

# Energieeffizienz der energetischen Biomassenutzung

Michael Beckmann, Slawomir Rostkowski, Technische Universität Dresden

Reinhard Scholz, Technische Universität Clausthal

1	Grundlagen der Bewertung von Verfahren.....	2
1.1	Massen- und Energiebilanzen .....	2
1.2	Energieaustauschverhältnisse .....	4
1.3	Spezifische Kohlendioxidemissionen und Emissionsaustauschverhältnis .....	6
2	Beschreibung und Bewertung von technischen Verfahren (Beispiele).....	7
2.1	Umwandlung in thermische Energie .....	7
2.2	Erzeugung elektrischer Energie.....	9
2.3	Erzeugung flüssiger Brennstoffe und elektrischer Energie .....	12
2.4	Erzeugung gasförmiger Brennstoffe zur Netzeinspeisung .....	15
3	Schlussfolgerungen.....	17
4	Referenzen.....	19

Erneuerbare Energien, denen u.a. auch die Nutzung der Biomasse zugeordnet wird, sind in der öffentlichen Diskussion häufig mit einem positiven Vorurteil belegt. Mit umgekehrten Vorzeichen verläuft derzeit die Debatte bei der Nutzung konventioneller Energieträger, insbesondere der Kohle. Ein wesentliches Argument in dieser Debatte ist der Ausstoß an fossilem CO<sub>2</sub> in Verbindung mit der Klimaveränderung. Eine stabile und am Ressourcenschutz orientierte Energiepolitik muss technologieoffen und wettbewerbsorientiert geführt werden. Unbestritten ist dabei, dass durch die Effizienz in der Umwandlung wie auch in der Anwendung von Energie ein ganz wesentliches Einsparpotential besteht, was weiter ausgeschöpft werden muss. Das bedeutet u.a. Wirkungsgradsteigerungen, Reduzierung von Emissionen und damit insgesamt weitere Verminderung der energiespezifischen Emissionen.

Die Internationale Energie-Agentur (IEA) kommt im World Energy Outlook 2007 zu einem differenzierten Bild, in dem u.a. die fossilen Energieträger bis 2030 ihre dominierende Stellung behalten, der Beitrag der erneuerbaren Energien weltweit bis 2030 auf ca. 17 % ausgebaut sein wird und eine erweiterte Nutzung der Kernenergie befürwortet wird.

Der Grundsatz lautet demnach weiter hin Diversifikation. Vor diesem Hintergrund muss in Verbindung mit dem Grundsatz der Energieeffizienz die Frage beantwortet werden, welcher Energieträger für die jeweils betrachtete Nutzung und mit welchem zugehörigen Verfahren den größten Nutzen und die niedrigsten Emissionen erzeugen. Die oftmals geäu-

ßerte Behauptung, die energetische Nutzung von Biomasse sei *CO<sub>2</sub>-frei*, daher spiele der Wirkungsgrad keine Rolle, ist im Zusammenhang mit dem weiterhin notwendigen Energiemix falsch.

In dem vorliegenden Beitrag werden beispielhaft für einzelne Bedarfssituationen – Bereitstellung von Wärmeenergie, elektrischer Energie, chemischer Energie (Kraftstoffe, Synthesegas) - verschiedene Nutzungskonzepte diskutiert. Grundlage bilden Bilanzierungen und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die energetische Nutzung der Biomasse in der technischen Anwendung hat vergleichsweise zur Umwandlung fossiler Energieträger eine wesentlich kürzere Entwicklungszeit. Wie bei den Verfahren der Veredlung fossiler Energieträger so besteht auch bei den Verfahren zur Biomassenutzung die Aufgabe der Effizienzsteigerung durch wissenschaftlich-technische Entwicklungen. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen dafür die Richtung an.

Das Ziel der Biomassenutzung besteht daher darin, die Nutzungswege zu präferieren, die zur höchsten spezifischen Einsparung an Ressourcen fossiler Energieträger und an Kohlendioxidemissionen führen. Dafür ist es erforderlich, die Nutzungswege zu bilanzieren und zu bewerten.

## **1 Grundlagen der Bewertung von Verfahren**

### ***1.1 Massen- und Energiebilanzen***

Eine wichtige Grundlage für die Bewertung und weitere Optimierung von verfahrenstechnischen Anlagen allgemein – so auch von Anlagen zur Energieumwandlung im Besonderen – stellt die Bilanzierung von Stoff-, Massen- und Energieströmen dar. Die Methode der Bilanzierung wurde bereits ausführlich z.B. in [15] beschrieben. Daher sei hier nur zusammenfassend auf die wesentlichen Schritte eingegangen.

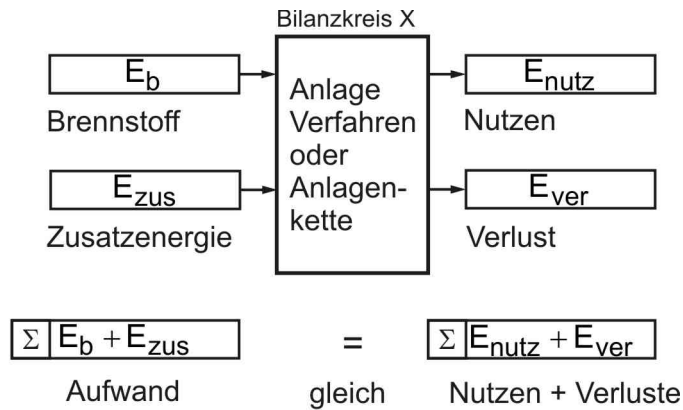


Bild 1. *Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz mit den ein- und austretenden Strömen zur Erläuterung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der Energieeffizienz, d.h. des zugehörigen Wirkungsgrades  $\eta_x$  des Bilanzkreises X*

Zunächst erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen<sup>1</sup>. Damit wird deutlich, was bewertet werden soll: ein Anlagenteil, eine Anlagengruppe, eine gesamte Anlage, eine Verfahrenskette usw. An den Systemgrenzen werden alle ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme angetragen. Das Bild 1 zeigt die prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz einer gesamten Anlage

mit den wesentlichen ein- und austretenden Energieströmen. Wichtig erscheint der Hinweis, dass für die Erstellung einer Energiebilanz im ersten Schritt i.d.R. eine Massenbilanz und ggf. auch eine Stoffbilanz (Plausibilität und Kompatibilität einer Bilanz, s.u.) erforderlich sind.

Die zugehörigen Werte für die einzelnen Ströme liegen entweder aus Messungen vor oder müssen durch eine entsprechende Bilanzierung auf der Grundlage der Erhaltungssätze<sup>2</sup> für Masse und Energie usw. ermittelt werden. Eine wesentliche Voraussetzung für die Bilanzierung ist die Festlegung eines *Nullpunktes* bzw. eines *Bezugszustandes*.

Besondere Aufmerksamkeit ist der *Plausibilität* einer Bilanz zu widmen [1]. Gegebenenfalls sind bei fehlenden oder unsicher erscheinenden Daten so genannte *Kompatibilitäts-Betrachtungen* (z.B. Rückwärtsrechnungen mit Stoff- und Energiebilanzen an einzelnen Apparaten) durchzuführen.

Erst nach erfolgten Kompatibilitäts- und Plausibilitätsbetrachtungen werden mit den nun vorliegenden Massen-, Stoff- und Energieströmen Bewertungen durchgeführt. Wird nun ganz allgemein die Energieeffizienz mit einem Wirkungsgrad, der das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand darstellt, bestimmt, so ergibt sich für das Beispiel in Bild 1:

<sup>1</sup> *Systemgrenze, Bilanzgrenze, Bilanzkreis* haben begrifflich identische Bedeutung.

