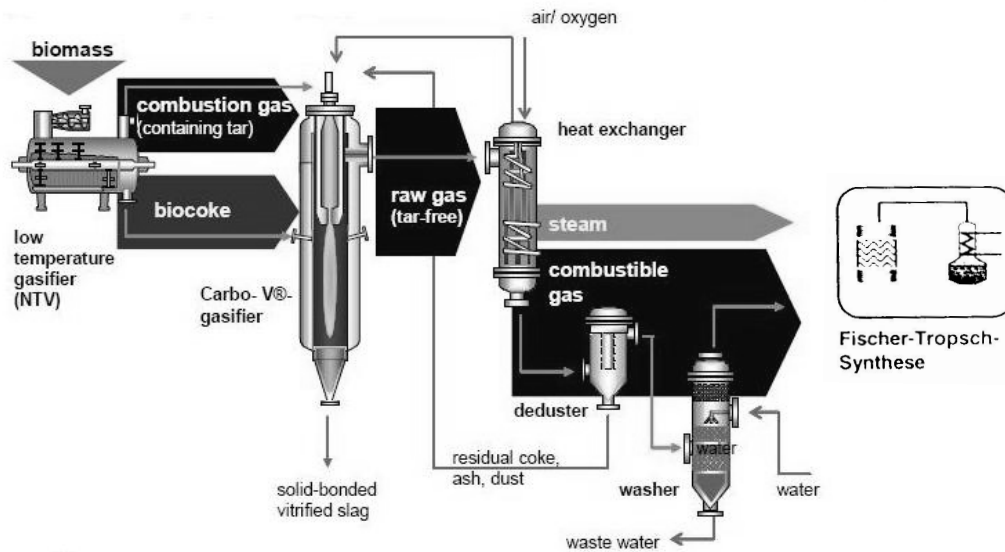


Abbildung 18: Verfahren der Firma CHOREN

Quelle: [18],[26]

Solche BTL-Verfahren können nur im großen Leistungsbereich effektiv betrieben werden. Für eine 50 MW Anlage würden stündlich rund 11t Holz benötigt, da sich die Versorgung für solch große Mengen Biomasse jedoch problematisch darstellt, wird vom Forschungszentrum Karlsruhe ein alternatives Konzept vorgeschlagen. Dabei soll in mehreren kleinen dezentralen Anlagen ein Gemisch aus Koks und Öl (Slurry) erzeugt und zu einer Großanlage transportiert werden. Dort soll anschließend die Vergasung des Slurry mit nachgeschalteter Fischer-Tropsch-Synthese erfolgen. Der Slurry weist eine wesentlich höhere Energiedichte als die Einsatzbiomasse auf, so dass der Transport zur Großanlage effektiver gestaltet werden kann. Auf Grund der stofflichen Eigenschaften eines solchen Gemisches stellt sich der Transport jedoch problematisch dar. Vorteilhaft an diesem Konzept wäre die partielle Sicherung von Arbeitsplätzen im ländlichen Raum.

Um die Sicherung ländlicher Arbeitsplätze und die Versorgungssicherheit mit Biomasse zu realisieren scheint die Errichtung von dezentralen KWK-Anlagen sinnvoll. Dabei richtet sich die Anlagentechnik und -größe nach der vorhandenen Biomasse. Der in solchen Anlagen gewonnene Strom kann in das lokale Netz eingespeist werden und wird entsprechend EEG vergütet. Wie im Kapitel 4.4 deutlich wird, werden die höchsten Vergütungen bei Kraft-Wärme Kopplung erreicht. Aus diesem Grund ist für die dezentralen Anlagen auch der lokale Wärmebedarf ausschlaggebend. Demgegenüber wären bei zentralisierten Großanlagen entsprechende Fernwärmenetze erforderlich.

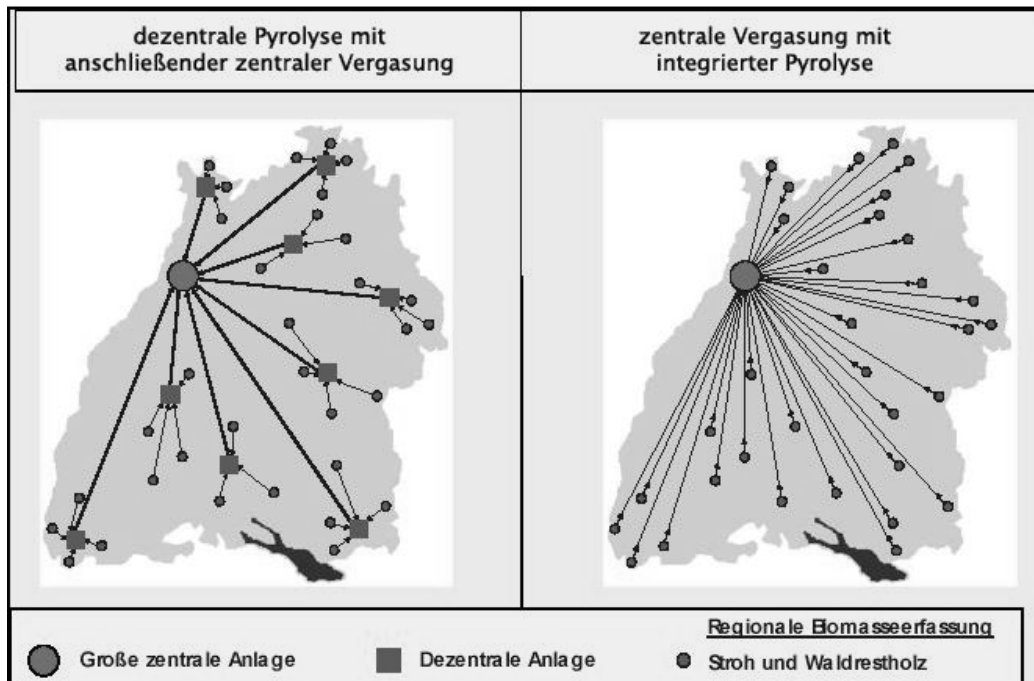


Abbildung 19: Anwendung des FZK-Konzeptes am Beispiel von Baden-Württemberg

Quelle: [23]

Um den Anteil regenerativer Energien zur Stromerzeugung zu steigern, wird außerdem der Einsatz von Energiepflanzen staatlich gefördert. Aus diesem Grund werden verstärkt Verfahren zur Trockenfermentation zur Gewinnung von Methangas entwickelt. Trockenfermentationsverfahren werden bislang nur im Bereich der Bioabfallverwertung angewendet. Die hierfür verfahrenstechnisch aufwendigen kontinuierlichen Verfahren zeigen sich für die landwirtschaftliche Anwendung zu kostenintensiv. Auf Grund der höheren Energiegehalte der verwendeten Substrate sind die Anlagengrößen geringer im Vergleich zur Nassfermentation. Die Entwicklungen zur Umsetzung dieser Technologie reichen von diskontinuierlich betriebenen Reaktoren bis hin zum diskontinuierlichen Umsatz der Biomasse unter Folienschläuchen. Ein Überblick über die Vor- und Nachteile dieser Technologie wird in Tabelle 3 gegeben. Zur Zeit befinden sich rund 2000 Biogasanlagen in Deutschland in Betrieb, welche nahezu alle Verfahren zur Nass- bzw. Flüssigfermentationen sind.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Trockenfermentation

Vorteile	Nachteile
kleinere Anlagen auf Grund höherer Energiedichte des Substrates geringere Prozessenergiebedarf modular erweiterbare Anlagen kein Anmischen von trocknen Materialien notwendig geringere Anfälligkeit gegen Störstoffe - einfachere Lagerung von Gärresten	höhere Verweilzeiten kontinuierliche Gasproduktion nur mit mehreren phasenversetzt arbeitenden Fermentern möglich hoher Impfmaterialebedarf Explosionsgefahr beim Be- und Entladen Stand der Technik noch nicht ausgereift

Quelle: [25]

3 Bewertung und Vergleich verschiedenen Nutzungswege

Zur effektiven Nutzung des vorhandenen Biomassepotentials ist eine technologische Bewertung der verschiedenen Nutzungswege durchzuführen. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die unterschiedlichen Konversionsverfahren und die Technologien zur Endenergiebereitstellung exergetisch analysiert. Im Vergleich zu einer energetischen Betrachtung werden hier die Wertigkeiten der Endenergien berücksichtigt. Vereinfachend wird angenommen, dass die Brennstoffexergie gleich der Brennstoffenergie ist. Für die Darstellung des Exergiegehaltes entstehender nutzbarer Wärmen wird davon ausgegangen, dass diese für Heizzwecke auf einem Temperaturniveau von 70°C genutzt wird. Damit kann die Exergie entsprechend Gleichung 2 berechnet werden.

$$E_{\text{Wärme}} = Q_{\text{Wärme}} \frac{T_{\text{Wärme}} - T_U}{T_{\text{Wärme}}} \quad (\text{GL. 2})$$

Auf Grund der Vielfalt der möglich Verfahren einzelner Konversionswege und der großen Bandbreite möglicher Einsatzstoffe und daraus resultierende Schwankungsbereiche der Ausbeuten bzw. Wirkungsgrade werden jeweils typische Mittelwerte zum Vergleich herangezogen. Damit können unter Umständen Abweichungen der Effektivität im Vergleich zu einzelnen Praxisanwendungen auftreten. Die nachfolgende exergetische Betrachtung stellt eine thermodynamisch begründete Verfahrensanalyse und den Vergleich der Techniken dar. Auf dieser Basis wird die Effektivität der Nutzung der verschiedenen Bioenergieträger, die mit einem spezifischen Exergiegehalt von Eins beschrieben werden, für die Erzeugung von Gebrauchsenergieträgern bewertet. Unabhängig von dieser Effektivität haben die Technologien Bedeutung hinsichtlich notwendiger Substitution fossiler Energieträger und Erzeugung bestimmter Gebrauchs- oder Endenergien.

3.1 Konversionsverfahren

3.1.1 Bereitstellung flüssiger Gebrauchsenergieträger

Die Gewinnung flüssiger Energieträger aus biogenen Materialien hat auf Grund der flexiblen Einsatzmöglichkeit und der Substitution fossiler Kraftstoffe zunehmend große Bedeutung. Die in den entsprechenden Konversionsverfahren gewonnenen flüssigen Gebrauchsenergieträger müssen auf Grund spezifischer Stoffeigenschaften zum Teil noch in weiteren Verfahren aufbereitet werden, um diese als Kraftstoffe einsetzen zu können.

Tabelle 4: Eigenschaften biogener und fossiler Kraftstoffe

	Diesel C ₁₀ bisC ₂₀	Benzin C ₆ bisC ₁₂	Rapsöl	Biodiesel C ₁₆ bisC ₁₈	Ethanol C ₂ H ₅ OH	Pyrolyseöl I
Heizwert in MJ/kg	42,7	42,7	36,7	37,1	26,8	16-19
Dichte bei 15°C in kg/l	0,83– 0,85	0,794	0,9–0,93	0,875–0,9	0,72–0,775	1,1–1,3
Viskosität bei 40°C in mm ² /s	2,5–3,5		>38	3,5–5	1,19	13–80*
Flammpunkt in °C	>55	–20	>220	>100	12	45–100

*bei 50°C

Quelle: [19]

Physikalisch-chemische Konversionsverfahren

Die heutige Bereitstellung biogener Kraftstoffe in Deutschland beschränkt sich vorrangig auf die Gewinnung von Pflanzenöl aus Ölsaaten durch physikalisch-chemische Prozesse. So können hier großtechnisch Ölausbeuten bis hin zu 99% erreicht werden und durch anschließende Umesterung in Form von Biodiesel zum Betrieb von Kraftfahrzeugen genutzt werden. In kleineren Anlagen wird durch ein oder zweistufiges Fertigpressen eine Ölausbeute von rund 85% erreicht. Gewonnenes reines Pflanzenöl ist, nach einer entsprechenden Motoranpassung ebenfalls zum Betrieb von Dieselmotoren einsetzbar. Durch die Anzahl der Pressungen werden unterschiedliche Ausbeuten realisiert im Durchschnitt kann von einem exergetischen Wirkungsgrad von 45% ausgegangen werden. Die auftretenden Verluste sind zum einem die notwendige Antriebsenergie der verwendeten Motoren und zum größten Teil die noch in weiteren Verfahren nutzbare Exergie des entstandenen Presskuchens. Bei der großtechnischen Biodieselherstellung kann auf Grund höherer Ölausbeuten auch von höheren Wirkungsgraden im Bereich von 50 bis 55% ausgegangen werden. Diese Angaben gelten für den Einsatz von Raps, welcher in Deutschland vorrangig Einsatz findet. Bei Sonnenblumenkernen werden bei gleichen Ölausbeuten höhere Wirkungsgrade erreicht, da hier ein größerer Ölanteil von ca. 50% im Vergleich zu ca. 40% bei Raps in der Frucht vorliegt [4].

