

## Strategien der energetischen Biomassenutzung

Michael Beckmann und Marco Klemm

1.	Zielstellungen und abgeleitete Nutzungsstrategien .....	52
1.1.	Umwandlung in thermische Energie.....	52
1.2.	Erzeugung elektrischer Energie.....	53
1.3.	Erzeugung flüssiger Brennstoffe .....	56
1.4.	Erzeugung gasförmiger Brennstoffe .....	57
2.	Grundbausteine der Umwandlung von Biomasse .....	58
2.1.	Umwandlung von chemischer Energie in chemische Energie .....	59
2.2.	Umwandlung von chemischer Energie in Wärme .....	63
2.3.	Umwandlung von Wärme in mechanische Energie .....	65
3.	Kurze Übersicht über typische Reaktoren für die Biomassenutzung .....	65
4.	Gesamtprozesse .....	67
5.	Quellen .....	69

Im Zusammenhang mit der Minderung des Ausstoßes an fossilem CO<sub>2</sub> und der Ressourcenschonung wird neben der Effizienzsteigerung bei der Energiebereitstellung und der Energieeinsparung bei der Anwendung u.a. auch der Beitrag erneuerbarer Energieträger diskutiert.

Biomasse ist mengenmäßig eine bedeutende regenerative Energiequelle und zeichnet sich durch ihre Speicherbarkeit und planbare Verfügbarkeit aus. Derzeit besitzt der Energieträger Biomasse ein hohes, zu Teilen noch ungenutztes Potential.

Biomasse fällt in der Fläche verteilt, am Ernteort oder als z.B. landwirtschaftlicher Abfall, an. Außerdem besitzt sie einen relativ geringen Heizwert und in der Regel eine geringe Energiedichte. Dadurch ist ein Transport bezogen auf die Energieeinheit sowohl energetisch als auch ökonomisch aufwendig. Für die energetische Nutzung von Biomasse bieten sich daher vor allem kleinere, dezentrale Anlagen zur unmittelbaren Energieumwandlung in Nutzenergie und ggf. auch zur Brennstoffvorbehandlung an.

Die Biomasse wird durch chemische, biochemische oder physikalische Prozesse in thermische, elektrische oder chemische Energie in flüssigen und gasförmigen Sekundär-Bioenergieträgern umgewandelt. Entscheidend für eine wirkungsvolle

Nutzung im Hinblick auf eine  $\text{CO}_2$  (fossil) -Reduzierung und Ressourcenschonung ist die Wahl und Optimierung der zugehörigen Verfahren, d.h., insgesamt sind die Strategien der Biomassenutzung zu beurteilen. Im Folgenden werden die wesentlichen Strategien und Verfahren im Sinne eines Überblickes dargestellt. Hinsichtlich der energetischen Bilanzierung und Bewertung sei auf [8] verwiesen.

## 1. Zielstellungen und abgeleitete Nutzungsstrategien

Die Nutzungswege der Biomasse lassen sich in einem ersten Schritt nach der angestrebten Zielstellung oder Zielenergie einteilen. Von besonderer Bedeutung und hier in der Betrachtung sind

- thermische Energie als Heiz- oder Prozesswärme,
- elektrische Energie,
- chemische Energie flüssiger Brennstoffe, insbesondere für den Einsatz als Treibstoff im Transportsektor,
- chemische Energie gasförmigen Brennstoffes in Form von
  - \* Biogas,
  - \* Methan,
  - \* Wasserstoff,
  - \*  $\text{CO}/\text{H}_2$ -Synthesegas.

Hier sind verschiedene Anwendungen, wie die Einspeisung ins Erdgasnetz oder die chemische Industrie denkbar.

Ausgehend von den Zielstellungen legen Rahmenbedingungen, wie Art und Eigenschaften [1], Aufkommen, Verfügbarkeit der Biomasse die jeweilige Strategie und das Verfahrenskonzept fest.

Durch das begrenzte Potential an zur Verfügung stehender Biomasse stehen diese Anwendungen in einer Nutzungskonkurrenz. Es ist deshalb eine wichtige Aufgabe der Energietechnik, die Strategien und zugehörigen Verfahren zu bilanzieren und damit einen energetischen und ökonomischen Vergleich zu ermöglichen.