<sup>2</sup> Hierzu zählen u.a. die so genannte Verbrennungsrechnung, Berechnungsmethoden für Wärmeübertrager, Turbinen usw.

$$\eta_x = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{E_{\text{nutz}}}{E_b + E_{\text{zus}}} \quad (1).$$

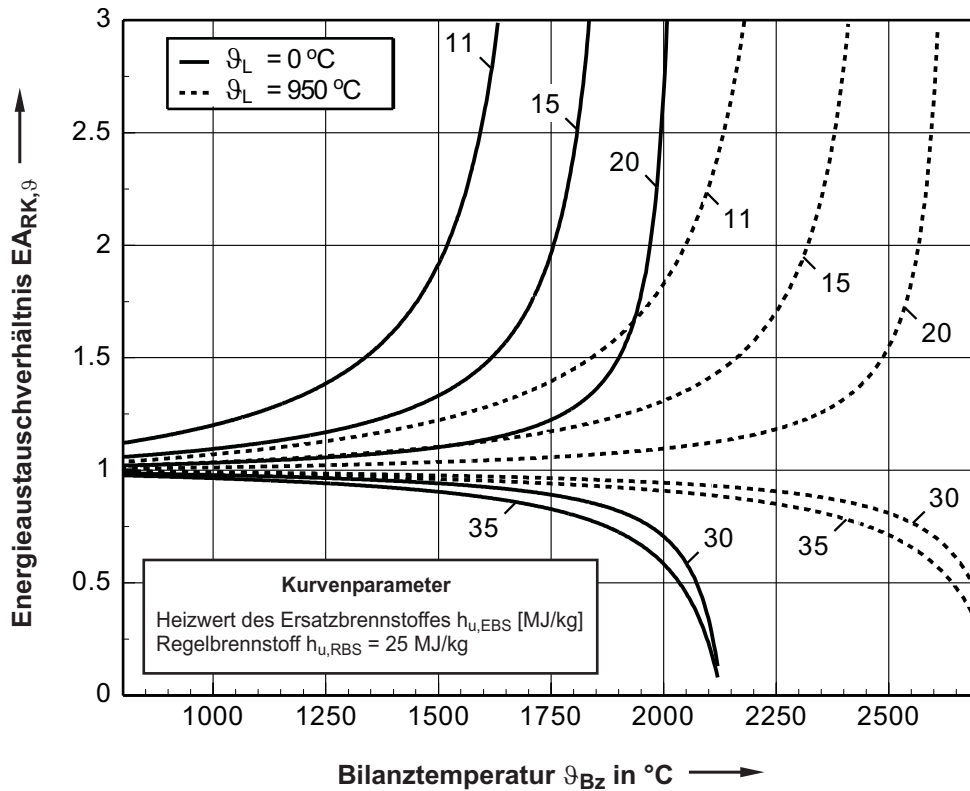
Die einzelnen Energien  $E_b$ ,  $E_{\text{zus}}$ , und  $E_{\text{nutz}}$  können unterschiedliche Energiearten sein, wie z.B. chemisch gebundene Energie, thermische und elektrische Energie und besitzen daher auch entsprechend unterschiedliche Wertigkeiten. Bei der Bewertung des Netto-Nutzens muss von dem erzeugten Nutzen der Aufwand abgezogen werden. Im Fall von elektrischer Energie ist das ohne weiteres möglich, d.h., die benötigte elektrische Zusatzenergie kann von der erzeugten elektrischen Energie einfach abgezogen werden. Erzeugt die Anlage jedoch nur thermische Energie oder soll der Aufwand an Zusatzbrennstoffen (chemisch gebundene Energie) abgezogen werden, so sind aufwendigere Betrachtungen zur Substitution unerlässlich (siehe folgender Abschnitt).

## **1.2 Energieaustauschverhältnisse**

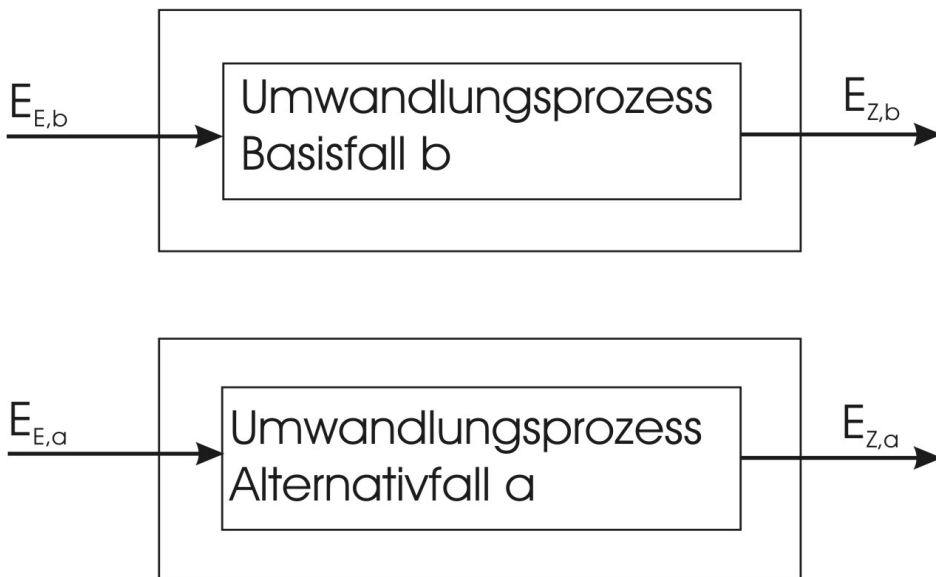
Da die vorhandenen Potentiale an Biomasse und Ersatzbrennstoff nicht ausreichen, um alle Bereiche zu versorgen, ist es eine wichtige Aufgabe von Energietechnik und Energiewirtschaft, solche Verfahren auszuwählen und umzusetzen, die bei der Substitution fossiler Brennstoffe ein möglichst günstiges Energieaustauschverhältnis besitzen. Das Energieaustauschverhältnis kann aus unterschiedlichen Randbedingungen hergeleitet werden. Sind unterschiedliche Energiearten zu betrachten, so ist ein Energieaustauschverhältnis für den jeweils speziellen Fall zu bilden, welches das Verhältnis der Substitutionsenergie (Beispiel oben: thermische Energie) zu der zu substituierenden Energie (Beispiel oben: elektrische Energie) darstellt. Zur Ermittlung solcher Energieaustauschverhältnisse sei z.B. auf [6], [10], [12], [13], [3] verwiesen. Die Verwendung von so genannten Äquivalenzwerten [4] führt i.d.R. zu falschen Ergebnissen.

Im Folgenden wird kurz auf Energieaustauschverhältnisse für den Fall des Vergleiches gleicher Energiearten eingegangen.

In Bild 2 ist das Energieaustauschverhältnis ausgehend von dem Niveau der Prozesstemperaturen [15] dargestellt. Dabei ergeben sich je nach Prozessführung (z.B. mit oder ohne Luftvorwärmung, Brennstoffvorwärmung) unterschiedliche Werte.



**Bild 2:** Energieaustauschverhältnis in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur [15].



**Bild 3:** Energieaustauschverhältnisse

Bild 3 zeigt weitere Möglichkeiten der Bildung von Energieaustauschverhältnissen bei der Bereitstellung von Energie. Verglichen werden hier: der Basisfall (Index b für Basisfall), z.B. Einsatz (Index E für Einsatzenergie) von fossiler Primärenergie zur Bereitstellung von

Zielenergie (Index Z für Zielenergie) mit dem Alternativfall (a für Alternativfall), bei dem z.B. Bioenergie als Einsatzenergie zur Umwandlung in die Zielenergie verwendet wird. Die Zielenergie kann in beiden Fällen sowohl thermisch (Index th), elektrisch (Index el) und chemisch (Index ch, Kraftstoff, Brenngas) sein. Es lassen sich nun Energieaustauschverhältnisse sowohl mit den Einsatzenergien als auch mit den Zielenergien wie folgt bilden:

Energieaustauschverhältnis für die Einsatzenergien:

$$f_E = \frac{E_{E,a}}{E_{E,b}} \quad (2)$$

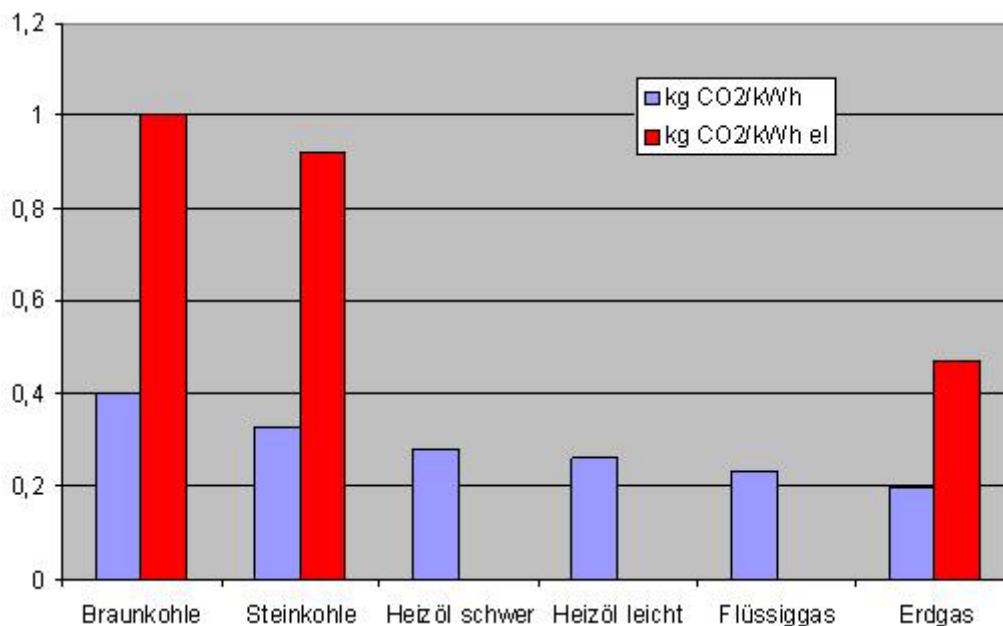
und das Energieaustauschverhältnis für die Zielenergien:

$$f_Z = \frac{E_{Z,a}}{E_{Z,b}} \quad (3).$$

In gleicher Weise lassen sich Emissionsaustauschverhältnisse bilden (nächster Abschnitt).

### 1.3 Spezifische Kohlendioxidemissionen und Emissionsaustauschverhältnis

Hauptquelle für Kohlendioxidemissionen in der Energietechnik ist die Verbrennung von Braun- und Steinkohle (Bild 4). Kohle wird im Energiemix der Bundesrepublik fast ausschließlich zur Elektroenergieerzeugung in Kraftwerksanlagen eingesetzt. Dies gilt mit guter Näherung weltweit.



**Bild 4:** Spezifische Kohlendioxidemission der Strom- (rot) und Wärmeerzeugung (blau) [9]

Als entscheidender Weg zur Minderung von Kohlendioxid-Emissionen ist, gemeinsam mit der Energieeinsparung, die Substitution von fossilen Brennstoffen, insbesondere Kohle, durch erneuerbare, kohlendioxidfreie oder kohlendioxidneutrale Energiequellen anzusehen. Dabei besitzt die Biomasse aus einer Reihe von Gründen, wie der planbaren Verfügbarkeit, der Verfügbarkeit von Technik sowie des hohen Potentials eine besondere Bedeutung. Das Emissionsaustauschverhältnis ergibt sich in Anlehnung an Bild 2 als Emissionsaustauschverhältnis bezogen auf die Einsatzenergie:

$$f_{E,CO_2} = \frac{m_{E,a,CO_2}}{m_{E,b,CO_2}} \quad (4)$$

und Emissionsaustauschverhältnis, bezogen auf die Zielenergie:

$$f_{Z,CO_2} = \frac{m_{Z,a,CO_2}}{m_{Z,b,CO_2}} \quad (5).$$

## 2 Beschreibung und Bewertung von technischen Verfahren (Beispiele)

Die Umwandlung von Biomasse ist vor allem durch die angestrebte Zielenergie determiniert. Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren und Strategien befindet sich in [2]. Für Bereitstellung von Zielenergien steht jeweils eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Daneben sind die grundlegenden Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffes von Bedeutung. Eine Einteilung kann, angelehnt an die Aggregatzustände, in fest, flüssig, gasförmig und pastös erfolgen.

Bedeutende Zielenergien bei der Nutzung von Biomasse und Ersatzbrennstoffen sind:

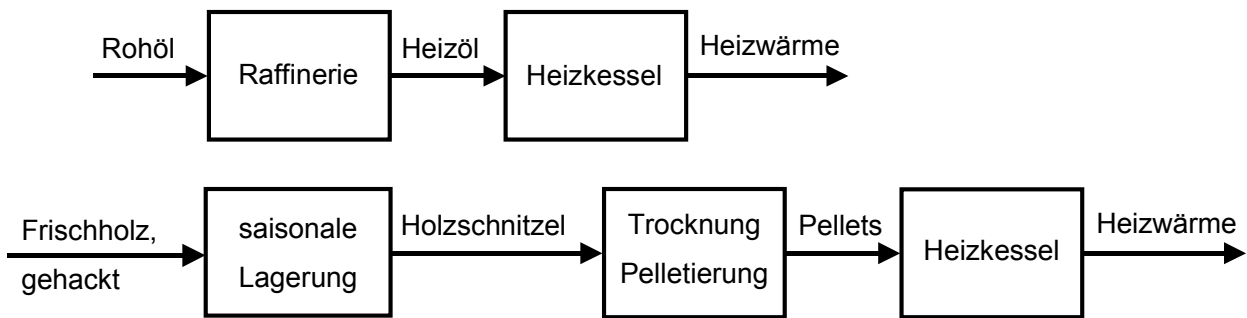
- thermische Energie als Heiz- oder Prozesswärme,
- elektrische Energie,
- chemische Energie als
  - flüssige Brennstoffe, insbesondere für den Einsatz als Treibstoff im Transportsektor,
  - chemische Energie gasförmigen Brennstoffes, mit verschiedenen Anwendungen, wie z.B. Einspeisung ins Erdgasnetz oder chemische Industrie.

### 2.1 Umwandlung in thermische Energie

Die Umwandlung der chemischen Energie in thermische Energie erfolgt in der Regel in einer Verbrennung.

An die Verbrennung schließt sich eine Dampferzeugung oder eine Wärmeübertragung auf ein Trägermedium wie Wasser oder Luft an. Bei der Umwandlung in thermische Energie lassen sich i.d.R. hohe Wirkungsgrade (ca. 90 %) erreichen.

Das besondere Interesse gilt dem Hausbrand, da hier große Mengen Heizöl aus Erdöl substituiert werden können. Trotz des deutlich höheren Aufwandes bei der Brennstoffaufbereitung dominiert im Hausbrand der Einsatz in Form von Pellets, da andere Alternativen wie Holzhackschnitzel und Scheitholz aufgrund des höheren Handlingaufwandes vom privaten Endkunden abgelehnt werden. Es soll daher, wie in Bild 5 dargestellt, eine Heizungsanlage auf Ölbasis und eine Heizungsanlage auf Basis von Biomassepellets verglichen werden.

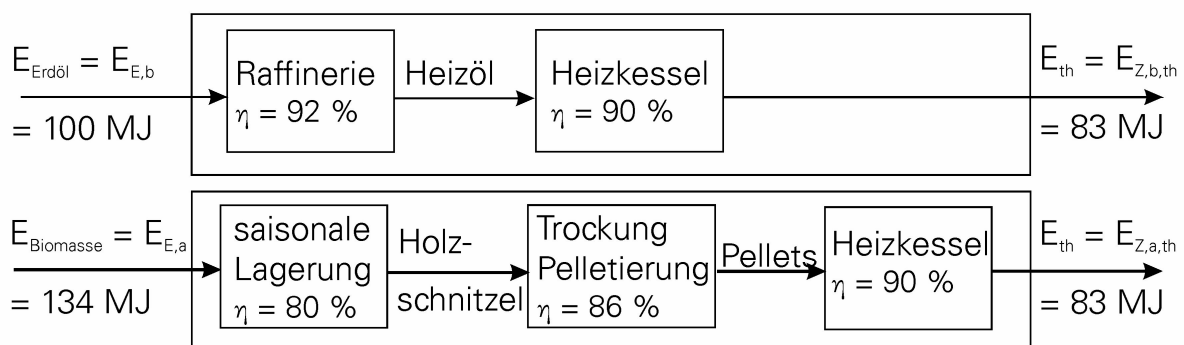


**Bild 5:** Varianten der Heizwärmeerzeugung

Dem Vergleich der Heizwärmeerzeugung für ein Einfamilienhaus mittels Ölkessel oder Pelletkessel werden, ausgehend von den gewonnenen Primärenergieträgern Rohöl und gefälltes Holz folgende Kennzahlen zugrunde gelegt:

- Wirkungsgrad der Heizölerzeugung in einer Raffinerie 0,92,
- Wirkungsgrad eines Ölkessels 0,9,
- Wirkungsgrad der Holz-trocknung und einer einjährigen Lagerung im Gelände 0,8,
- Wirkungsgrad für die technische Trocknung und die Pelletherstellung 0,86 [8],
- Wirkungsgrad eines Pelletkessels 0,9. [7].