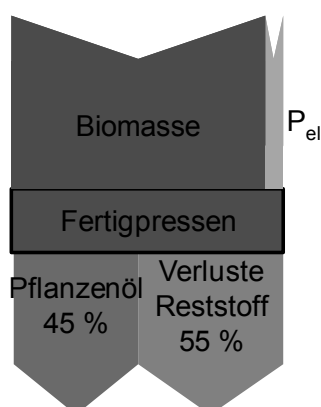


Abbildung 20: Exergiestromdiagramm zum kleintechnischen Fertigpressen

Biochemische Konversionsverfahren

Durch alkoholische Gärung kann Ethanol aus zuckerhaltigen aber auch stärkehaltigen Einsatzstoffen gewonnen werden. In Deutschland wird vor allem Getreide in großtechnischen Anlagen zu Ethanol umgesetzt. Auf Grund der hohen Solarenergieeinbindung und möglicher einfacherer Verfahrenstechnik ist auch der Einsatz von Zuckerrüben sinnvoll. Das gewonnene Ethanol kann zum Betrieb von Kraftfahrzeugmotoren verwendet werden. In Deutschland erfolgt jedoch ausschließlich die Zumischung zu herkömmlichem Benzin. Bei dieser biochemischen Konversion werden ca. 55% der Eingangsexergie in den Kraftstoff überführt. Bei der Vergärung von stärkehaltigen oder lignosehaltigen Substraten ist mit etwas geringerer Effektivität auf Grund der notwendigen Aufschlussverfahren auszugehen.

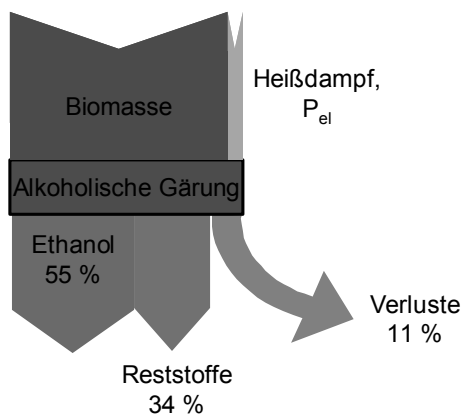


Abbildung 21: Exergiestromdiagramm zur alkoholischen Vergärung von Zuckerrüben

Thermochemische Konversionsverfahren

Über den Weg der thermochemischen Vergasung und Bereitstellung eines Synthesegases kann zum Beispiel über die Fischer-Tropsch-Synthese auch aus lignosehaltigen Biomassen Kraftstoff gewonnen werden. Hierbei müssen jedoch hohe Reinheitsanforderungen an das Gas erfüllt werden, die mit hohen finanziellen Aufwendungen verbunden sind. Obwohl der exergetische Wirkungsgrad von 50% die Technologie viel versprechend darstellt, ist momentan ein wirtschaftlicher Betrieb nur in Großanlagen möglich.

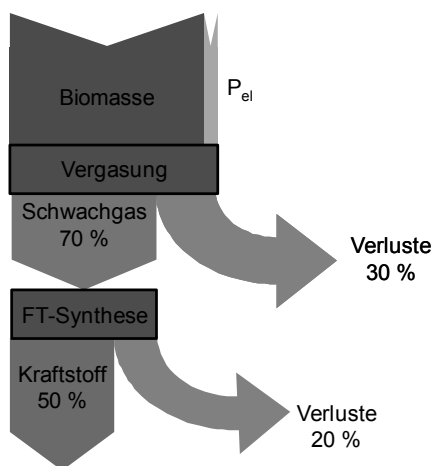


Abbildung 22: Exergiestromdiagramm eines BTL-Verfahrens

Ein weiterer thermochemischer Prozess zur Bereitstellung flüssiger Gebrauchsennergieträger ist die Pyrolyse. Hier kann durch Einflussnahme der Prozessparameter die Ausbeute an Öl und Koks gesteuert werden. So können Schwankungen in Qualität und Menge der Produkte auftreten. Die Literaturangaben schwanken für die möglichen Ölausbeuten stark bis hin zu 75%. Für die exergetische Betrachtung wurde von mittleren Werten ausgegangen, so dass sich ein Wirkungsgrad von 53% ergibt. Das so gewonnene Öl muss jedoch vor der Verwendung als Kraftstoff technisch aufwendig aufbereitet werden.

Bisher werden vor allem physikalisch – chemische Prozesse zur Gewinnung von flüssigen Kraftstoffen eingesetzt. Daneben steht die alkoholische Gärung mit ebenfalls hohen Wirkungsgraden technisch zur Verfügung. Die thermochemischen Prozesse zur Gewinnung von Kraftstoffen befinden sich noch in der Entwicklung. Während bei der Pyrolyse sich die Aufbereitung des Pyrolyseöls als schwierig darstellt ist bei der Vergasung mit anschließender Synthese die Bereitstellung eines geeigneten Synthesegases Schwerpunkt der Forschungsvorhaben.

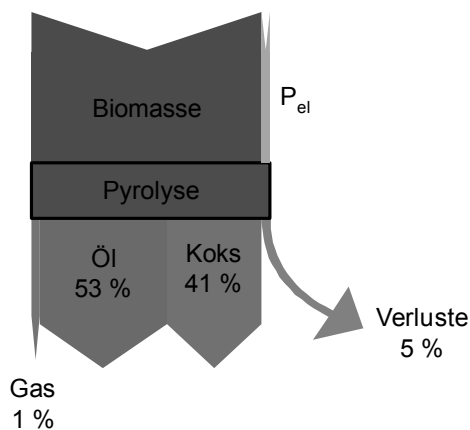


Abbildung 23: Exergieflussbild zur Pyrolyse

Bei einem Vergleich der Verfahren zur Bereitstellung flüssiger Energieträger untereinander muss beachtet werden, dass im unterschiedlichen Umfang energiereiche Nebenprodukte anfallen, die einer weiteren Nutzung zugeführt werden können. Das gilt besonders für den physikalisch-chemischen Weg, die Pyrolyse und mit Abstrichen für die Ethanolherzeugung.

3.1.2 Bereitstellung gasförmiger Gebrauchsennergieträger

Die Bereitstellung gasförmiger Gebrauchsennergieträger kann auf dem Weg der thermochemischen Vergasung oder durch die Vergärung von Biomasse zu Methangas erfolgen.

Die Wahl des Gärverfahrens, das heißt ob eine trockene oder nasse Fermentation erfolgt, hat, wie die Wahl des verwendeten Substrates, großen Einfluss auf die Effektivität einer solchen Konversionsanlage. So wird bei der trockenen Fermentation von Maissilage $0,46 \text{ m}^3 \text{ Biogas/kg oTS}$ gewonnen und beim nassen Verfahren hingegen $0,72 \text{ m}^3 \text{ Biogas/kg oTS}$. Wird zum Beispiel Rindermist vergoren, so ist der Unterschied zwischen den Biogausbeuten geringer beim trockenen Verfahren liegt diese bei rund $0,2$ und beim nassen Verfahren bei $0,24 \text{ m}^3/\text{kg oTS}$ [14]. Wobei die

Anlagengröße weiteren Einfluss auf den Wirkungsgrad hat. Bei durchschnittlichen Annahmen kann ein exergetischer Wirkungsgrad von rund 73% ermittelt werden.

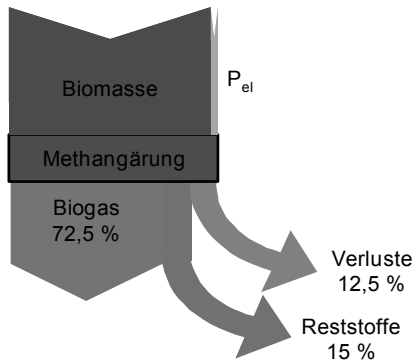


Abbildung 24: Exergiestromdiagramm Methangärung

Bei der thermochemischen Vergasung haben ebenfalls Anlagengröße, Wahl des Einsatzmaterials und Verfahrenstechnik entscheidenden Einfluss auf den Biomassenutzungsgrad. So sind bei Materialien mit hohem Wasser- und Aschegehalt nur geringe Wirkungsgrade zu erwarten. Bei den Technologien zur Vergasung können ebenfalls große Unterschiede auftreten, so haben einfache Festbettreaktoren in der Regel einen Wirkungsgrad um 50% und mehrstufige Verfahren oder großtechnische Wirbelschichtvergaser können Wirkungsgrade von 75% erzielen.

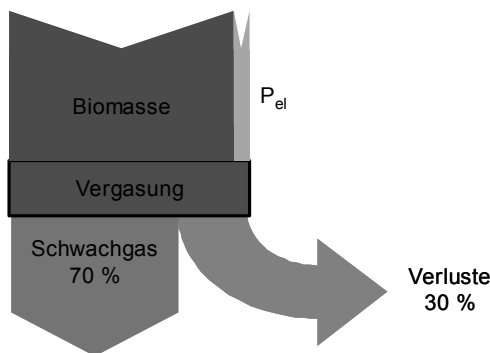


Abbildung 25: Exergiestromdiagramm zur thermochemischen Vergasung

Im Vergleich beider Konversionsverfahren wird deutlich, dass sie sich hinsichtlich der Effektivität unter normalen Bedingungen nur gering unterscheiden, so dass andere Einflussfaktoren entscheidender hinsichtlich des zu verwendenden Konversionsverfahrens sind. So sollten trockene oder biologisch schwer abbaubare Stoffe wie zum Beispiel lignosehaltige Substrate vorrangig in Vergasungsverfahren und feuchte, leicht abbaubare Stoffe wie Mist, Maissilage und Grünschnitt in Biogasanlagen energetisch genutzt werden. Bei Materialien bei denen in beiden Verfahren eine gute Umsetzung erreicht wird, kann für die Wahl des Bereitstellungsweges die Eigenschaften des erzeugten Gases ausschlaggebend sein. Auf Grund des höheren Heizwertes von Biogas erweist dieses sich als vorteilhaft, wenn eine kurzzeitige Speicherung des Gases zur Abdeckung von Verbraucherspitzen notwendig ist.