### 1.1. Umwandlung in thermische Energie

Die chemische Energie wird in der Regel durch Verbrennung in thermische Energie umgewandelt. Dieser Prozess ist in Bild 1 schematisch dargestellt.



Bild 1: Prinzipieller Ablauf der ungekoppelten Erzeugung thermischer Energie

An die Verbrennung schließt sich eine Dampferzeugung oder nur eine Wärmeübertragung auf ein Trägermedium wie Wasser oder Luft an. Bei der Umwandlung in thermische Energie lassen sich i.d.R. hohe Wirkungsgrade von etwa neunzig Prozent erreichen.

## 1.2. 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 Abnahme-Möglichkeit (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>1</sup> und nachfolgender Kreisprozess, z.B. Wasserdampfkraftprozess, ORC-Prozess,
- Umwandlung in chemische Energie durch Pyrolyse und/oder Vergasung und nachfolgender Kreisprozess, z.B. Gas-Motor, Gas-Turbine.

Die Umwandlung mechanischer Energie unter Nutzung des Generatorprinzips in elektrische Energie ist ein bekanntes, hocheffizientes Verfahren, das nicht Gegenstand der thermischen Energietechnik ist.

Die prinzipiellen Möglichkeiten der Umwandlung der Biomasse in elektrische Energie über thermische Energie – erstes Verfahrenskonzept – sind beispielhaft in Bild 2 dargestellt.

Die Auswahl geeigneter Prozessschritte und zugehöriger Apparate ist dabei vor allem von der installierten Leistung abhängig. Das Bild 3 zeigt hierzu eine Übersicht.

<sup>1</sup> Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung werden an dieser Stelle als zusammenfassender Prozess verstanden, der sich selbstverständlich aus Teilprozessen – auch in mehreren Einheiten – zusammensetzen kann [15].

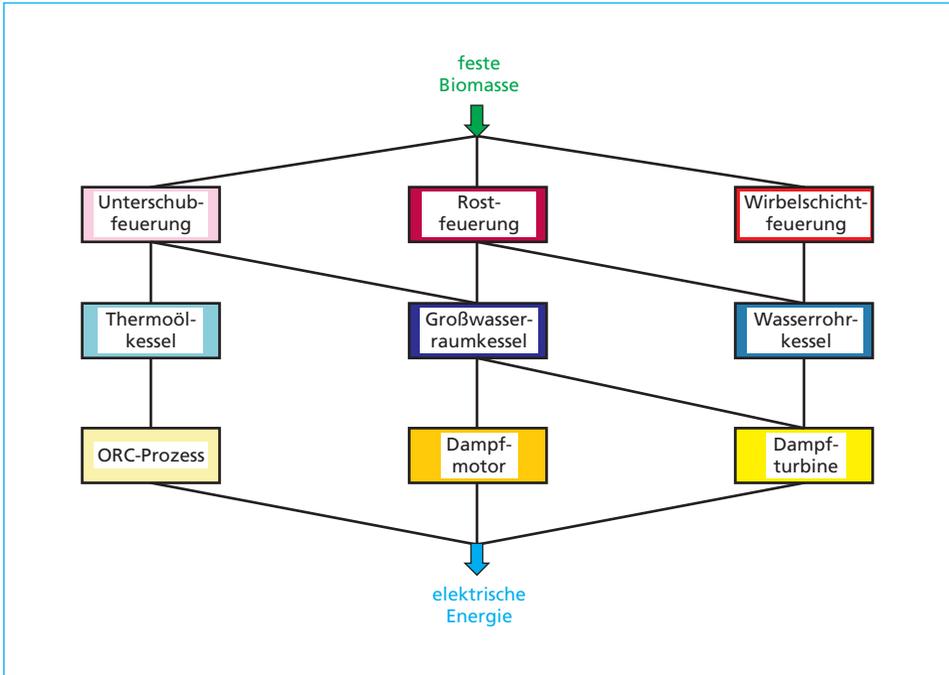


Bild 2: Apparate und Prozesse zur Erzeugung elektrischer Energie über thermische Energie