Damit ergibt sich der folgende Vergleich (Bild 6):



**Bild 6:** Bewertung der Heizwärmeerzeugung



Mit den genannten Randbedingungen ergibt sich für den Basisfall bei Einsatz 100 MJ eine Zielenergie, thermisch, von 83 MJ. Um diese Zielenergie in dem Alternativfall mit Biomasse bereitzustellen, benötigt man 134 MJ Einsatzenergie. Damit ergibt sich ein Energieaustauschverhältnis bezogen auf die Einsatzenergie von  $f_{E,th} = 1,34$ ; d.h., um den gleichen Nutzen zu erzielen, sind 34 % mehr an Biomasseenergie im Vergleich zur fossilen Primärenergie erforderlich. Betrachtet man die Biomasse als CO<sub>2</sub>-neutral, so wird  $f_{E,CO_2} = 0$ , d.h., es wird die Emission aus der Verbrennung der Primärenergie komplett eingespart. Betrachtet man die Biomasse als nicht CO<sub>2</sub>-neutral, ergibt sich ein  $f_{E,CO_2} = 1,72$ , d.h., es werden bei der Nutzung der Biomasse im Vergleich zu der fossilen Energie 72 % mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt.

## 2.2 Erzeugung elektrischer Energie

Die Erzeugung elektrischer Energie aus der Biomasse hat eine Reihe von Vorteilen:

- ganzjähriger Bedarf damit ganzjährig möglicher Absatz /Einspeisung,
- flächendeckendes Netz, damit Abnahmemöglichkeit (Einspeisepunkt) in der Regel in der Nähe der dezentralen Erzeuger,
- hoher Veredlungsgrad, damit hoher Marktpreis,
- Förderung durch das EEG.

Es existieren eine Reihe technischer Möglichkeiten der Erzeugung elektrischer Energie. Während für die Nutzung fester fossiler Brennstoffe in Großanlagen Wasserdampfkraftprozesse mit Dampfturbinen absolut dominieren, konkurrieren für die kleineren Anlagen, wie sie für die Biomassenutzung erforderlich sind, verschiedene Verfahren. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die Wasserdampfkraftprozesse mit Dampfturbinen in kleineren Leistungsgrößen mit schlechten Wirkungsgraden behaftet sind.

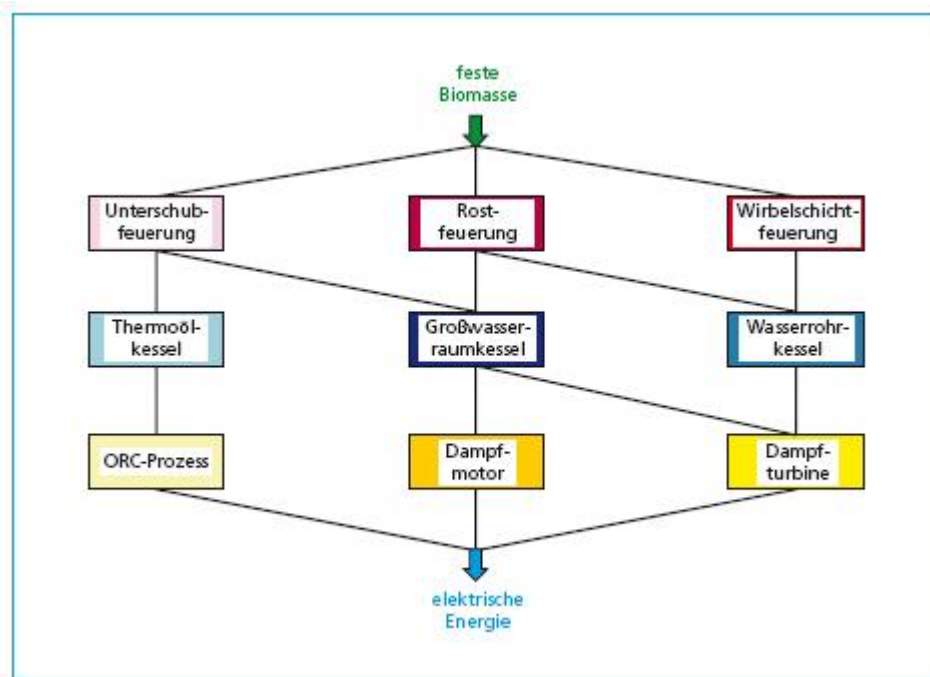
Grundsätzlich sind zwei Verfahrenskonzepte zur Umwandlung der Biomasse zunächst in mechanische Energie zu unterscheiden:

- Umwandlung in thermische Energie durch Verbrennung<sup>3</sup> und nachfolgender Kreisprozess (z.B. Wasserdampfkraftprozess, ORC-Prozess) (Bild 7),
- Umwandlung in chemische Energie durch Pyrolyse und/oder Vergasung und nachfolgender Kreisprozess (z.B. Gas-Motor, Gas-Turbine) (Bild 8).

Die prinzipiellen Möglichkeiten der Umwandlung der Biomasse in elektrische Energie über thermische Energie (erstes Verfahrenskonzept) sind beispielhaft in Bild 7 dargestellt.

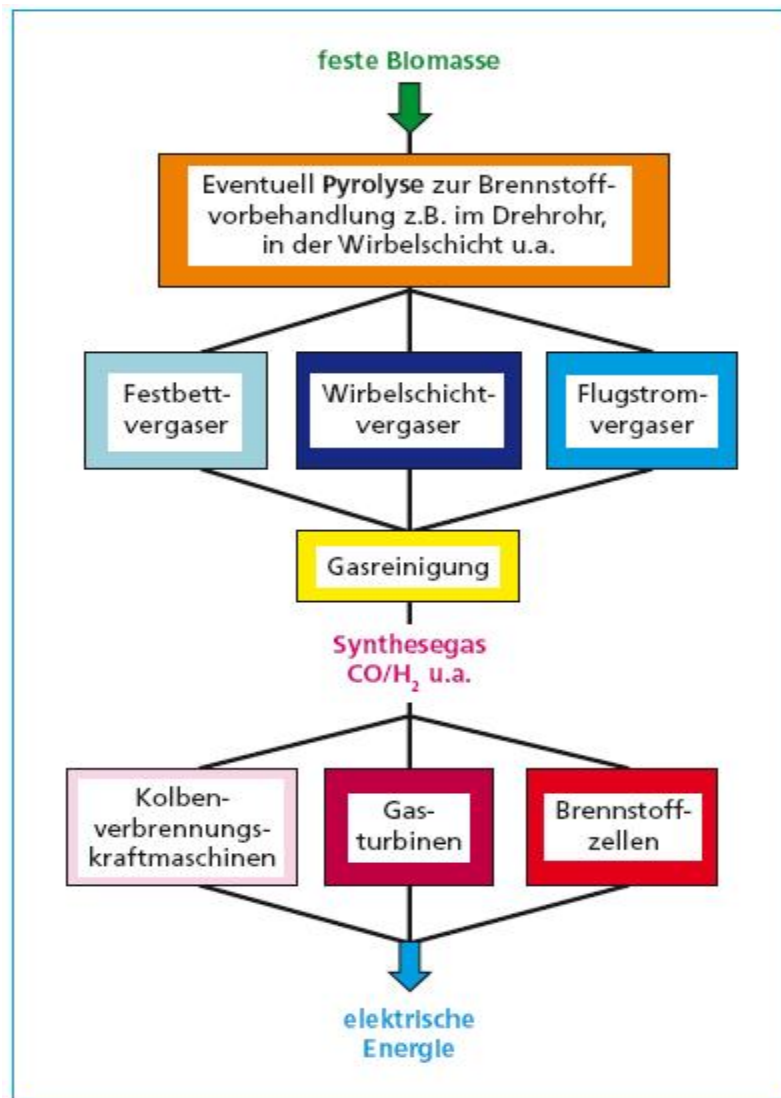
---

<sup>3</sup> Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung werden an dieser Stelle als zusammenfassende Prozesse verstanden, die sich selbstverständlich aus Teilprozessen – auch in mehreren Einheiten – zusammensetzen können [15]