Tabelle 5: Eigenschaften gasförmiger Gebrauchsenergieträger

	Biogas	Schwachgas
Kohlenmonoxid in Vol.%	0	16,5
Kohlendioxid in Vol.%	35	13,5
Methan in Vol.%	63	4
Wasserstoff in Vol.%	< 1	12,5
Sauerstoff in Vol.%	< 2	0
Stickstoff in Vol.%	< 2	52
Heizwert in MJ/Nm³	22,5	4,5

3.1.3 Bereitstellung fester Gebrauchsenergieträger

Die Gewinnung eines festen Gebrauchsenergieträgers durch Konversion von Biomasse ist nur mit Hilfe der pyrolytische Zersetzung möglich. So kann bei diesem Verfahren neben Öl gleichzeitig Koks gewonnen werden. Dieser wird vor allem in Ländern der Dritten Welt energetisch genutzt. In Deutschland beschränkt sich die energetische Nutzung auf Grillkohle, ansonsten wird der erzeugte Koks stofflich zum Beispiel als Aktivkohle genutzt. Sollte die Pyrolyse in Zukunft stärker angewendet werden, wäre eine Mitverbrennung in effektiven Kraftwerken sinnvoll. In der Regel wird für diesen Prozess Holz als nachwachsender Rohstoff verwendet andere biogene Materialien finden bisher keine Verwendung für die Pyrolyse.

Der exergetische Wirkungsgrad bezogen auf die Koksgewinnung liegt bei herkömmlichen Pyrolyseverfahren bei 41%. Eine Steigerung bis auf rund 47% ist bei modernen Techniken, die auf Koksproduktion abzielen, möglich. Auf Grund der geringen Bedeutung der Gewinnung von Koks ist in diesem Zusammenhang das Pyrolyseverfahren energetisch nur sinnvoll anzuwenden, wenn es zur kombinierten Gewinnung von festen und flüssigen Energieträgern eingesetzt wird. In diesem Fall kann ein exergetischer Wirkungsgrad von 94% realisiert werden.

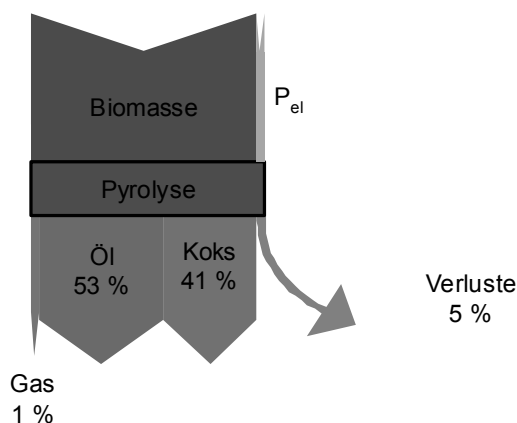


Abbildung 26: Exergiestrombild zur Bereitstellung des Pyrolyseprozesses

3.2 Verfahren zur Bereitstellung von Endenergien

Zur Nutzung von biogenen Gebrauchsenergieträgern stehen verschiedenste Möglichkeiten, die auf unterschiedliche Endenergien abzielen, zur Verfügung. So werden Verbrennungsmotoren einmal zum Einsatz von flüssigen Kraftstoffen im Kraftverkehr aber auch stationär in Form von BHKW eingesetzt. Eine Wertung dieser Einsatzmöglichkeiten wird durch die exergetische Analyse der Verfahren nicht gegeben. Flüssige biogene Energieträger sollten jedoch, soweit es technisch möglich ist, als Kraftstoffe verwendet werden, um somit auch auf diesem Sektor einen Beitrag zur Substitution von fossilen Brennstoffen zu realisieren. Feste und gasförmige Gebrauchsenergieträger, die als Kraftstoff nur schwer einsetzbar sind oder schlechtere Transport- und Speichereigenschaften aufweisen, sollten hingegen Einsatz in stationären Anlagen finden.

Bei der Verwendung von Verbrennungsmotoren unterscheidet man in Ottomotoren und Dieselmotoren. Der Ottomotor weist ein etwas geringeren Wirkungsgrad als der Dieselmotor auf. Auf Grund der starken Schwankungen der Wirkungsgrade der Motorentechniken in Abhängigkeit von Größe, Alter und Hersteller wird für die nachfolgende Betrachtung ein Mittelwert für beide Motorentechniken im stationären Betrieb sowie im Kraftfahrzeugbetrieb vereinfachend angenommen. Im stationären Betrieb von Verbrennungsmotoren in BHKWs kann man grundsätzlich davon ausgehen, dass gasförmige Energieträger in Ottogasmotoren verbrannt werden und flüssige Kraftstoffe in Dieselmotoren. Wobei hier die Zündstrahltechnik eine Ausnahme darstellt, bei der das biogene Brenngas mit der Verbrennungsluft zum Dieselmotorkraftstoff angesaugt werden kann. Hierdurch wird ein sicheres Zünden des Kraftstoffgemisches und ein stabiler Betrieb zur Gewinnung von elektrischer Energie gewährleistet.

Wird flüssiger Kraftstoff für den Betrieb von Kraftfahrzeugen verwendet, so werden nur geringe Wirkungsgrade erreicht, da die Motoren vor allem im Teillastbereich betrieben werden und damit geringere Effektivität aufweisen. Findet er hingegen Anwendung in einem stationären BHKW zur Kraft-Wärme-Kopplung so werden exergetische Wirkungsgrade, bei einer Wärmenutzungstemperatur von 70°C, von rund 45% erreicht.

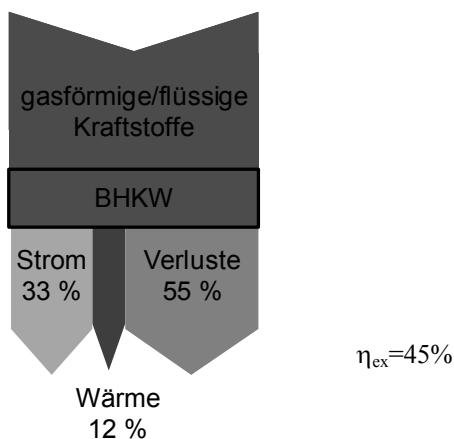


Abbildung 27: Einsatz von biogenen Kraftstoffen in BHKW

Entsprechend GL.2 hat das Temperaturnutzungslevel der Prozessabwärme einen entscheidenden Einfluss. Allen Berechnungen wurde eine Temperatur für Heizzwecke von 70°C zu Grunde gelegt.

Neben den Motoren mit innerer Verbrennung steht auch der Stirlingmotor als Antriebstechnologie zur Verfügung. Hier kann auf Grund des vorgeschalteten Verbrennungsprozess jede Art von Gebrauchsenergeträgern genutzt werden. Der Einsatz des Stirlingmotors beschränkt sich auf die stationäre Kraft-Wärme-Kopplung. Es gibt auch Bemühungen zur alternativen Antriebstechnik in Automobilen, doch fehlen die entscheidenden Vorteile gegenüber herkömmlicher Technik um eine Markteinführung zu realisieren. Ein Vorteil liegt in den deutlich niedrigeren Schadstoffemissionen [21]. Die beim Prozess anfallende Niedertemperaturwärme kann für übliche Heizzwecke auf einem Temperaturniveau von 70°C genutzt werden. So weist der innere Stirlingprozess durchschnittliche Stromentstehungsgrade von 32% bei modernen Bautechniken Wirkungsgrade bis hin zu 40% auf [21]. Unter Berücksichtigung des vorangeschalteten Verbrennungsprozesses und dass die notwendige Prozesswärme nur bis zu einem Temperaturniveau von 600°C für den Stirlingprozess nutzbar ist, reduziert sich der elektrische Wirkungsgrad auf ca. 10% [4]. So wird nur ein exergetischer Gesamtwirkungsgrad von 19,4% erzielt. Damit liegt der Stirlingmotor im Wirkungsgrad deutlich hinter den Otto- und Dieselmotoren.

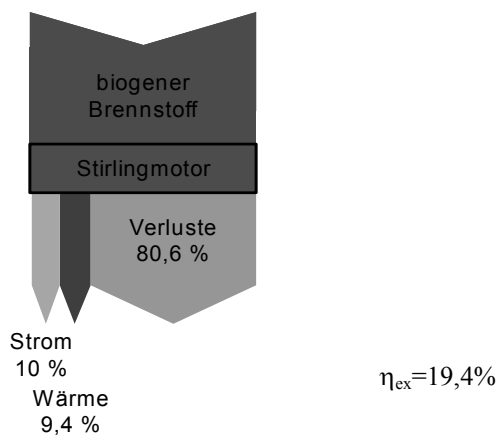


Abbildung 28: Exergieflossbild Stirlingmotor

Eine weitere Möglichkeit zur dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung ist der Einsatz von Brennstoffzellen, diese befinden sich jedoch noch in der Entwicklung und die Angaben zur Effektivität unterliegen großen Schwankungen. So können biogene Brenngase zur Zeit vor allem in Mittel- und Hochtemperatur Brennstoffzellen eingesetzt werden. Die dafür angegebenen elektrischen Wirkungsgrade reichen von 40% bis hin zu 65%. Schwer zu berücksichtigen sind auch die notwendigen Aufbereitungstechniken hinsichtlich Gasreinheit und Reformierung. Aus diesem Grund wird ein Mittelwert für die Anwendung in einer Hochtemperaturbrennstoffzelle zur exergetischen Bewertung angenommen. Unter Berücksichtigung der Nutzung der dabei anfallenden Abwärme ergibt sich ein Wirkungsgrad von 59%. Auch der Einsatz in Niedertemperatur Brennstoffzellen ist denkbar, hierfür sind jedoch noch größere Aufwendungen zur Konditionierung des Brennstoffes notwendig. Die anfallende Wärme kann nur auf einem Temperaturniveau von 50°C genutzt werden, so dass diese nur im dezentralen Bereich für Heizzwecke genutzt werden kann.

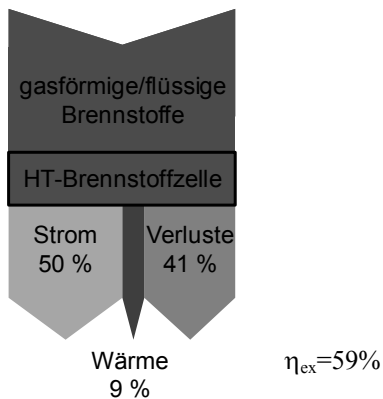


Abbildung 29: Exergieflossbild Brennstoffzelle

Der Dampfkraftprozess sowie die Gasturbine finden vor allem in großtechnischen Anlagen Anwendung. Während für die Gasturbine nur flüssige und gasförmige Energieträger geeignet sind, können im DKP auch feste Gebrauchsenergieträger Anwendung finden. Die erreichbaren exergetische Wirkungsgrade moderner Kraftwerke liegen bei rund 50%. Die höchste Effizienz wird in Kombination beider Verfahren beim GuD-Prozess erreicht.

Bisher sind vor allem Biomasseheizkraftwerke realisiert, die exergetische Wirkungsgrade von rund 40% erzielen.

Die Betrachtung von Mikrogasturbinen in kleineren dezentralen Anlagen wird nicht mit analysiert, da diese auf Grund des Entwicklungsstadiums kaum Anwendung in der Praxis finden. Es ist hierbei mit wesentlich geringeren Wirkungsgraden im Vergleich zu den 45% bei großtechnischen Turbinen bzw. im Vergleich zum BHKW zu rechnen.