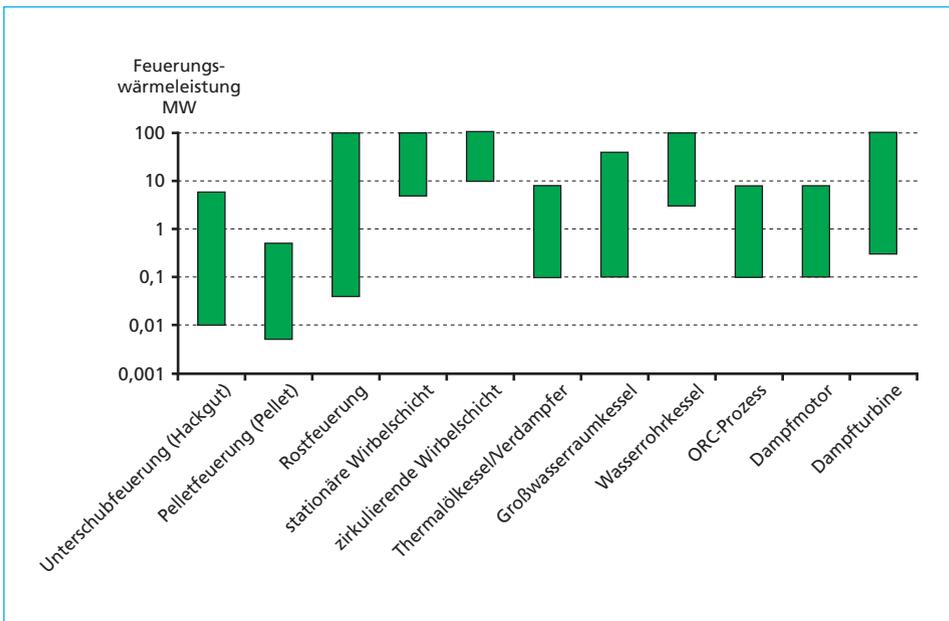
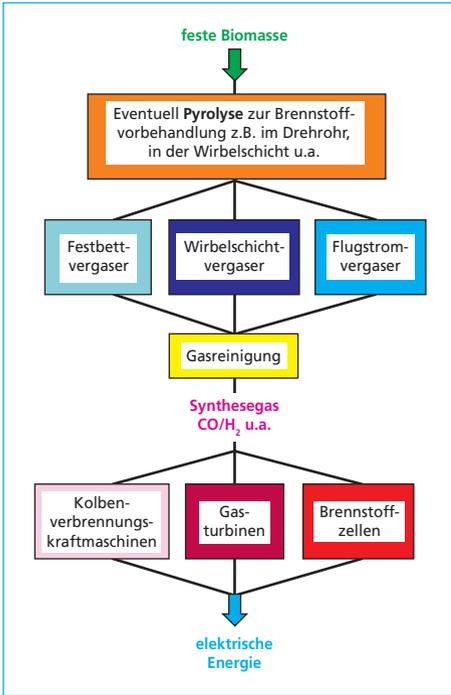


Bild 3: Apparate und Prozesse der Biomasseumwandlung in elektrische Energie über thermische Energie mit zugehörigen Leistungsbereichen



Für das zweite o.g. Verfahrenskonzept – der Umwandlung der Biomasse über chemische Energie in elektrische Energie – sind prinzipielle Möglichkeiten in Bild 4 dargestellt.

Die Auswahl geeigneter Prozessschritte und zugehöriger Apparate ist dabei ebenfalls – wie Bild 5 im Überblick zeigt – vor allem von der installierten Leistung abhängig.

Auf die Apparate und Reaktoren und die Grundprozesse wird weiter unten eingegangen.