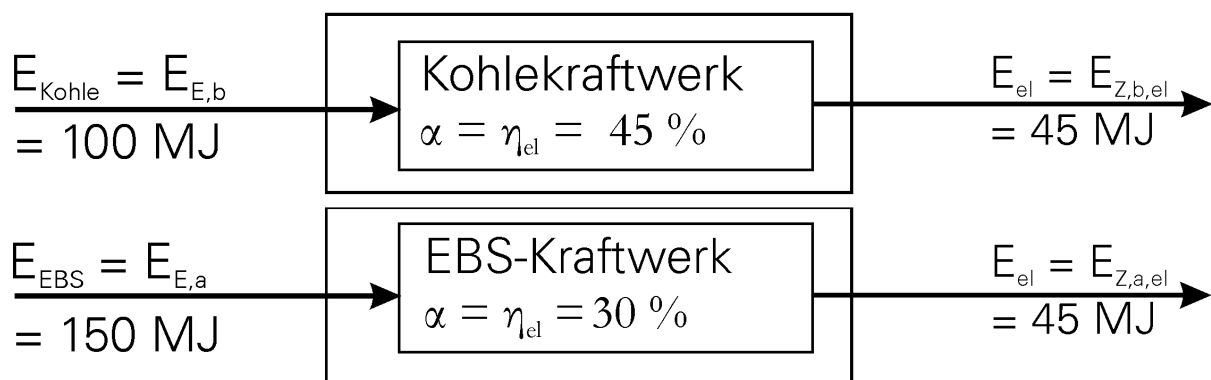
**Bild 7:** Erzeugung elektrischer Energie über thermische Energie

Für das zweite o.g. Verfahrenskonzept – der Umwandlung der Biomasse über chemische Energie in elektrische Energie – sind prinzipielle Möglichkeiten in Bild 8 dargestellt.



**Bild 8:** Erzeugung elektrischer Energie über chemische Energie.

Für die Elektroenergieerzeugung soll hier ein Kohlekraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 0,45 mit einem Ersatzbrennstoffkraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 0,30 verglichen werden (Bild 9).



**Bild 9:** Bewertung der Elektroenergieerzeugung

Für das hier gewählte Beispiel ergibt sich für das Energieaustauschverhältnis, Einsatzenergie,  $f_{E,el} = 1,5$ . Betrachtet man den Ersatzbrennstoff als anteilig CO<sub>2</sub>-neutral (C-Biomasse zu C fossil ca. 0,5) so ergibt sich ein  $f_{E,CO_2} = 0,625$ , d.h., es werden 37,5 % weniger „fossiles“ CO<sub>2</sub> im Alternativfall freigesetzt als im Basisfall. Betrachtet man den Ersatzbrennstoff jedoch vollständig als nicht CO<sub>2</sub>-neutral, so wird  $f_{E,CO_2} = 1,25$ , d.h., es werden bei der Nutzung des Ersatzbrennstoffes im Vergleich zu der fossilen Energie 25 % mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt.

### 2.3 Erzeugung flüssiger Brennstoffe und elektrischer Energie

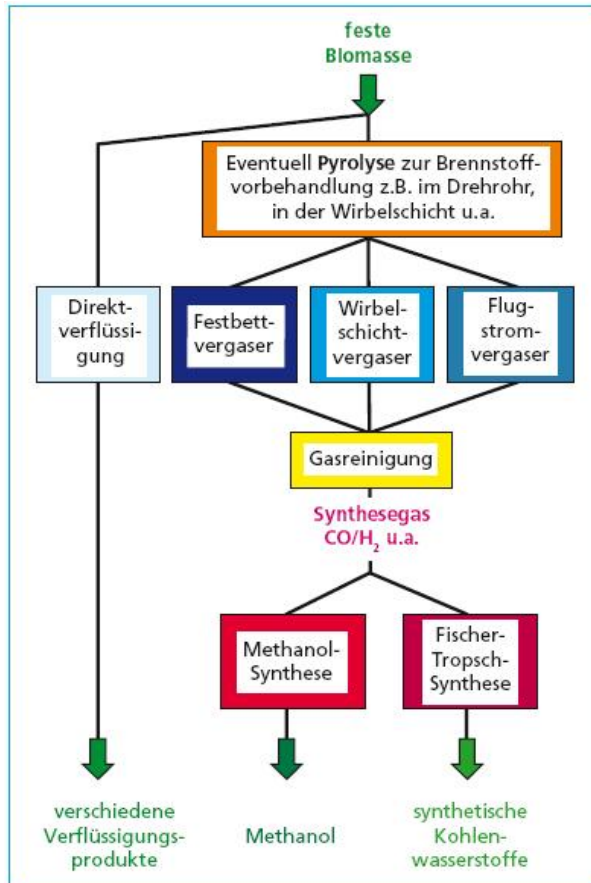
Die Bedeutung der Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Biomasse liegt in der Versorgung des Transport-, insbesondere des Automobilssektors, mit Treibstoff aus nachwachsenden Rohstoffen und damit erneuerbaren Energien. Diese Möglichkeit, verbunden mit den aktuellen Rohölpreisen stellt die Triebfeder dieses Nutzungszweiges dar.

Dazu sind im Wesentlichen drei Wege von Bedeutung:

- die Gewinnung der in der Biomasse enthaltenen heizwertreichen Flüssigkeiten, z. B. durch Abpressen von Pflanzenöl,
- direkte Umwandlung in flüssigen Brennstoff (Direktverflüssigung, z. B. Flash-Pyrolyse),
- der indirekte Weg über eine Erzeugung von Synthesegas aus der festen Biomasse und eine Synthese des gewünschten Flüssigbrennstoffes aus dem Synthesegas.

Der erste Weg ist nur für Pflanzen gangbar, die derartige Substanzen anreichern. Die direkte Umwandlung kann sowohl biochemisch z.B. durch Vergärung bei der Ethanolproduktion als auch thermochemisch z.B. durch Hydrierung in der so genannten Direktverflüssigung erfolgen.

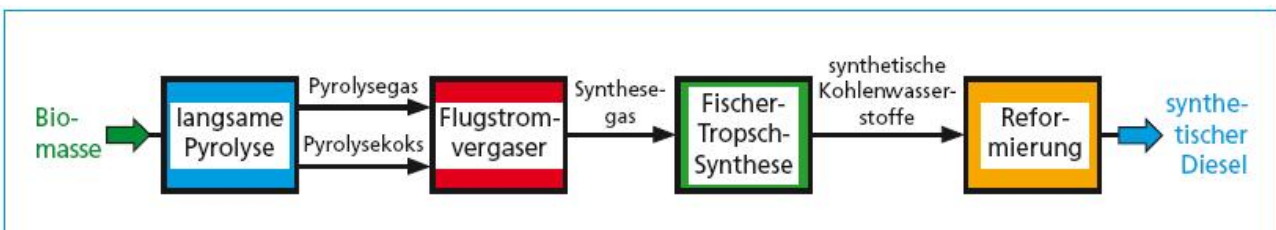
Ebenfalls den thermochemischen Verfahren (Bild 10) sind die Verfahren des dritten Weges zuzuordnen. Die Erzeugung eines Synthesegases wird häufig gegenüber der Direktverflüssigung trotz des Umweges und der geringeren Effizienz bevorzugt, da ein engeres und von den veränderlichen Biomasseeigenschaften weniger abhängiges Produktspektrum erzeugt werden kann.