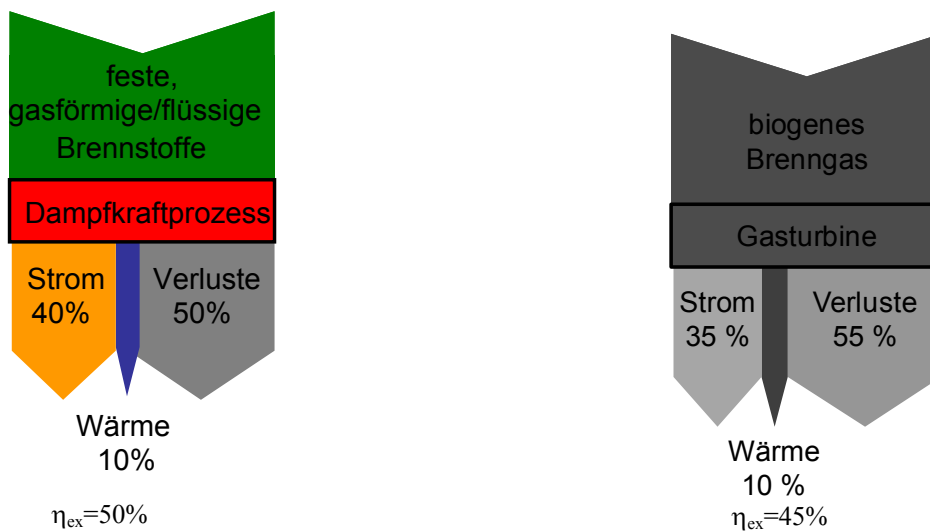


Abbildung 30: Exergieflossbild DKP und Gasturbine

Zur reinen Wärmebereitstellung steht natürlich der einfache Verbrennungsprozess zur Verfügung. In Abhängigkeit des hier eingesetzten Gebrauchsenenergieträgers, der Anlagengröße und der Verbrennungstechnik ergeben sich unterschiedliche Nutzungsgrade. Zum Vergleich wird ein mittlerer energetischer Wirkungsgrad von 90% angenommen, so dass der exergetische Wirkungsgrad bei 70°C Nutzungstemperatur 18% beträgt. Hier hat die bereits genannte Problematik des Heizwärmeniveaus den größten Einfluss. Erfolgt die Nutzung als Prozesswärme bei einer Temperatur von 120°C, so erhöht sich der Wirkungsgrad um 9,5% auf insgesamt 27,5%. Wird eine dezentrale Wärmeversorgung bei 50°C angestrebt sinkt der Wirkungsgrad auf rund 14% ab.

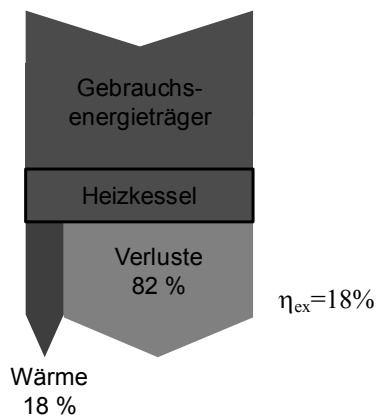


Abbildung 31: Exergetische Analyse eines Heizkessels

3.3 Darstellung gesamtheitlicher Nutzungswege

Um die vorangegangenen Betrachtungen hinsichtlich effektiver Nutzungswege zu vergleichen werden in Tabelle 6 und 7 die exergetischen Wirkungsgrade der einzelnen Prozesse nochmals zusammenfassend dargestellt. Zur Ermittlung der Effektivität möglicher Gesamtnutzungswege sind die Wirkungsgrade der Einzelprozesse entsprechend GL.3 miteinander zu multiplizieren.

$$\eta_{\text{System}} = \eta_{\text{Konversion}} * \eta_{\text{Nutzung}} \quad (\text{GL. 3})$$

Tabelle 6: Übersicht exergetische Wirkungsgrade der Konversionsverfahren

	feste	flüssige	gasförmige
	Gebrauchsenenergieträger		
Methangärung			72%
alkoholische Gärung (Zuckerrüben)		55%	
Vergasung			70%
Vergasung + Synthese		50%	
Pyrolyse	41%	53%	
kleintechnisches Fertigpressen (Raps)		45%	
großtechnische Pflanzenölgewinnung (Raps)		53%	

Tabelle 7: Übersicht exergetische Wirkungsgrade der Nutzungstechnologien

	feste	flüssige	Gasförmige
	Gebrauchsenergieträger		
Heizkessel	18%	18%	18%
BHKW		45%	45%
Stirlingmotor	19,4%	19,4%	19,4%
DKP	50%	50%	50%
Gasturbine		45%	45%
Brennstoffzelle		59%	59%

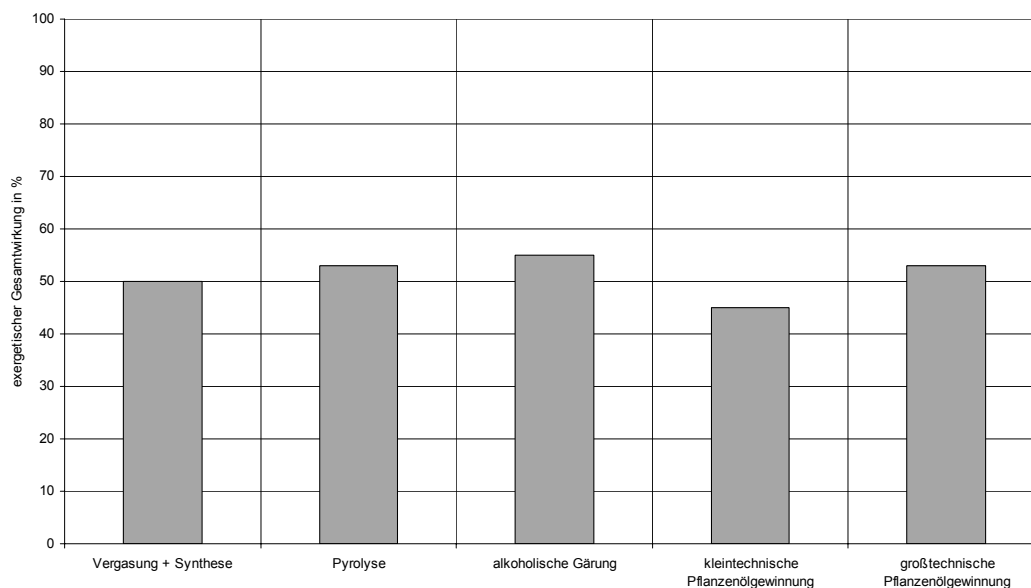


Abbildung 32: Exergetischer Wirkungsgrade bei der Bereitstellung flüssiger Gebrauchenergieträger

Die Gewinnung von Kraftstoffen für den Betrieb von mobilen Kraftfahrzeugen aus regenerativen Energieträgern gewinnt immer mehr an Bedeutung. Auf Grund der damit realisierbaren Unabhängigkeit vom fossilen Rohöl und dem flexiblen Einsatz durch gute Transport- und Speichereigenschaften sollten biogene Materialien die für ein effizientes Konversionsverfahren zur Kraftstoffbereitstellung geeignet sind auch darin Verwendung finden. In der Abb.32 werden die hierfür zur Verfügung stehenden Konversionsverfahren gegenüber gestellt. Die Ethanolgewinnung aus zuckerhaltigen Biomassen zeigt sich hier am effektivsten. Die physikalisch-chemischen Prozesse stehen in der Praxis bereits zur Verfügung und erreichen ebenfalls hohe exergetische Wirkungsgrade. Ölsaaten sollten daher vorrangig Verwendung in einer klein- oder großtechnischen Pflanzenölgewinnungsanlage finden. Für die Zielstellung, bis 2010 den Anteil regenerativer

Kraftstoffe auf 5,75% zu erhöhen, reichen die verfügbaren Einsatzmengen jedoch nicht aus, so dass die Gewinnung synthetischer Kraftstoffe über thermochemische Prozesse notwendig sein wird [17]. Hierfür sind hohe Aufwendungen zur Gasaufbereitung bei der Vergasung und zur Ölaufbereitung bei der Pyrolyse notwendig. Die exergetischen Aufwendungen für die Ölaufbereitung sind gegenwärtig nur schwer darstellbar.

Neben der flexiblen Verwendung in Kraftfahrzeugen ist auch der Einsatz in stationären Anlagen denkbar. Die Konversionsverfahren zur Bereitstellung von gasförmigen Energieträgern weisen im Vergleich jedoch wesentlich höhere Wirkungsgrade auf, so dass diese vorrangig zur Kraft-Wärme-Kopplung verwendet werden sollten. So kann bei der Anwendung von thermochemischen Prozessen die eingesetzte Biomasse beim Betrieb stationärer BHKW wesentlich effektiver eingesetzt werden als bei der Gewinnung von Kraftstoffen. Die guten Speicher- und Transporteigenschaften flüssiger Energieträger sollten daher ausgenutzt werden und für den Kraftstoffsektor verwendet werden.

Für den Betrieb in stationären dezentralen Anlagen zeigt der Einsatz von Brennstoffzellen den höchsten Wirkungsgrad, diese Technologie befindet sich jedoch noch im Entwicklungsstadium. Die Nutzung von Biomasse in stationären Anlagen ist aus bereits genannten Gründen insbesondere gasförmigen und festen Brennstoffen vorbehalten. Bei der Bereitstellung von Strom und Wärme weist der Einsatz von motorischen BHKWs die höchste Effizienz. Hier können über die Methangärung 32,6% und über die Vergasung von Biomasse 31,3% Gesamtwirkungsgrad erzielt werden. Auf Grund dieser annähernd gleichen Effektivität beider Verfahren ist die Eignung der spezifischen Eigenschaften der Biomassen entsprechend der Fruchtfolge maßgeblich. So sind schwer biologisch abbaubare lignosehaltige Substanzen zu vergasen, da hier höhere Wirkungsgrade erreicht werden als bei der Methangärung, und sehr feuchte, gut abbaubare Biomassen können in Biogasanlagen Anwendung finden.

In großtechnischen Anlagen zeigen Gasturbine und Dampfkraftprozess annähernd gleiche Wirkungsgrade. Die höchste Effizienz wird in Kombination beider Verfahren beim GuD-Prozess erreicht. Der reine Dampfkraftprozess hat jedoch den Vorteil, dass hier auch feste Biomasse, wie Holz, ohne vorangeschaltete Konversion zum Einsatz kommen kann.

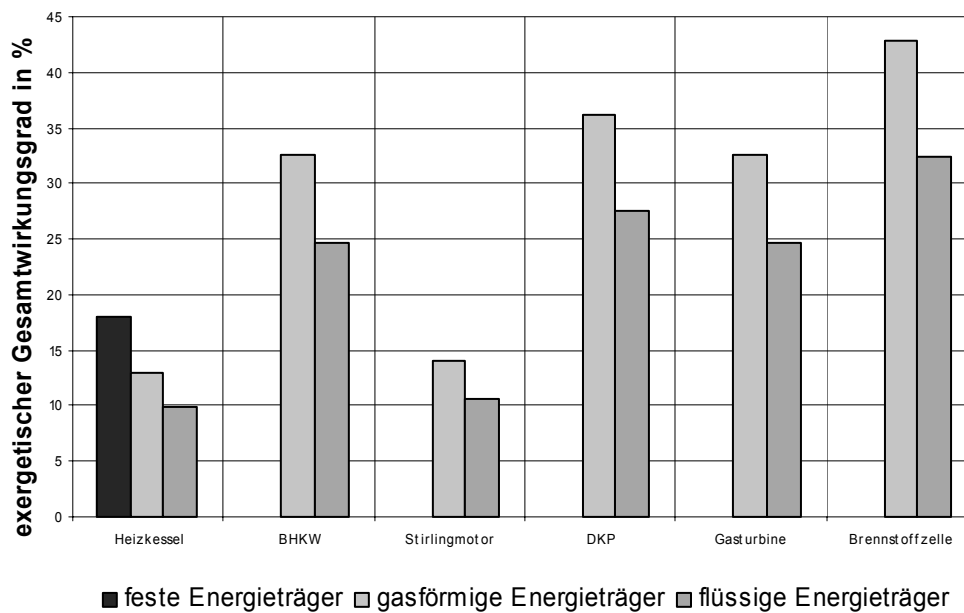


Abbildung 33: Wirkungsgrade für die Bereitstellung von Endenergie aus gasförmigen und flüssigen Gebrauchsenergieträgern am Beispiel von Biogas und Bioethanol

Neben der Betrachtung der einzelnen Bereitstellungswege sollte eine effektive Nutzung der gegebenen Biomassen realisiert werden. Vor allem in physikalisch-chemischen und biochemischen Konversionsprozessen wird das energetische Biomassepotential nicht vollständig ausgeschöpft. Hier kann eine Verkettung mehrerer Verfahren zur besseren Ausnutzung führen. So kann der in Ölmühlen anfallende Presskuchen weiteren Konversionswegen zugeführt werden und zur Erhöhung der exergetischen Ausbeute der verwendeten Biomasse beitragen. Dies wäre zum Beispiel möglich bei einer Vergasung und dezentralen Bereitstellung von Strom und Wärme. So sind die Nutzungsmöglichkeiten aller anfallenden Reststoffe bei den Konversionsverfahren zu berücksichtigen. Für den anfallenden Stoffstrom aus der Methangärung sowie den bei Pyrolyseprozessen entstandenen Koks ist eine thermochemische Vergasung mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung denkbar.