Bild 4: Erzeugung elektrischer Energie über chemische Energie

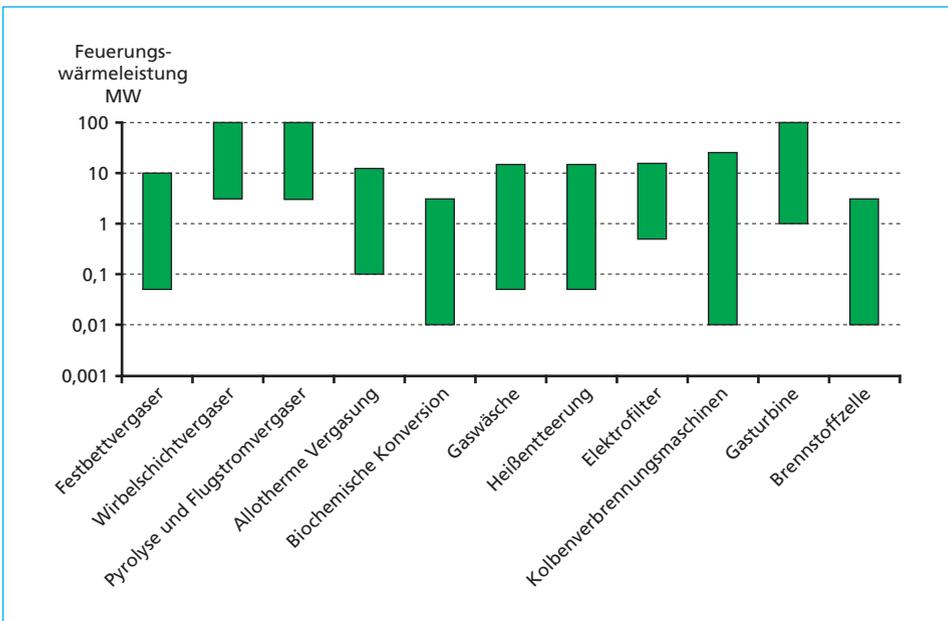


Bild 5: Apparate und Prozesse der Biomasseumwandlung in elektrische Energie über chemische Energie mit zugehörigen Leistungsbereichen

### 1.3. Erzeugung flüssiger Brennstoffe

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, etwa durch Abpressen von Pflanzenöl,
- direkte Umwandlung in flüssigen Brennstoff,
- 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 Substanzen wie Pflanzenöle – Trifettsäureglyzerylester – anreichern, wie Raps. Die Pflanzenöle können weiter durch eine Umesterung in Fettsäuremethylester – Biodiesel – veredelt werden.

Die direkte Umwandlung kann sowohl biochemisch z.B. durch Vergärung bei der Ethanolproduktion (Bild 6) als auch thermochemisch z.B. durch Hydrierung in der so genannten Direktverflüssigung erfolgen.

Ebenfalls den thermochemischen Verfahren (Bild 7) sind die Verfahren des dritten Weges zuzuordnen. Die Erzeugung eines Synthesegases wird häufig gegenüber der Direktverflüssigung trotz des Umweges und der geringeren

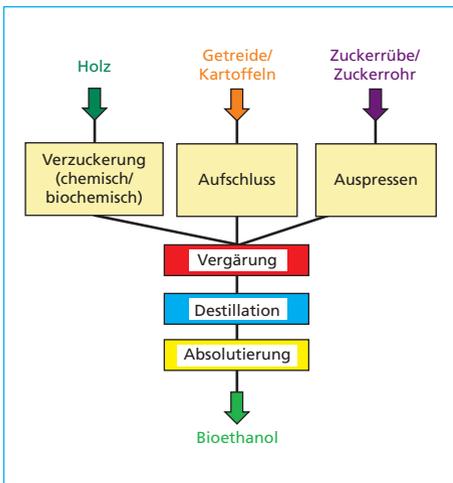


Bild 6: Herstellungswege von Bioethanol aus verschiedenen Biomassen

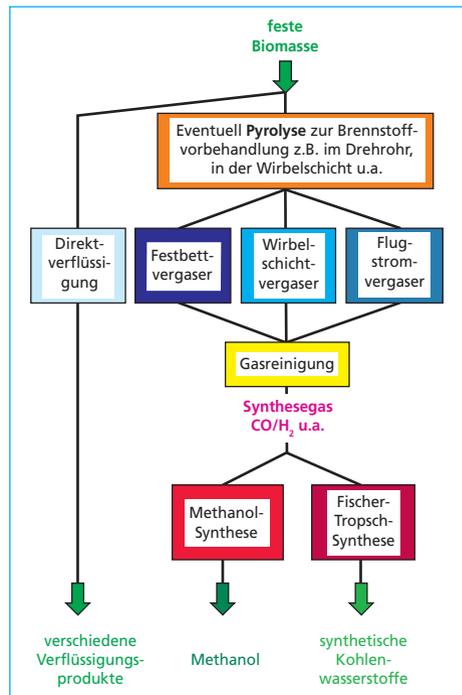


Bild 7: Die wichtigsten Wege der thermochemischen Umwandlung fester Biomassen in flüssige Brennstoffe

Effizienz bevorzugt, da ein engeres und von den veränderlichen Biomasseeigenschaften weniger abhängiges Produktspektrum erzeugt werden kann.