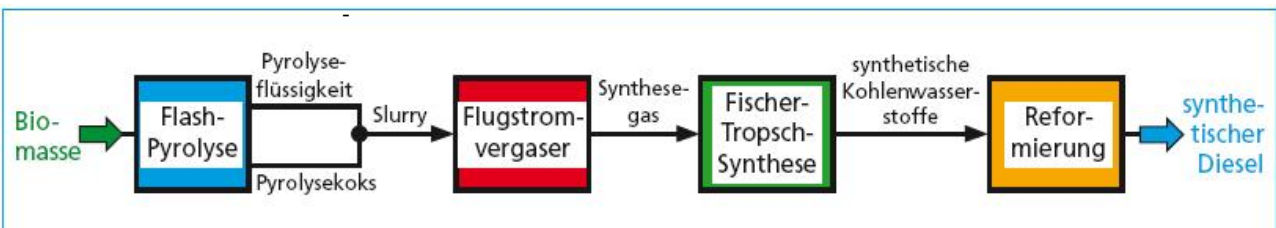
**Bild 10:** Die wichtigsten Wege der thermochemischen Umwandlung fester Biomassen in flüssige Brennstoffe

Zwei Verfahren zur Erzeugung flüssiger Brennstoffe über Synthesegas sind z.B. Choren-Verfahren [14] und das Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe [5] (Bild 11).

### Choren-Verfahren



### Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe



**Bild 11:** Zwei Verfahren zur Herstellung flüssiger Brennstoffe aus Biomasse [14]; [5]

Die Bewertung der Produktion synthetischer Treibstoffe ist vom betrachteten Kontext abhängig. In die Betrachtung sollen die beiden Bereiche einbezogen werden, die nach Abschnitt 2.1 besonderen Anteil am Erdölverbrauch haben, d.h. neben den flüssigen Treibstoffen für den Transportsektor die Heizwärmeversorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern. Deshalb wird hier beispielhaft die Versorgung eines Haushaltes mit Heizwärme und Treibstoff betrachtet. Es besteht folgende Versorgungssituation:

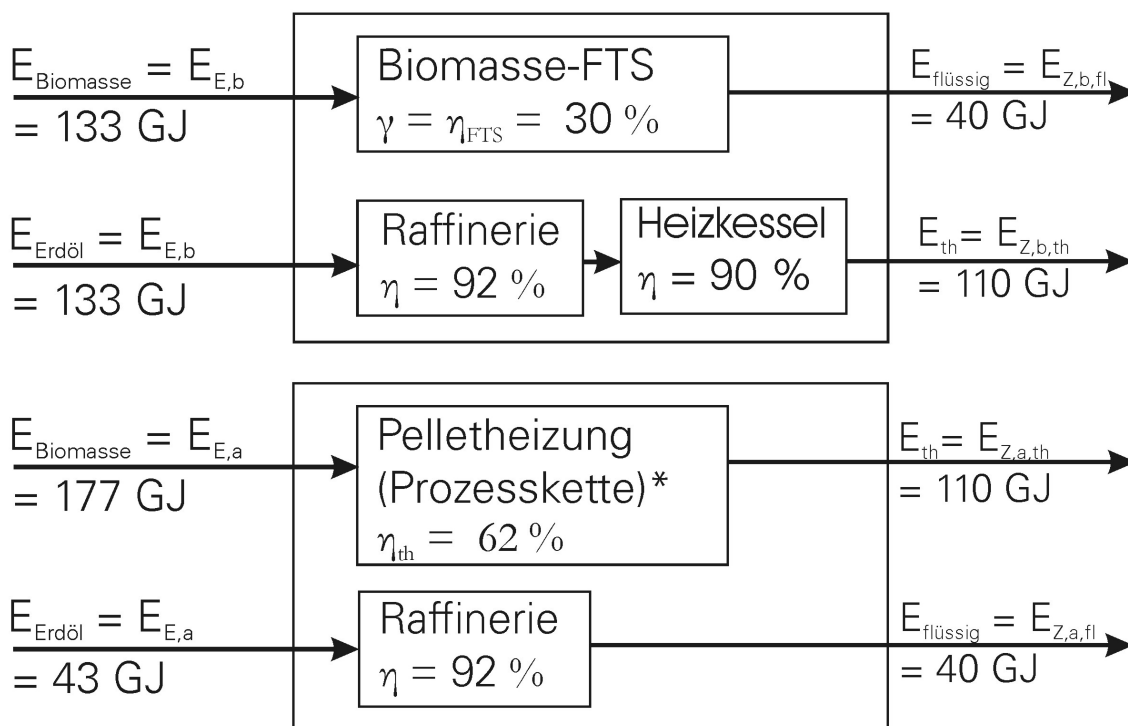
- Einfamilienhaus, Heizwärmebedarf 110 GJ/a,
- ein PKW mit einer Jahresfahrleistung von 10.000 km, entsprechend einem Treibstoffenergiebedarf von 40 GJ/a.

Im Folgenden wird zur Bewertung der Vergleich von zwei Szenarien beispielhaft dargestellt:

- Basisfall b: die Verflüssigung von Biomasse über eines der oben beschriebenen Verfahren, während Heizöl zur Wärmeversorgung genutzt wird,
- Alternativfall a: die Treibstoffproduktion in einer Raffinerie und Heizen mit Holzpellets.

Dabei gelten für die Treibstoffherzeugung in einer Raffinerie ein Wirkungsgrad von 0,92 und für den Gesamtprozess der Biomasseverflüssigung über Synthesegasherstellung, Fischer-Tropsch-Synthese und Aufbereitung ein Wirkungsgrad von 0,3 [16]. Die Wirkungsgrade der Heizwärmeerzeugung sind aus 2.1 übernommen.

Dem Vergleich der oben beschriebenen Lösungsvarianten dient Bild 12.



**Bild 12:** Szenarien der Versorgung mit flüssigen Brennstoff

(\* entsprechend Bild 6)

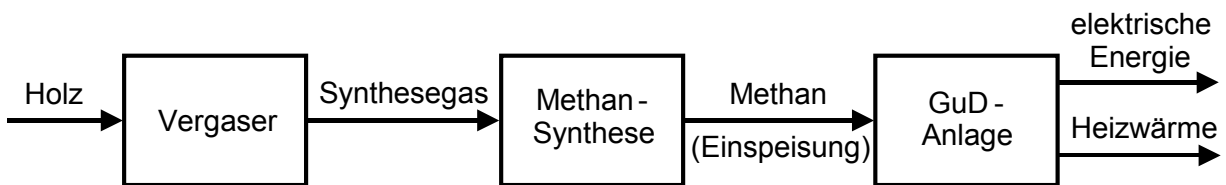
Mit den genannten Randbedingungen ergibt sich für den Basisfall ein Einsatz von 266 GJ für die Lösung der Versorgungsaufgabe, d.h. der Versorgung mit 110 GJ thermischer und 40 GJ chemischer Zielenergie. Um diese Zielenergie im Alternativfall bereitzustellen, benötigt man 220 GJ Einsatzenergie. Damit ergibt sich ein Energieaustauschverhältnis bezogen auf die Einsatzenergie von  $f_{E,gesamt} = 0,83$ . Um den gleichen Nutzen zu erzielen, sind im Alternativfall, Treibstoff aus Erdöl und Heizen mit Biomasse, 17 % weniger an Einsatzenergie im Vergleich zum Basisfall erforderlich. Besonders augenfällig ist, dass im Alternativfall 68 % weniger des fossilen Primärenergieträgers benötigt werden. Damit kann mit dem Alternativfall eine deutliche Streckung der endlichen Ressourcen am Erdöl gegenüber dem Basisfall erreicht werden. Dies heißt nun gerade nicht, die Entwicklung für die Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Biomasse einzustellen. Im Gegenteil, da die Umwandlung zu flüssigen Brennstoffen noch nicht effektiv genug ist, muss noch mehr Forschungs- und Entwicklungstätigkeit erfolgen. Es muss das Ziel bei der Umwandlung von Biomasse in flüssigen Brennstoff sein, an die Höhe der Effizienz der Umwandlungsmöglichkeiten bei fossilen Brennstoffen heranzureichen.