Bei der alkoholischen Vergärung ist wie in Abb.21 zu sehen ist, ein Anteil von 34% der Eingangsexergie in den Reststoffen enthalten. Mit Hilfe einer Methangärung und anschließender motorischer Verbrennung könnten diese zur Bereitstellung von Endenergien genutzt werden. Damit kann der Wirkungsgrad um weitere 11% auf 66% Gesamtwirkungsgrad der verwendeten Biomasse gesteigert werden.

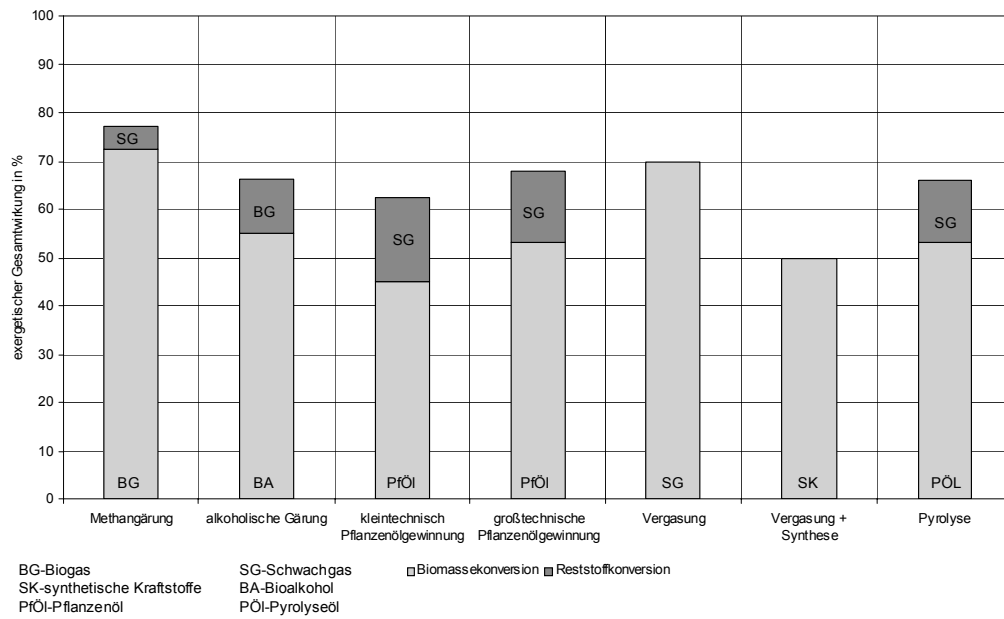


Abbildung 34: Wirkungsgrade der Konversionsverfahren unter Berücksichtigung der Reststoffverwertung

Durch die erheblichen Wirkungsgradsteigerungen bis hin zu 25% sollte eine energetische Weiterverwertung von Reststoffen angestrebt werden, um somit das vorhandene Biomassepotential optimal zu nutzen und die Substitution fossiler Brennstoffe zu erhöhen.

4 Spezifikation der Gebrauchs- und Nutzenergienträger

4.1 Verfügbarkeit und Versorgungsfähigkeit von Bioenergieträgern in Deutschland

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland lag im Jahr 2002 bei 14.305 PJ wovon ca. 3% durch erneuerbare Energien bereitgestellt wurden [2]. Dabei wird bereits über die Hälfte durch energetische Nutzung von Biomasse realisiert. Diese trägt dabei bis zu 92% zur Wärmebereitstellung bei und nur im geringen Maße zur Stromerzeugung. Die Abschätzung des nutzbaren Potentials an Biomasse ist auf Grund hoher Schwankungsbereiche in der Literatur nur schwer vorzunehmen. Man kann unter günstigen Rahmenbedingungen davon ausgehen, dass der Anteil am derzeitigen Primärenergieverbrauch durch die Nutzung aller biogener Brennstoffe auf 9% gesteigert werden kann. Damit würden allein durch Biomasse ca. 360 Mrd. kWh pro Jahr bereitgestellt. Eine Grundversorgung Deutschlands allein durch Biomassenutzung kann demnach nicht realisiert werden.

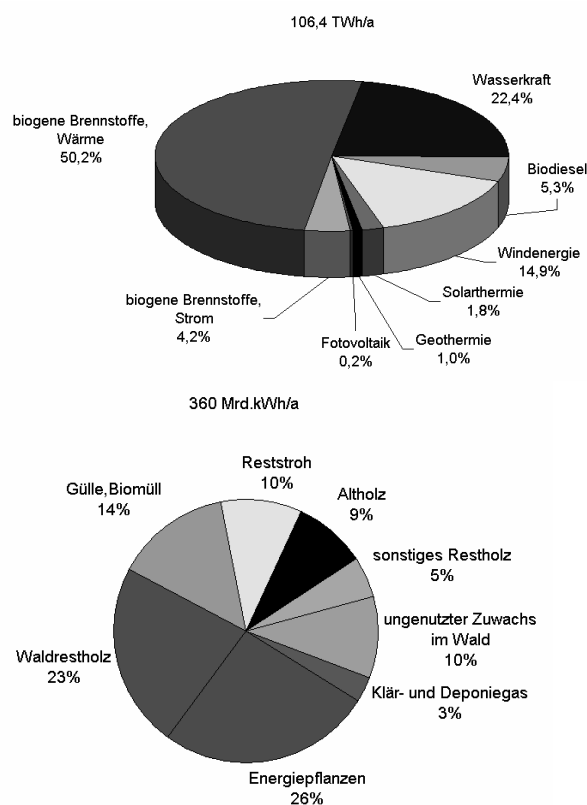


Abbildung 35: Energiebereitstellung und Potential der erneuerbaren Energien

Quelle: [2], [1]

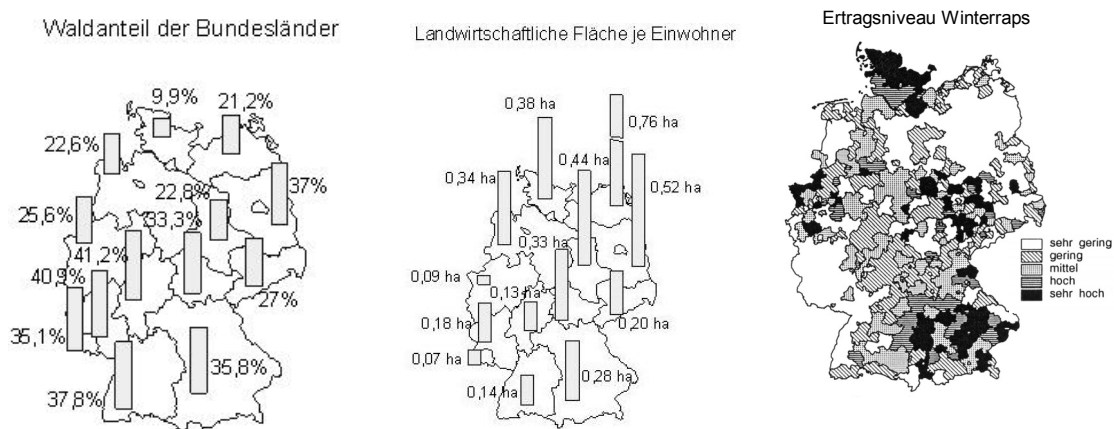
Das Biomassepotential ist dabei abhängig von den vorherrschenden standortspezifischen Faktoren, wie zum Beispiel Temperatur, Niederschlag, Bodenqualität und landwirtschaftliche Nutzfläche. Für die Beurteilung der Verfügbarkeit ist vorrangig der jahreszeitliche Rhythmus an Biomassezuwachs unter den Aspekten der Fruchtfolge ausschlaggebend. Dieser ist in Abhängigkeit der Aussaat, Vegetationszeit, Ernte und Lagerfähigkeit zu sehen. So können lagerfähige Substanzen wie Holz unabhängig vom Erntezeitpunkt ganzjährig zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehen. Bei anderen Biomassen, wie Zuckerrüben, wo sich der Energiegehalt bei länger Lagerung verringert und damit die energetische Ausbeute über die Zeit sinkt müssen saisonal entsprechend der Ernte verarbeitet werden. Dies führt zu saisonal betriebenen Konversionsanlagen wodurch über die Gewinnung von lagerfähigen Gebrauchsenergieträgern, wie Biodiesel oder Ethanol, wieder eine ganzjährige Bereitstellung gesichert wird.

4.2 Verfügbarkeit und Versorgungsfähigkeit von Bioenergieträgern in Brandenburg

Neben dieser prinzipiellen Potentialabschätzung für Deutschland stellen sich die Situationen in den einzelnen Bundesländern auf Grund der verschiedenen Vegetationsfaktoren und der zur Verfügung stehenden land- und forstwirtschaftlichen Fläche unterschiedlich dar. So beeinflussen Temperatur, Sonneneinstrahlung, Niederschlagsmenge und Bodengüte den Ertrag von Energiepflanzen. In Brandenburg fällt auf Grund sandiger Böden und der geringeren Niederschlagsmengen der durchschnittliche Ertrag von Energiepflanzen, wie Weizen und Raps, geringer aus als zum Beispiel in Schleswig-Holstein. In Brandenburg werden durchschnittlich 29,3 dt/ha Winterraps geerntet, dies entspricht rund 85% der Ernte auf Ackerflächen hoher Bodenqualität.

Abbildung 36: Einflussparameter auf das lokale Biomassepotential

Quelle: [3],[4]



Im Land Brandenburg wurden auf rund 3,8% der landwirtschaftlichen Nutzfläche Energiepflanzen angebaut. Dominierend sind dabei vor allem die Ölsaaten, da diese für den Einsatz in großtechnischen Biodieselanlagen im gesamten Bundesgebiet geeignet sind. Die für Brandenburg erzielbaren durchschnittlichen Erträge für Energiepflanzen sowie der Vergleich zum Bundesdurchschnitt sind in Abb.37 dargestellt.