## 1.4. Erzeugung gasförmiger Brennstoffe

Die Erzeugung gasförmiger Brennstoffe hat eine Bedeutung, die über den in Kapitel 1.2. beschriebenen Zwischenschritt der Stromerzeugung hinausgeht. Für aus Biomasse hergestellte Gase sind die folgenden Einsatzbereiche außer der direkten Stromerzeugung zu erwarten:

- Biogas (Methan-Kohlendioxid-Gemisch) – Einspeisung in das Erdgasnetz,
- Methan – Einspeisung in das Erdgasnetz,
- Wasserstoff – die verschiedensten Prozesse der Wasserstoffwirtschaft als Energieträger und Chemierohstoff,
- Synthesegas (Wasserstoff und Kohlenmonoxid) – Einsatz als Chemierohstoff.

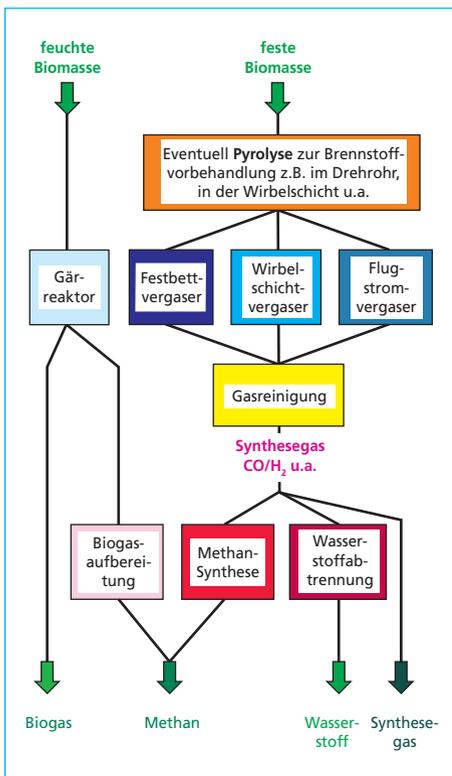


Bild 8: Die wichtigsten Wege der Herstellung von Brenngasen aus Biomasse

Außer den in den folgenden Abschnitten beschriebenen chemischen und thermodynamischen Energieumwandlungsprozessen sind für die Erzeugung von Methan und Wasserstoff auch Stofftrennprozesse von großer Bedeutung.

Dies sind, ohne Anspruch an Vollständigkeit, für die Methanproduktion:

- Absorption,
- Adsorption,
- kryogene Rektifikation,

und für die Wasserstoffgewinnung:

- Absorption,
- Adsorption,
- kryogene Rektifikation,
- Membrantrennung.

Wesentliche Herstellungswege für Brenngase aus Biomasse sind in Bild 8 dargestellt.

## 2. Grundbausteine der Umwandlung von Biomasse

Die Teilprozesse der oben aufgezeigten Prozesse, die bei den Energieumwandlungen zur energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Biomasse) eine Rolle spielen, lassen sich nach ihrem energietechnisch-thermodynamischen Charakter in drei Gruppen einteilen:

- Umwandlung von chemischer Energie in chemische Energie,
- Umwandlung von chemischer Energie in Wärme,
- Umwandlung von Wärme in mechanische Energie/elektrische Energie.