Betrachtet man die Biomasse als CO<sub>2</sub>-neutral, so wird entsprechend dem gerade ausgeführten das Verhältnis  $f_{E,CO_2} = 0,32$ , d.h., es wird die Emission aus der Verbrennung der Primärenergie um 68 % verringert. Betrachtet man die Biomasse als nicht CO<sub>2</sub>-neutral, ergibt sich ein  $f_{E,CO_2} = 0,89$ , d.h., selbst bei dieser Betrachtung werden im Alternativfall noch 11 % weniger CO<sub>2</sub> freigesetzt. Damit ist der Alternativfall auch im Hinblick auf die Emissionen an CO<sub>2</sub> als günstiger zu bewerten.

## **2.4 Erzeugung gasförmiger Brennstoffe zur Netzeinspeisung**

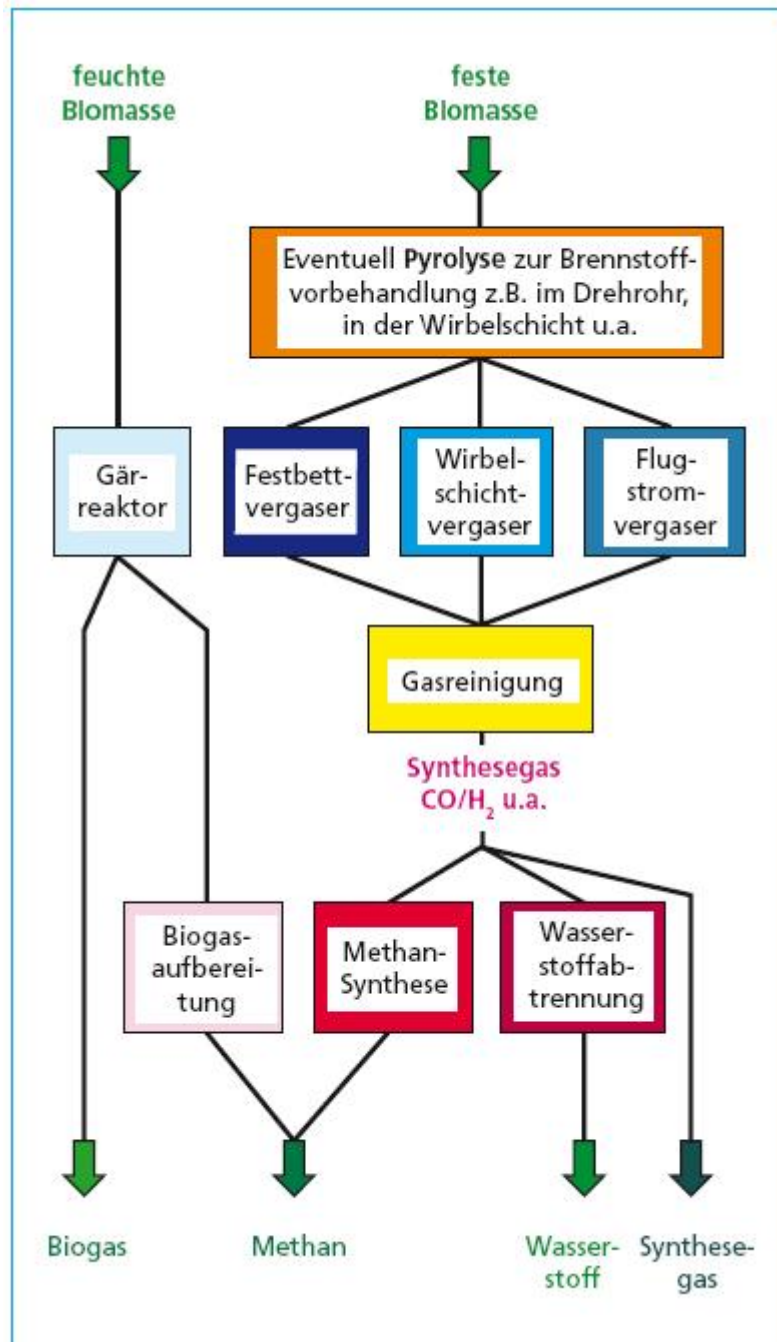
Die aus fester Biomasse oder Ersatzbrennstoffen erzeugten Brenngase können außer der in 2.2. beschriebenen direkten Verstromung und der Anwendung in chemischen Prozessen (siehe z. B. 2.3.) unter Umständen in das öffentliche Erdgasnetz eingespeist werden. Diese Einspeisung ist jedoch nur für Methan unproblematisch, da eine Einspeisung von Kohlenmonoxid oder Wasserstoff die Gaseigenschaften deutlich ändern würde. Somit ist eine synthetische Methanherzeugung angezeigt. Dieser Nutzungsweg besitzt zwei wesentliche Vorteile:

- die Methansynthese führt deutlich einfacher als ein Biomassevergaserblockheizkraftwerk über die Biomassevergasung zu einem vermarktbareren Produkt (SNG),
- mit dem synthetischen Erdgas (SNG) sind alle Erdgasverbraucher zugänglich, von den GUD - Kraftwerken (Bild 13) bis hin zu den Erdgasfahrzeugen.



**Bild 13:** Methaneinspeisung mit Gasnutzung in einer GuD-Anlage

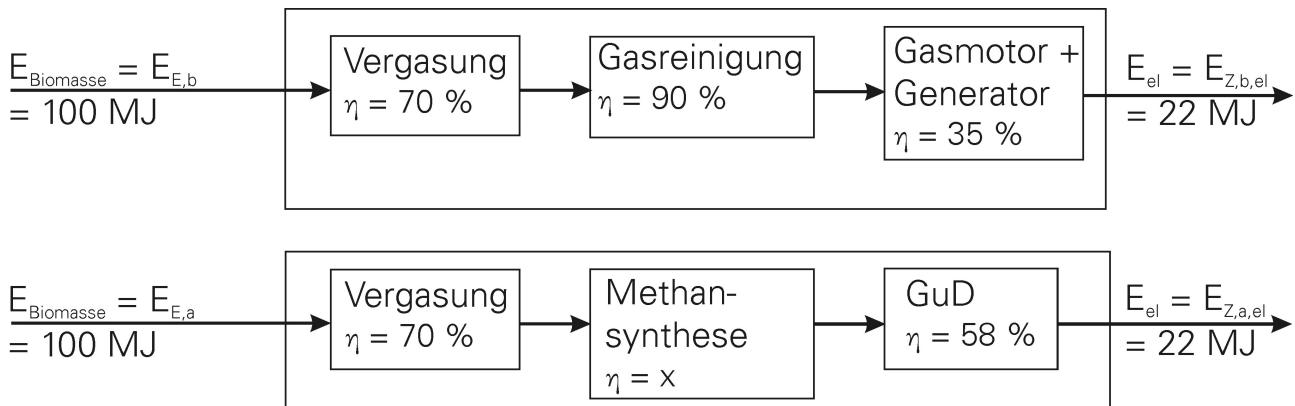
Typische Herstellungswege von Brenngasen aus Biomasse sind in Bild 14 dargestellt:



**Bild 14:** Die wichtigsten Wege der Herstellung von Brenngasen aus Biomasse.



Auch die Gasnetzeinspeisung kann mittels einer energetischen Bilanzierung bewertet werden. Da die zugehörigen Prozesse sich noch in Entwicklung befinden, soll folgende Frage beantwortet werden: Welchen Wirkungsgrad muss die Methanisierung in einem System aus Vergaser, Methanisierung, Netzeinspeisung und einer Nutzung des Gases aus dem Netz in einer GuD-Anlage mindestens haben, damit die Stromerzeugung, bezogen auf die gleiche Energiemenge der eingesetzten Biomasse die Stromerzeugung des oben beschriebenen Biomassevergaser-BHKW überschreitet? Der Wirkungsgrad der GuD-Anlage sei 0,58. Das Problem verdeutlicht Bild 15.