Tabelle 8: Anbau nachwachsender Rohstoffe im Land Brandenburg

Kulturen	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Anbau auf stillgelegten Flächen¹⁾	14.175	37.862	30.713	20.034	22.034	19.950
Ölein	74	170	258	64	14	62
00-Raps	7.349	23.162	17.956	13.486	14.247	12.759
Erucaraps	5.956	12.335	10.618	6.638	7.426	5.690
Sonnenblumen	787	2.142	1.880	1.827	1.786	1.410
Sonnenhut	0	0	0	0	0	0
Johanniskraut	0	5	0	0	0	0
Bitterlupinen	0	39	0	0	0	0
Schnellwachsende Gehölze	9	9	1	1	1	1
Pestwurz	0	0	0	19	25	29
Anbau auf übrigem Ackerland²⁾	42.205	55.349	38.280	21.662	21.843	19.347
Stärkekartoffeln	8.155	7.826	8.729	8.026	7.590	6.913
Ölein ³⁾	29.023	42.339	23.985	5.773	1.621	6.674
Hanf	677	789	617	280	265	297
Flachs	338	264	157	0	0	0
Erucaraps	4.007	4.114	4.768	7.558	12.357	5.463
Nachtkerze ³⁾	3	12	22	19	6	13
Färberpflanzen ³⁾	2	5	2	6	4	8
Anbau insgesamt	56.385	93.228	69.017	43.696	45.342	39.297

¹⁾ Quelle: BLE

²⁾ Quelle: Flächennachweis Agrarförderung

³⁾ Quelle: Erzeugerbetriebe

Quelle: [23]

	Ertrag in dt/ha
Triticale	50,5
Roggen	43,4
Winterweizen	60
Sommerweizen	41,1
Körnermais + CCM	72,5
Winterraps	29,3
Sonnenblumenkerne	19,3
Zuckerrüben	464,3
Kartoffeln	287,2

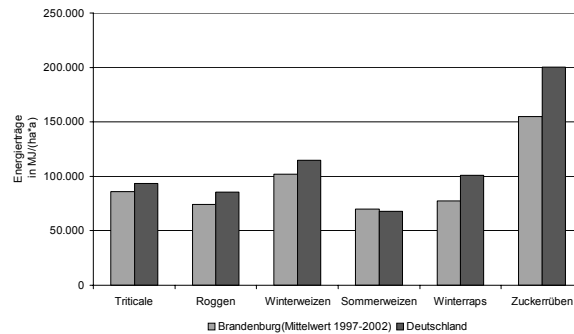


Abbildung 37: Durchschnittliche Erträge in Brandenburg und Deutschland

Neben nutzbaren Wald- und Ackerfläche hat die Struktur der Tierhaltung ebenfalls Einfluss auf das lokal vorhandene Biomassepotential. Dies wird in Abb.38 für die brandenburgischen Landkreise Barnim und Uckermark deutlich. Bei einem durchschnittlichen Pro-Kopf-Energieverbrauch können im Landkreis Barnim ca. 4,8% und in der Uckermark 17,8% des Primärenergiebedarfes durch energetische Nutzung von Biomasse gedeckt werden. Bisher liegt der Beitrag erneuerbarer Energien in beiden Regionen unter 2% [19].

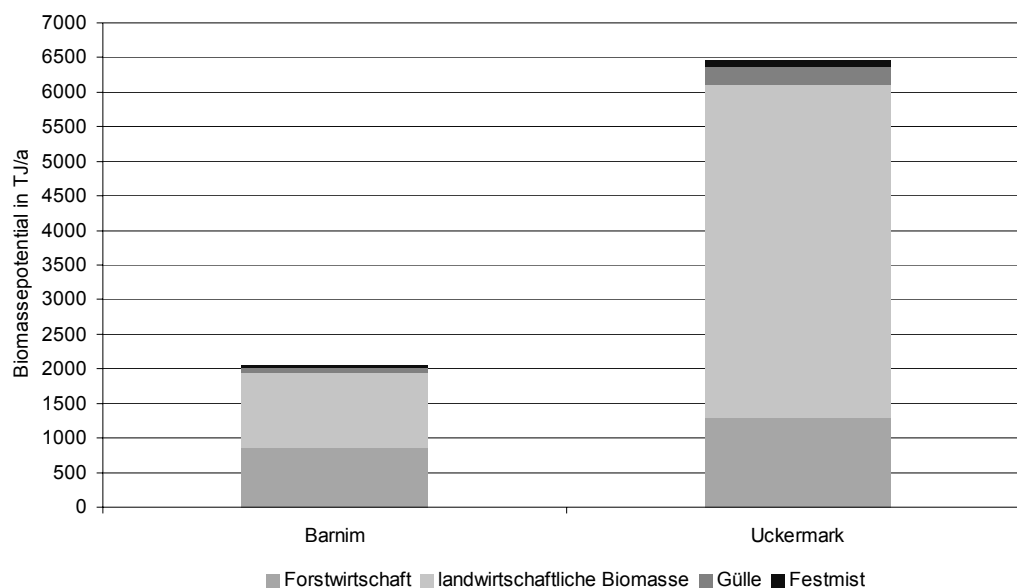


Abbildung 38: Biomassepotential für die Landkreise Barnim und Uckermark

Quelle: [19]

4.3 Speicherfähigkeit der Bioenergieträger

Die Speicherung bzw. Lagerung von Bioenergieträgern ist notwendig, da Energiepflanzen und landwirtschaftliche Reststoffe wie Stroh in einem bestimmten Zeitraum anfallen zur energetischen Nutzung jedoch ganzjährig in der Heizperiode benötigt werden. Landwirtschaftliche Reststoff wie Gülle oder Mist fallen hingegen kontinuierlich an, so dass hierfür in der Regel nur in einem sehr kurzen Zeitraum eine Lagerung notwendig ist.

Tabelle 9: Lagereigenschaften von Energiepflanzen

	Wassergehalt in %	Schüttdichte in kg/m ³	Energiedichte in kWh/m ³
Frisch geerntetes Scheitholz	45	750	1.800
frisch geerntete Holzhackschnitzel	40	400	1.100
Nadelholz Meterscheite	15	334	1.350
Nadelholz Hackschnitzel	15	195	800
Holzpellets	12	600	2.550
Stroh Rundballen	15	104	420
Stroh Häckselgut	15	59	240
Getreide-GP Rundballen	15	144	600
Zuckerrübe	77	650	670
Grünschnitt	70	500	520

Die Speicherfähigkeit ist in Abhängigkeit der Stoffeigenschaften und Lagerbedingung für die einzelnen Biomassen stark unterschiedlich. Grundsätzlich finden bei jeder Lagerung von organischen Substanzen Abbauvorgänge statt. Diese erfolgen im unterschiedlichen Maße abhängig von

Temperatur, Wassergehalt der Biomasse und Lagerdauer. Neben der Reduzierung der Trockenmasse und damit des Energiegehaltes ist unter Umständen auch die Problematik der Selbstentzündung insbesondere bei Stroh oder Hackschnitzel zu berücksichtigen.

Die Lagerung von Holz ist in Form von Stammholz einfacher und kostengünstiger, da hier geringere Lagerfläche benötigt werden, keine Gefahr der Selbstentzündung besteht und der Substratabbau mit 1–3% pro Jahr geringer als bei der Lagerung von Hackgut ist [4]. Die Aufarbeitung zu Pellets verbessert die Lagerfähigkeit des Brennstoffes erheblich ist aber auch mit zusätzlichen energetischen Aufwendungen und Investitionen verbunden.

Auf Grund der in der Landwirtschaft bereits vorhandenen Technik sollte Stroh zu Ballen gepresst werden, da die Schüttdichte doppelt so hoch ist, damit die Lagerflächen kleiner sind und ein besseres Handling gegeben ist. Bei der Speicherung von Ganzpflanzen bietet sich ebenfalls die Pressung zu Ballen an. Dabei gehen jedoch ca. 10% der Getreidekörner verloren und können nicht energetisch genutzt werden [5].

Bei diesen relativ trockenen lignose- und cellulosehaltigen Biomassen sind die Substratverluste nicht so ausschlaggebend wie bei zuckerhaltigen Rohstoffen. Der wertschöpfende Gehalt an Zucker wird bei der Lagerung von der Pflanze schnell zu Kohlendioxid veratmet, so dass bei geernteten Zuckerrüben der Zuckergehalt pro Tag um 200g/t absinken kann [4]. Aus diesem Grund werden Zuckerrüben im Vergleich zu allen anderen energetisch nutzbaren Materialien ausschließlich saisonal zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehen.

4.4 Transport- und Speicherfähigkeit der Gebrauchsenergien

4.4.1 Flüssige Gebrauchsenergieträger

Kraftstoffe aus der biochemischen und physikalisch-chemischen Umwandlung sowie synthetische Kraftstoffe aus der Fischer-Tropsch-Synthese können wie herkömmliche Kraftstoffe in Tanks gelagert und transportiert werden.

Ethanol wird bisher den üblichen Ottokraftstoff beigemischt und über das normale Tankstellensystem zur Verfügung gestellt.

Biodiesel ist bisher der einzig flächendeckende verfügbare regenerative Kraftstoff und wird an ca. 1800 öffentlichen Tankstellen angeboten [7].

Der bei der Methanolsynthese erzeugte flüssige Kraftstoff Methanol kann auf Grund seiner Giftigkeit, seines Dampfdruckes und der korrosiven Eigenschaften nicht über die herkömmlichen Versorgungsstrukturen vertrieben werden. Hierfür müssen spezielle Lagertanks und Transportfahrzeuge verwendet werden.

Prinzipiell stellen flüssige Kraftstoffe einen gut lager- und transportfähigen Energieträger dar, der flexibel einsetzbar ist und nicht am Entstehungsort verwendet werden muss.

4.4.2 Feste Gebrauchsenergieträger

Für biogene Materialien, die unbehandelt, getrocknet oder durch rein physikalische Prozesse vorbehandelt sind und anschließend einer direkten thermischen Nutzung zugeführt werden gelten die gleichen Lagerbedingungen wie im Kapitel 4.1 beschrieben wurden. So ist die mögliche Lagerdauer von Wassergehalt des Materials, von der Lagertemperatur und der Lagerart abhängig.

Der Transport solcher Biomassen ist äquivalent zur Lagerfläche zusehen, je kleiner die Energiedichte bzw. Schüttungsdichte desto größer sind die Aufwendungen. Aus diesem Grund erfolgt der Transport vom Entstehungsort hin zur energetischen Nutzung bei Stroh und Ganzpflanzen in Form von gepressten Ballen. Der Transport von geernteten Getreidekörnern, Rapssaat oder von in Pellets gepressten Materialien kann hingegen effizienter mit Pumpfahrzeugen erfolgen.

Prinzipiell ist also der Transport fester Energieträger vom Gestehtungsort zum Einsatzort unproblematisch. Auf Grund der zumeist geringen Energiedichte können lange Transportwege und damit entstehende Kosten allerdings entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Biomassenutzung haben.

4.4.3 Gasförmige Gebrauchsenergieträger

Das bei der Methangärung erzeugte Biogas hat nur etwa die Hälfte des Energiegehaltes von Erdgas und das bei der Vergasung mit Luft erzeugte Schwachgas kann gar nur ein zehntel des Energiegehaltes besitzen. Auf Grund dieser geringen Energiedichte ist eine langfristige Speicherung und der Transport im Vergleich zu flüssigen und festen Gebrauchsenergieträgern durch die notwendigen hohen finanziellen Aufwendungen kaum darstellbar.

Bei Biogasanlage wird meist vor Ort ein Speicher installiert mit dem Tagesspitzen in der Energieversorgung ausgeglichen werden können. Dafür können sogenannte Foliengasspeicher oder Nassgasometer mit Glocke eingesetzt werden. Biogas kann bei entsprechender Reinheit auch auf 200 bar komprimiert werden und in Flaschen gespeichert und transportiert werden. Damit kann es ebenfalls ortsunabhängig zum Beispiel in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden.

Hohe Reinheitsanforderungen und die Abtrennung des Kohlendioxids sind erforderlich, wenn Methangas in das vorhandene Erdgasnetz eingeleitet werden soll. Damit würde dieser regenerative Energieträger ortsunabhängig vom Entstehungsort einsetzbar werden. Die Abtrennung des Kohlendioxids ist jedoch weder versorgungstechnisch noch aus Sicht der Effizienz notwendig. Auf Grund bisher fehlenden gesetzlicher Rahmenbedingungen und Netzanbindungen ist eine Einspeisung in Deutschland jedoch gegenwärtig nicht gegeben [8].

Das bei der Vergasung entstehende Schwachgas erfordert zur Speicherung auf Grund des noch niedrigeren Energiegehaltes von ca. 1,5 kWh/m³ noch größere Speichervolumen und damit verbundene finanzielle Aufwendungen. Daher findet in diesem Fall nur eine Speicherung in der Vergasungsanlage statt, um eventuelle Schwankungen in der Gasbereitstellung für wenige Minuten überbrücken zu können.