Dabei gelten folgende grundlegende Charakteristika:

- Die **Umwandlung von chemischer Energie in chemische Energie** ist Bestandteil einer Stoffumwandlung, die das Ziel der Erzeugung eines höherwertigen Brennstoffes, d.h. eines Brennstoffes mit besseren Anwendungseigenschaften, aus einem Brennstoff mit begrenzten Anwendungseigenschaften hat. Die Energieumwandlung ist hier nachgeordnet, da sich die Energieart nicht ändert. Energetisch sind dabei minimale Verluste bei der Stoffumwandlung anzustreben.
- Die **Umwandlung von chemischer Energie in Wärme** ist die Basis der Energieumwandlung mit dem Ziel thermischer Energie und der Erzeugung elektrischer Energie über thermische Energie.
- Wie bereits angedeutet ist zur **Erzeugung elektrischer Energie aus der chemischen Energie der Brennstoffe** der Weg über thermische oder chemische Energie und mechanische Energie bis heute unverzichtbar. Umwandlungsverfahren wie die Brennstoffzelle sind bei allem Potential nach wie vor Lösungen für eine mittelfristige Zukunft. Die genannte Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie – Arbeit – erfolgt in einem so genannten thermodynamischen Kreisprozess. Diese Prozesse unterscheiden sich nicht prinzipiell für verschiedene Brennstoffe. Damit entsprechen die Umwandlungsverfahren für Biomasse im Charakter denen für fossile Brennstoffe.

Alle Umwandlungsketten von der Primärenergie zur verteilbaren Sekundärenergie sind aus verschiedenen Bausteinen, die in die genannten drei Kategorien gehören, zusammensetzbar. Diese Bausteile reihen sich in der Regel zum Gesamtprozess.

In den folgenden Tabellen sind die wesentlichen Eigenschaften und Kennzahlen der wichtigsten Teilprozesse zusammengefasst.

## 2.1. Umwandlung von chemischer Energie in chemische Energie

Tabelle 1: Langsame Pyrolyse

<b>Umwandlung</b>
chemische Energie eines festen Brennstoffes in chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes, von festem Kohlenstoff und von flüssigen Verbindungen
<b>typische Reaktoren</b>
Schachtreaktoren, Retorten, Schneckenreaktoren usw.
<b>typischer Leistungsbereich</b>
einige 100 kW <sub>th</sub> – einige MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>
400 – 800 °C, Normaldruck, lange Verweilzeit
<b>Zielenergie</b>
chemische Energie des Pyrolysegases und des festen Kohlenstoffes
<b>Ausgangsstoffe</b>
trockene Biomasse, z.B. Holz, Stroh, Schilf, usw.
<b>Produkte</b>
Pyrolysegas, Pyrolysekoks, Pyrolyseöl
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>
<b>Wirkungsgrade</b>
$\eta_{\text{Pyrolyse}} = 0,6$ bis $0,9$ (bezogen auf alle Produkte)

Tabelle 2: Flash-Pyrolyse

<b>Umwandlung</b>
chemische Energie eines festen Brennstoffes in chemische Energie eines flüssigen (und eines festen und eines gasförmigen) Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>
Schneckenmischer, Wirbelschichtreaktoren, Zyklonreaktoren, ablative Reaktoren
<b>typischer Leistungsbereich</b>
einige 100 kW <sub>th</sub> – einige MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>
400 – 500 °C, Normaldruck, Verweilzeit wenige Sekunden bis Sekundenbruchteile
<b>Zielenergie</b>
chemische Energie eines Pyrolyseöles
<b>Ausgangsstoffe</b>
trockene Biomasse, z.B. Holz, Stroh, Schilf, usw.
<b>Produkte</b>
Pyrolyseöl, Pyrolysegas, Pyrolysekoks
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>
<b>Wirkungsgrade</b>
$\eta_{\text{Pyrolyse}} = 0,6$ bis $0,9$ (bezogen auf alle Produkte)

Tabelle 3: Thermochemische Biomassevergasung (autotherm, Festbett)

<b>Umwandlung</b>	chemische Energie eines festen Brennstoffes in chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>	Schichtreaktoren im Gleich- und Gegenstrom
<b>typischer Leistungsbereich</b>	100 kW <sub>th</sub> – 5 MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>	800 – 1.200 °C, Normaldruck
<b>Zielenergie</b>	chemische Energie eines Brenngases
<b>Ausgangsstoffe</b>	trockene Biomasse, z.B. Holzhackschnitzel, Stroh, Schilf, usw. Luft
<b>Produkte</b>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>	höhere Kohlenwasserstoffe (Teer)
<b>Wirkungsgrade</b>	Kaltgaswirkungsgrad $\eta_{\text{Vergaser}} = 0,6$ bis 0,85