**Bild 15:** Vergleich Biomassevergaser-BHKW mit Gaseinspeisung und GuD-Anlage

Aus der Bilanzierung ergibt sich, dass die Variante der Gaseinspeisung mit Gasnutzung in einer GuD-Anlage ab einem Wirkungsgrad der Methanisierung von 0,54 zu einer höheren Elektroenergieerzeugung als ein Biomasse-BHKW führt. In Versuchsanlagen wurde bereits ein Wirkungsgrad von 0,7 für die Methanisierung überschritten [11], ein Methanisierungswirkungsgrad von 0,75 scheint erreichbar. Geht man davon aus, dass auch der Kaltgaswirkungsgrad auf 0,75 erhöht werden kann, so sind mit dieser Prozesskette Vergasung – Methanisierung und Netzeinspeisung – GuD-Anlage elektrische Gesamtwirkungsgrade von 0,33 erreichbar. Damit ist die Methansynthese zur Gasnetzeinspeisung, zusätzlich zu dem zur Umsetzbarkeit Gesagten, auch energetisch interessant.

### 3 Schlussfolgerungen

Die Beispiele zeigen zum Einen, dass es für die energetische Biomassenutzung verschiedene Strategien gibt.

Wichtig erscheint bei der Beurteilung der Effizienz der einzelnen Energieumwandlungsprozesse, einschließlich der Brennstoffaufbereitung, die Untersuchung von Verfahrensketten durch entsprechende Bilanzen. Erst auf dieser Basis lässt sich entscheiden, welche Wirkung in einem übergeordneten Rahmen im gesamten Wirtschaftssystem erzielt werden. Bei der energetischen Nutzung von Biomasse wird häufig argumentiert, dass es egal ist, mit welchem Wirkungsgrad Biomasse in flüssigen Brennstoff (Ersatzbrennstoff für fossilen

Brennstoff) umgewandelt wird, weil ja Biomasse „unerschöpflich“ nachwächst. Solange man jedoch fossile Primärenergieträger wie Öl oder z. B. Steinkohle benötigt und aus diesen mit einer höheren Umwandlungsrate flüssigen Brennstoff herstellen kann – im Vergleich zu Biomasse, Restmüll usw. – solange ist es aus energetischer Sicht besser, die Biomasse zu verbrennen, um elektrischen Strom zu erzeugen oder Wärme bereitzustellen, als zu flüssigem Brennstoff zu verarbeiten. Damit wird, wie den Beispielen gezeigt, CO<sub>2</sub> in entsprechendem Maße eingespart, weshalb (aus dieser Sicht) der Einsatz von Biomasse nicht CO<sub>2</sub> neutral ist. Die Forderung muss sein, die Biomasse so effektiv wie irgend möglich einzusetzen, um die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen soweit wie möglich zu senken. Dies heißt nun gerade nicht, die Entwicklung für die Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Biomasse einzustellen. Im Gegenteil, da die Umwandlung zu Biomasse noch nicht effektiv genug ist, muss noch mehr Forschungs- und Entwicklungstätigkeit erfolgen. Es muss das Ziel bei der Umwandlung von Biomasse in flüssigen Brennstoff sein, an die Höhe der Effizienz der Umwandlungsmöglichkeiten bei fossilen Brennstoffen heranzureichen. D.h. der Maßstab (*benchmark*), der sich aus der Bilanzierung ergibt, muss für die Biomasse der Entwicklungsstand bei fossilen Brennstoffen sein. Erst wenn dieser Maßstab (*benchmark*) erreicht ist, macht eine flächendeckende Industrieproduktion von flüssigem Brennstoff aus Biomasse Sinn, zumindest was das technische Wirtschaften mit Energie bei der Versorgung ganzer Regionen (Volkswirtschaft) betrifft<sup>4</sup>.

Die Einspeisung von synthetischem Methan in das Erdgasnetz bietet eine gute Alternative zu Anlagen, die das Gas aus einer Vergasung dezentral in Gasmotoren nutzen. Die Wirkungsgradschwelle von  $\eta_{\text{Methanisierung}} = 0,54$  für die Methanisierung ist leicht zu übertreffen,  $\eta_{\text{Methanisierung}} = 0,75$  könnte als Methanisierungswirkungsgrad erreicht werden, für den Betreiber einer Methansynthese auf Basis Biomasse ergeben sich zusätzlich technische Vorteile gegenüber dem eines Biomasse-BHKW. Somit ist die Methanherstellung zur Netzeinspeisung ein wichtiger und perspektivreicher Weg zur Biomassenutzung. Die Methansynthese sollte der direkten Stromerzeugung im EEG gleichgestellt werden.

Als Fazit ist zu ziehen, dass mit einer zielgerichteten Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse und Ersatzbrennstoffe der Effekt deutlich erhöht werden kann.

---

<sup>4</sup> Sollte es nicht möglich sein, diesen Maßstab zu erreichen, weil grundsätzlich physikalische, chemische und thermodynamische Gründe dagegen sprechen, müsste der Vergleich an einer mit den vorgenannten Restriktionen begründeten maximal erreichbaren Entwicklungshöhe gemessen werden, um die Ausschöpfung von Potentialen darzulegen. Schließlich wird die Notwendigkeit der Nutzung von Biomasse zur Substitution von fossiler Energie nicht in Frage gestellt. Ziel muss sein, auch mit regenerativer Energie möglichst effizient umzugehen.

## 4 Referenzen

- [1] Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. erschienen in: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag - Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2005, ISBN: 3-18-091888-8, S. 643-652.
- [2] Beckmann, M.; Klemm, M.: Strategien der energetischen Biomassennutzung. Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz. Berlin 25. – 26. September 2008.
- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999) Heft 6, S. 287-303. Teil 2: ZKG International 52 (1999) Heft 8, S. 411-419.
- [4] Beckmann, M.; Scholz, R.: Ermittlung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Zur Problematik von Äquivalenzwerten und der Berechnung des Heizwertes – Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-93-5317-26-9. S. 145 – 164. Tagung Berlin 31.01. – 01.02.2007.
- [5] Dahmen, N.; Dinjus, E.; Henrich, E.: Das Karlsruher bioliq®-Verfahren – Stand und Entwicklung. Tagung Mobil mit Biomasse. Stuttgart 27. September 2006.
- [6] Görgen, R.; Kahnwal, H.: Vergleichende Bewertung von Gasen. Gas wärme International, Bd. 17 (1968), Nr. 2, S. 50-53.
- [7] Hartmann, H. [Hrsg.]: Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Fachagentur nachwachsende Rohstoffe. Gülzow 2003.
- [8] Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th.; Bürli, J.: Herstellung von Holzpellets - Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung, Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets – Schlussbericht. Bundesamt für Energie. Zürich 2001.
- [9] Hiller, A.; Hellfritsch, St.: Kraftwerke der Zukunft für die Sicherung unserer energetischen Basis - Technologien für fossilbefeuerte Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung.

- [10] Kahnwald, H.; Wärmetechnische Bewertung von gasförmigen und flüssigen Austauschbrennstoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen. 35. Jahrg. (1964), Heft 10.
- [11] Klemm, M.; Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von fossilen Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe und Biomasse. Erschienen in: 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium – Künftiges Brennstoff- und Technologieportfolio in der Kraftwerkstechnik, TU Dresden, Tagungsband Kraftwerkstechnisches Kolloquium 14. – 15.10.2008, Dresden ISBN 978-3-00-025948-7; Band 1, S.399 – 416. [VWS-2008-12].
- [12] Lüth, F.; Die Wertigkeit von Gasen gegenüber anderen Brennstoffen und Energien in der Industrie. Stahl und Eisen 78 (1958), Nr. 15.
- [13] Michalowski, M.; Wessely, R.: Bewertung der komplexen Austauschbarkeit von Brenngasen in Hüttenwerken. Arch. Eisenhüttenwesens 54, Nr. 6, 1983.
- [14] Rudloff, M.: SunDiesel made by CHOREN – Die 50 MW-Demonstrationsanlage der CHOREN FUEL Freiberg GmbH & Co. KG. BBE- / UFOB-Fachkongress für Biokraftstoffe „Kraftstoffe der Zukunft 2004“. Berlin 29./30. November 2004.
- [15] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. Teubner 2001.
- [16] Schaub, G.; Vetter, A.: Biokraftstoffe – eine Übersicht. Chemie-Ingenieur-Technik 79 (2007) H.5 S. 569 – 578.