4.5 Speicherfähigkeit und Einspeisemöglichkeiten von Endenergien

Die komplexe Bereitstellung von mechanischer Energie, Wärme und Kälte ermöglicht eine effektive Ausnutzung des vorhandenen Biomassepotentials. Dabei ist die Gewinnung von Wärme und Kälte nur sinnvoll, wenn hierfür eine Verwendung am Ort der Konversionsanlage vorliegt. Die Speicherung ist in der Regel ökonomisch nur im geringen Maße möglich zum Überbrücken von Verbrauchsspitzen. Für diese kurzzeitige Wärme- bzw. Kälte-Speicherung werden großvolumige Pufferspeicher mit einem Trägermedium, in der Regel Wasser, eingesetzt. Dabei wird das Medium zu Zeiten geringen Bedarfs erhitzt und bei steigendem Heizbedarf wieder abgekühlt. Langzeitspeicher für Zeiträume von Wochen oder Monaten werden selten realisiert. Hierfür werden große Wassermengen im Untergrund oder in Speicherseen erwärmt. Weiterhin besteht die Möglichkeit neben der fühlbaren Wärme die latente Wärme beim Phasenwechsel flüssig-dampf oder fest-flüssig zu speichern. Bei fest-flüssig Latentwärmespeichern können in Abhängigkeit des Trägermediums unterschiedliche Speichertemperaturen realisiert werden. So liegt die Schmelztemperatur von Wasser bei 0°C für Natrium bei 98°C und bei Salzen sind Temperaturen von rund 800°C möglich. Bei der Einspeicherung der Wärme schmilzt das Medium und bei der Energieauskopplung erstarrt es wiederum. Die Speicherung von Kälte ist äquivalent dazu möglich.

Für die Einspeisung in Wärmenetze werden unterschiedliche Anforderungen gestellt. In Fernwärmenetzen wird Wasser unter Druck bei Temperaturen von 100 bis 180°C und in Nahwärmenetzen werden Vorlauftemperaturen von 80°C bei Atmosphärendruck verwendet. Die Einspeisung in Fernwärmenetze ist auf Grund der fehlenden Netzanbindungen und gesetzlicher Regelung nur schwer möglich. Insbesondere im Hinblick auf die Tatsache, dass die Biomassenutzungsanlagen eher im ländlichen Raum und im kleineren bis mittleren Leistungsbereich angesiedelt sind und die Versorgung mit Fernwärme von Haushalten nur in dicht besiedelten Stadtgebieten erfolgt. Aus diesem Grund werden Wärme und Kälte in der Regel für lokale Heiz- und Kühlzwecke verwendet.

Bei der Bereitstellung von mechanischer Energie zu Strom hingegen ermöglicht das dicht ausgebaute Stromnetz und die gesetzlichen Regelungen insbesondere das EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) die Einspeisung. Ein Zweck des EEG ist es, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis 2010 auf mindestens 12,5% und bis 2020 auf mindestens 20% zu erhöhen. Stromnetzbetreiber werden darin verpflichtet Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien an ihr Netz anzubinden und entsprechend zu vergüten [10]. Diese gesetzlich festgelegten Vergütungen für Biomassenutzung richten sich nach Baujahr und Größe der Anlage. Ein Überblick der zu gewährenden Vergütungen ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Vergütung für Stromgewinnung aus Biomasse in Cent/kWh

	bis 150 kW _{el}	bis 500 kW _{el}	bis 5 MW _{el}	über 5 MW _{el}
Grundvergütung	11,5	9,9	8,9	8,4
NawaRo-Bonus	6	6	4	-
KWK-Bonus	2	2	2	2
Technologie-Bonus	2	2	2	-

Quelle: [11]

Ausgehend von einer größenabhängigen Grundvergütung, die für das Jahr der Inbetriebnahme festgesetzt wird und ausgehend von 2005 jährlich um 1,5% sinkt, können weitere Zahlungen erfolgen.

Für die energetisch effektive Kraft-Wärme-Kopplung wird ein weiterer Bonus von 2 Cent/kWh gewährt. Außerdem sollen neue innovative sowie effektive Verfahren gefördert werden, bei deren Anwendung ein Technologiebonus von weiteren 2 Cent/kWh gezahlt wird. Dieser Bonus wird gewährt, wenn als Konversionsverfahren zum Beispiel die thermochemische Vergasung oder die Trockenfermentation angewendet wird, weiterhin, wenn Biogas auf Erdgasqualität aufbereitet wird und zur Stromerzeugung verwendet wird sowie wenn zur Bereitstellung von Strom zum Beispiel Stirlingmotor oder Brennstoffzellen eingesetzt werden [11]. Damit wird der Anreiz geschaffen innovative Techniken einzusetzen bei denen zu Beginn der Markteinführung meist höhere Investitionskosten anfallen. Ein weiterer Bonus zur Stromvergütung wird gewährt, wenn nachwachsende Rohstoffe verwendet werden. Beispiele für Substrate die dieses Kriterium erfüllen sind in Tabelle 11 zu sehen.

Tabelle 11: Einsatzstoffe und deren Berechtigung zum Bezug des NawaRo-Bonus

	Positiv	Negativ
Pflanzen und Pflanzenbestandteile	Ganzpflanzen, die keine weitere Bestimmung als die Verwertung in einer Biomasseanlage haben Ackerfütterpflanzen, Getreide, Ölpflanzen, Rüben, Rübenblätter, Stroh, Körner, Kartoffelkraut, Knollen	Ganzpflanzen, die eine weitere Bestimmung als die Verwertung in einer Biomasseanlage haben aussortierte Getreidepartien, Presskuchen, Rübenschnitzel, Gemüseabputz
Schlempe	aus landwirtschaftlichen Brennereien	aus nicht landwirtschaftlichen Brennereien und Bioethanolanlagen
Kot und Harn	von Nutztieren (Rinder, Schweine, Geflügel...)	von Heimtieren (Pferde), Zoo- und Zirkustieren

Quelle: [11], [12]

Mit der gesetzlich geregelten Zwangsanbindung der Netzbetreiber und der lukrativen Stromvergütungen wird eine Ausschöpfung des landwirtschaftlichen Potentials zur Energiegewinnung und somit eine ortsunabhängige Verwendung bereitgestellter Endenergie ermöglicht. In dezentralen Anlagen bedeutet dies also, dass nicht der Elektroenergie Verbrauch des Landwirtes bzw. Anlagenbetreibers für die Größe der Anlage ausschlaggebend ist sondern das vorhandene Biomasseaufkommen. Damit wird nicht nur dezentral die Substitution von fossilen Brennstoffen durch höhere Ausschöpfung des Biomassepotentials erneuerbare Energien gefördert. Auf Grund vorangegangener Gründe wird eine Speicherung elektrischer Energie in der Regel nicht angewendet.

4.6 Charakterisierung des ländlichen Nutzenergiebedarfes

In der Landwirtschaft werden rund 2% des Primärenergiebedarfs Deutschlands also rund 286 PJ/a verbraucht. Wie sich dies in den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben darstellt, hängt sowohl von der bewirtschafteten Ackerfläche als auch davon ab, ob und welche Art der Tierhaltung erfolgt.

Der Hauptverbrauch flüssiger Gebrauchsenergieträger entsteht beim Ackerbau. In Abhängigkeit vom Anbauverfahren, Größe der Anbaufläche und Art der angepflanzten Frucht ergeben sich unterschiedliche Aufwendungen. So verursacht ökologischer Anbau in der Regel 5–40% höhere Kraftstoffverbräuche als herkömmliche Anbauverfahren. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmender Anbaufläche der Verbrauch je angebauten Hektar sinkt. Entscheidend ist vor

allem welche Frucht angebaut wird. So kann bei Getreide von einem durchschnittlichen Verbrauch von rund 85 l/ha pro Jahr ausgegangen werden wogegen bei arbeitsintensiven Pflanzen wie Kartoffeln, Zuckerrüben oder Futterrüben der Kraftstoffverbrauch deutlich höher bei rund 125 l/ha liegt. Eine solche Gegenüberstellung ist in Abb.39 gegeben.

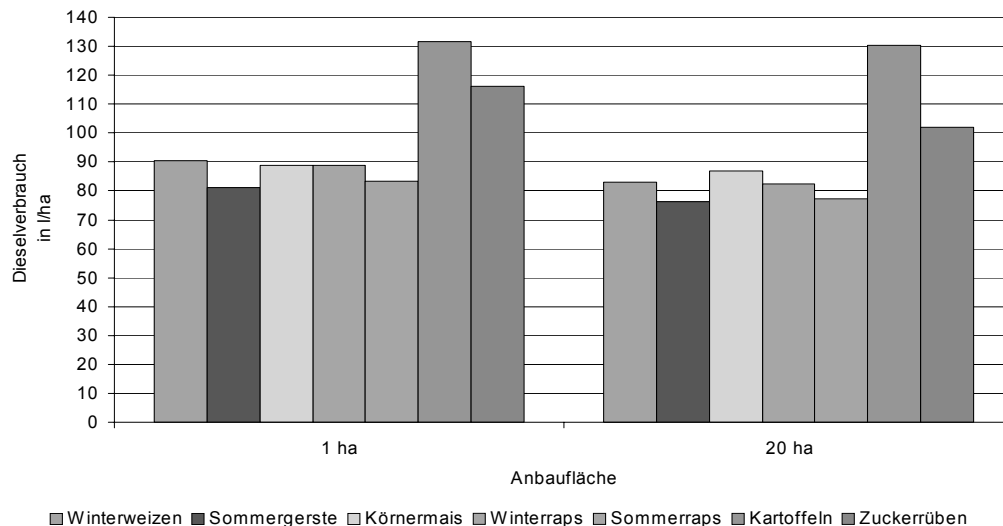


Abbildung 39: Kraftstoffverbrauch (Anbauverfahren: Pflug, Saatbettkombination)

Quelle: [20]

Die notwendigen Energieaufwendungen für Sozial- und Verwaltungsgebäude sowie der Warmwasseraufbereitung unterliegt entsprechend den örtlichen Gegebenheiten großen Schwankungen. Überschlägig kann dieser Bedarf in Abhängigkeit der Betriebsgröße abgeschätzt werden. Entsprechend der „Betriebsplanung für Landwirtschaft“ [20] kann der Energiebedarf bei Unternehmen mit Tierbesatz und einem angenommenen Energiepreis von 0,15 €/kWh bei einer Ackerfläche von rund 500 ha von ca. 20 kWh/(ha*a) und bei größeren Betrieben mit 1.000 ha bewirtschafteter Fläche von rund 16 kWh/(ha*a) ermittelt werden.

Im Land Brandenburg werden rund 50% der Ackerfläche von nur 5,6% der landwirtschaftlichen Betriebe bewirtschaftet [23]. Für einen derartigen Großbetrieb mit einer Ackerfläche von 1000 ha, wie sie vor allem in Nord- und Ostdeutschland vorkommen, soll nachfolgend eine Abschätzung des jährlichen Energiebedarfes erfolgen. Um die Tierproduktion mit darzustellen wird von einem Viehbestand von 1000 Milchkühen ausgegangen. Hierfür fallen relativ hohe Energiekosten insbesondere für Milchkühlung im Bereich von 12,5 bis 25 € je Tier und Jahr an. Unter der Annahme eines Preises von 0,15 €/kWh ergeben sich Energieverbräuche von 83 bis 167 kWh je Tier und Jahr. Für 1000 Milchkühe würde sich demnach ein durchschnittlicher Jahresverbrauch von 125.000 kWh ergeben. Für die Energieversorgung der Gebäude werden bei dieser Betriebsgröße weiter 16.000 kWh benötigt, so dass der Gesamtenergiebedarf 141.000 kWh pro Jahr beträgt. Der Bedarf an flüssigen Kraftstoffen kann mit einem mittleren Dieserverbrauch von 95l/ha auf rund 95.000 Liter pro Jahr bestimmt werden. Bei einem Energieertrag in Brandenburg von 77.645 MJ/(ha*a) für Raps sind rund 9,6% der Anbaufläche für die Bereitstellung des Eigenbedarfs an flüssigen Kraftstoffen notwendig. Dabei wurde eine kleintechnische Fertigpresse zur Gewinnung von Rapsöl zu Grunde gelegt.