Tabelle 4: Thermochemische Biomassevergasung (autotherm, Wirbelschicht)

<b>Umwandlung</b>	chemische Energie eines festen Brennstoffes in chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>	stationäre und instationäre Wirbelschichtreaktoren
<b>typischer Leistungsbereich</b>	5 MW <sub>th</sub> – 50 MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>	750 – 900 °C, Normaldruck, Druckvergasung in Pilotanlagen
<b>Zielenergie</b>	chemische Energie eines Brenngases
<b>Ausgangsstoffe</b>	trockene Biomasse, z.B. Holzhackschnitzel, Stroh, Schilf, usw. Luft, Sauerstoff-Dampf-Gemisch
<b>Produkte</b>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>	höhere Kohlenwasserstoffe (Teer)
<b>Wirkungsgrade</b>	Kaltgaswirkungsgrad $\eta_{\text{Vergaser}} = 0,7$ bis 0,85

Tabelle 5: Thermochemische Biomassevergasung (autotherm, Flugstrom)

<b>Umwandlung</b>	chemische Energie eines festen oder flüssigen Brennstoffes in chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>	Flugstromreaktoren
<b>typischer Leistungsbereich</b>	5 MW <sub>th</sub> – 50 MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>	1.000 – 1.600 °C, Normaldruck oder Druckvergasung
<b>Zielenergie</b>	chemische Energie eines Brenngases
<b>Ausgangsstoffe</b>	aufbereitete Biomasse, z.B. Pyrolyseöl, Pyrolysekoks, Pyrolysegas, Slurrys Luft, Sauerstoff-Dampf-Gemisch
<b>Produkte</b>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>	
<b>Wirkungsgrade</b>	Kaltgaswirkungsgrad $\eta_{\text{Vergaser}} = 0,7$ bis 0,85

Tabelle 6: Fischer-Tropsch-Synthese

<b>Umwandlung</b>	chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes in chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>	heterogene Katalyse, Festbett und Wirbelschichtreaktoren
<b>typischer Leistungsbereich</b>	viele 10 MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>	200 – 400 °C, Normaldruck bis 30 bar
<b>Zielenergie</b>	chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes/Treibstoffes
<b>Ausgangsstoffe</b>	H <sub>2</sub> , CO
<b>Produkte</b>	Kohlenwasserstoffe
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>	Wasser
<b>Wirkungsgrade</b>	Umwandlungswirkungsgrad bezogen auf Synthesegas $\eta_{\text{Synthese}} = 0,45$ bis 0,55

Tabelle 7: Vergärung (Biogas-Prozess)

<b>Umwandlung</b>
chemische Energie eines festen/pastösen Brennstoffes in chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes (Biogas)
<b>typische Reaktoren</b>
Gärbehälter (Rührkessel), selten Feststofffermenter (regellose Haufwerke)
<b>typischer Leistungsbereich</b>
10 kW <sub>th</sub> – einige 100 kW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>
40 – 80 °C, Normaldruck
<b>Zielenergie</b>
chemische Energie eines Brenngases
<b>Ausgangsstoffe</b>
feuchte Biomasse, Gülle, Maissilage, Abfälle aus der Nahrungsmittelproduktion usw.
<b>Produkte</b>
CH <sub>4</sub>
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>
CO <sub>2</sub>
<b>Wirkungsgrade</b>
$\eta_{\text{Vergärung}} = 0,4 \text{ bis } 0,6$