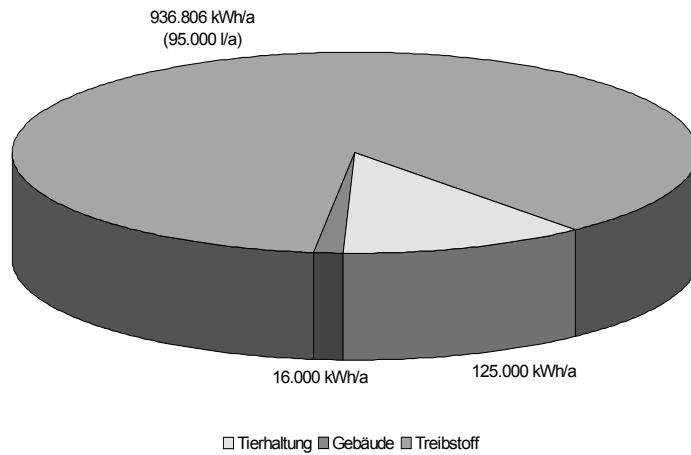


Abbildung 40: Jährlicher Energiebedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes mit 1000 ha und Tierbesatz

Um eine Abschätzung vorzunehmen, ob eine Versorgung der ländlichen Bevölkerung mit flüssigen Energieträgern im Einzugsbereich dieses 1.000 Hektar-Betrieb gegeben ist, werden folgende Annahmen getroffen. Im Landkreis Barnim und Uckermark leben 318.097 Einwohner davon nur ca. 50% der Bevölkerung auf dem Land. Es wird angenommen, dass durchschnittlich vier Personen in einem Haushalt leben und pro Haushalt zwei PKW betrieben werden. Bei einer durchschnittlichen Laufleistung von 15.000 km und einem Verbrauch von 8l je 100 km werden rund 95,43 Mio. Liter flüssiger Kraftstoff benötigt. Um diese bereitzustellen werden 408 km² Rapsanbaufläche benötigt. Das entspricht rund 50% der zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche von 2.465 km² in beiden Landkreisen. Insgesamt würde dieser landwirtschaftliche Betrieb mit dem Anbau von Raps auf rund 60% seiner Anbaufläche seinen eigenen und den Bedarf an flüssigen Kraftstoff im ländlichen Raum decken können. Beim Anbau von Zuckerrüben mit durchschnittlichem Ertrag von 170 GJ/(ha*a) in Brandenburg und anschließender Ethanolgewinnung würde nur eine Anbaufläche von rund 19% für den Eigenbedarf an flüssigen Kraftstoffen des Unternehmens und der Landbevölkerung notwendig sein. Damit würden auch die Aspekte der Fruchtfolge gewährleistet bleiben.

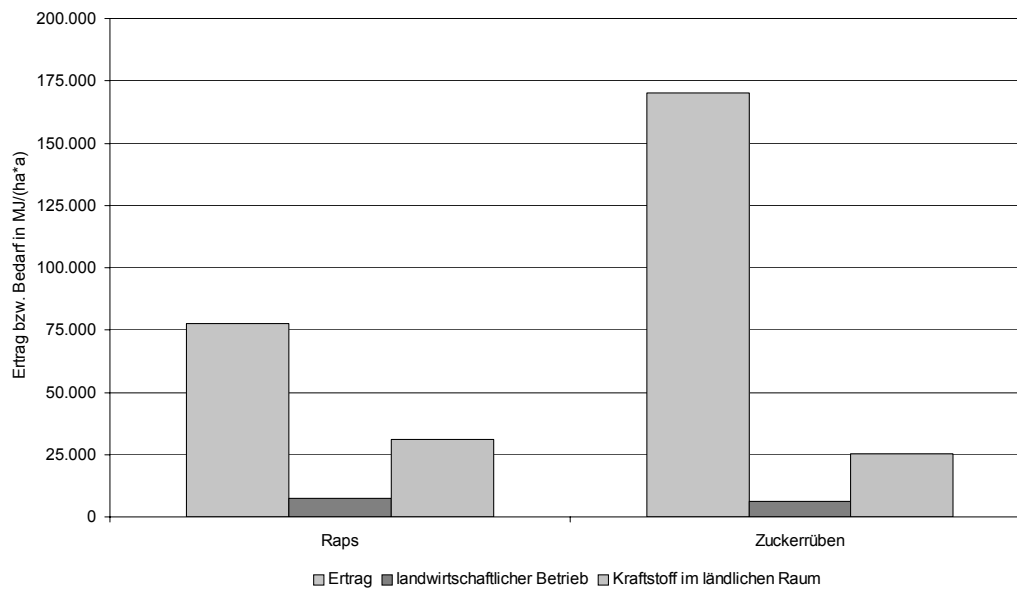


Abbildung 41: Energieertrag bzw. Bedarf zur Bereitstellung flüssiger Kraftstoffe

Neben der Bereitstellung von Kraftstoffen kann in gleicher Weise die Abschätzung der Versorgung mit Heizwärme und Elektroenergie erfolgen. Zur effektiven Nutzung des Biomassepotentials wird eine Kraft-Wärme-Kopplung vorausgesetzt. Bei einer durchschnittlichen installierten Heizleistung von 20 kW pro Haushalt ergibt sich in Verbindung mit der landwirtschaftlichen Nutzfläche ein notwendiger Energieertrag von 100 GJ/(ha*a). Es muss weiterhin der Wirkungsgrad des Konversionsprozesses mit rund 70% und der Wärmenutzung mit ca. 60% bei der Kraft-Wärme-Kopplung berücksichtigt werden. Demnach müsste ein Energieertrag an Biomasse von 240 GJ/(ha*a) gewährleistet werden. Dies würde bedeuten, dass eine Anlage oder mehrere Kleinanlagen mit einer thermischen Gesamteintrittsleistung von 7,7 MW und einer Elektroenergieerzeugung von 1,8 MW realisiert werden müsste. Der Energieertrag zum Beispiel bei Ganzgetreidepflanzen oder Kurzumtriebsplantagen beträgt jedoch nur 151 GJ/(ha*a), so dass die notwendige Leistung nicht realisiert werden kann. Außerdem wäre eine effektive Kraft-Wärme-Kopplung mit einer solchen Technologie nicht gegeben, da nur 2000 Betriebsstunden die volle Wärmeleistung benötigt wird und im restlichen Betrieb keine Wärmenutzung erfolgt. Um einen effektiven Betrieb zu realisieren ist ein wärmegeführter Betrieb dieser Anlage notwendig. Bei einem solchen Betrieb sind nur noch 55 GJ/(ha*a) notwendig, im Einzugsbereich des betrachteten landwirtschaftlichen Betriebes also 55.000 GJ. Hierfür muss etwa 37% der vorhandenen Anbaufläche mit Energiepflanzen bewirtschaftet werden. Unter der Annahme eines Elektroenergieverbrauchs von 1.000 kWh pro Person und Jahr würde sich im Einzugsbereich des Betriebes ein Bedarf von 645.000 kWh/a ergeben. Bei der beschriebenen wärmegeführten Kraft-Wärme-Kopplung wird das Fünffache des Elektroenergiebedarfes erzeugt. Eine solche Technologie führt jedoch auf Grund der geringen Volllastbetriebsstunden nur schwer zu einem wirtschaftlichen Betrieb.

Literaturverzeichnis

- 1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft, Berlin, Mai 2004
- 2 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Umweltpolitik Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung, Köllen Druck, Berlin, November 2003
- 3 Staiß, F.: Jahrbuch Erneuerbarer Energien 2000, Bieberstein-Fachbuchverlag, Radebeul, 2000
- 4 Kaltschmitt, M., Hartmann, H.: Energie aus Biomasse, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2001
- 5 Hartmann, H., Strehler, A.: Die Stellung der Biomasse, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 1995
- 6 Specht, M., Zuberbühler, U., Bandi, A.: Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potentiale, Herstellung, Perspektiven, Vortrag FVS Fachtagung 2003
- 7 Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.: Ufob Bericht 2003/2004, 2004
- 8 Gülzower Fachgespräche: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotentiale, Band 15, Weimar, 26./27. Oktober 2000
- 9 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Leitfaden Bioenergie
- 10 Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr.40: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich, Bonn, 31. Juli 2004
- 11 Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökonomie: Stromvergütung für Biogas nach dem neuen EEG, Mai 2004
- 12 Döhring, C.: Was bringt das EEG?, Vortrag zum Symposium „Energetische Nutzung von Biomasse“ anlässlich der Europäischen Biomassetage der Regionen 2004, Bernburg, 27. September 2004
- 13 Specht, M., Bandi, A., Marquard-Möllenstedt, T., Zuberbühler, U.: Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Überblick, Potentiale, Herstellung, Vortrag NAROSSA 2004, Magdeburg, 07./08. Juni 2004
- 14 Vollmer, G.-R.: Trockenfermentation von landwirtschaftlichen Roh- und Abfallstoffen, Vortrag Gülzower Fachgespräche „Trockenfermentation“, Gülzow, 04./05. Februar 2004
- 15 Ising, M.: „Vergasung fester Biomasse – Bereits Stand der Technik?“, Vortrag Gülzower Fachgespräche „Energetische Nutzung von Biomasse durch Kraft-Wärme-Kopplung: Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum“, Gülzow, 16./17. Mai 2000
- 16 Zahoransky, R.A.: Energietechnik, Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
- 17 Vogel, A., Kaltschmitt, M., Hofbauer, H., Bolhar-Nordenkampf, M.: Vergasung zur Kraftstoffbereitstellung – Grundsätzliche konzeptionelle Überlegungen, Vortrag zur Tagung

- Biomasse-Vergasung – Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Leipzig, 01./02. Oktober 2003
- 18 Rudloff, M.: CHORENFUEL aus dem Carbo-V-Vergaser, Vortrag zur Tagung Biomasse-Vergasung – Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, Leipzig, 01./02. Oktober 2003
- 19 Forschungsbericht des ATB: Studie zur Errichtung einer Pilotanlage zur Trockenvergärung oder Thermolyse landwirtschaftlicher, forstwirtschaftlicher und gewerblicher Biomasse zur Energiegewinnung als Beispielobjekt für die Landkreise Bраниm und Uckermark, Potsdam-Bornim, Dezember 2003
- 20 Betriebsplanung Landwirtschaft 2002/2003, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 18. Auflage, 2002
- 21 Werdich, M., Kübler, K.: Stirling-Maschinen, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 9. Auflage, 2003
- 22 Weiland, P.: „Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland“, Vortrag zur Tagung Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotentiale, Weimar, 26./27. Oktober 2000
- 23 Leible, L., Kälber, S.: „Potential der Energiebereitstellung aus biogenen Reststoffen und Abfällen für Deutschland – Ein Überblick“, Vortrag NAROSSA 2004, Magdeburg, 07./08. Juni 2004
- 24 Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Land Brandenburg: Agrarbericht 2004 zur Land- und Ernährungswirtschaft des Land Brandenburg
- 25 Schüsseler, P.: „Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs Einführung in die Problematik“, Vortrag Gülzower Fachgespräche „Trockenfermentation“, Gülzow, 04./05. Februar 2004
- 26 Rudloff, M.: „BtL – Made by CHOREN Process, Environmental Impact and Latest Developments“, Automobile & Environment at Belgrade EAEC Congress, May 2005
- 27 <http://www.fnr.de>