Tabelle 8: Bioethanolgewinnung

<b>Umwandlung</b>
chemische Energie eines festen/flüssigen Brennstoffes in chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>
Gärbehälter (Rührkessel)
<b>typischer Leistungsbereich</b>
einige MW <sub>th</sub> – einige 10 MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>
10 – 40 °C, Normaldruck
<b>Zielenergie</b>
chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes
<b>einsetzbare Biomasse</b>
Getreide, Zuckerrüben, Zuckerrohr, Holz nach chemischem Aufschluss
<b>Produkte</b>
Ethanol
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>
Schlempe/Bagasse; CO <sub>2</sub>
<b>Wirkungsgrade</b>
$\eta_{\text{Mais}} = 0,15; \eta_{\text{Holz}} = 0,2; \eta_{\text{Zuckerrohr}} = 0,35$ je nach den gezogenen Bilanzrahmen und der Art der Bilanzierung werden Wirkungsgrade bis gegen Null ermittelt

Tabelle 9: Pflanzenöl (Kaltpressung)

<b>Umwandlung</b>	chemische Energie eines festen Brennstoffes in chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes
<b>typische Reaktoren</b>	Pressen, es findet keine chemische Reaktion statt
<b>typischer Leistungsbereich</b>	kleine und mittlere Anlagen
<b>typische Parameter</b>	Umgebungstemperatur
<b>Zielenergie</b>	chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes
<b>einsetzbare Biomasse</b>	Raps, Sonnenblumen, Oliven usw.
<b>Produkte</b>	Pflanzenöl (Triglyzerid)
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>	Presskuchen
<b>Wirkungsgrade<sup>1</sup></b>	$\eta_{\text{Presse}} = 0,4 \text{ bis } 0,5$

<sup>1</sup> Stelzer, T.: Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen – Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Diss. TU Stuttgart, 1999

## 2.2. Umwandlung von chemischer Energie in Wärme

Tabelle 10: Verbrennung fester Brennstoffe

<b>Umwandlung</b>	chemische Energie eines festen Brennstoffes in Wärmeenergie
<b>typische Reaktoren</b>	einfache Festbettfeuerungen (Unterschubfeuerungen, einfache Rostfeuerungen usw.) technische Rostfeuerungen Wirbelschichtfeuerungen
<b>typischer Leistungsbereich</b>	einfache Festbettfeuerungen $5 \text{ kW}_{\text{th}} - 5 \text{ MW}_{\text{th}}$ technische Rostfeuerungen $500 \text{ kW}_{\text{th}} - 100 \text{ MW}_{\text{th}}$ Wirbelschichtfeuerungen $5 \text{ MW}_{\text{th}} - > 100 \text{ MW}_{\text{th}}$
<b>typische Parameter</b>	einfache Festbettfeuerungen $800 - 1.200 \text{ }^\circ\text{C}$ , Normaldruck technische Rostfeuerungen $800 - 1.400 \text{ }^\circ\text{C}$ , Normaldruck Wirbelschichtfeuerungen $800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ , Normaldruck
<b>Zielenergie</b>	Wärmeenergie
<b>einsetzbare Biomasse</b>	trockene Biomasse, z.B. Holz, Stroh, Schilf usw.
<b>Produkte</b>	–
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>	Asche, Abgas
<b>Wirkungsgrade</b>	einfache Festbettfeuerungen $\eta_{\text{Feuerung}} = 0,7 \text{ bis } 0,9$ (Brennwertnutzung bis $> 1$ ) technische Rostfeuerungen $\eta_{\text{Feuerung}} = 0,8 \text{ bis } 0,95$ Wirbelschichtfeuerungen $\eta_{\text{Feuerung}} = 0,8 \text{ bis } 0,95$

Tabelle 11: Verbrennung flüssiger Brennstoffe

<b>Umwandlung</b>
chemische Energie eines flüssigen Brennstoffes in Wärmeenergie
<b>typische Reaktoren</b>
Brennkammersysteme
<b>typischer Leistungsbereich</b>
einige kW <sub>th</sub> – viele MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>
1.000 – 1.600 °C, Normaldruck
<b>Zielenergie</b>
Wärmeenergie
<b>einsetzbare Biomasse</b>
Pyrolyseöl, Slurries, Pflanzenöl (Kleinanlagen)
<b>Produkte</b>
–
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>
Abgas, (Asche)
<b>Wirkungsgrade</b>
$\eta_{\text{Feuerung}} = 0,8 \text{ bis } 0,95$ (Brennwertnutzung bis > 1)

Tabelle 12: Verbrennung gasförmiger Brennstoffe

<b>Umwandlung</b>
chemische Energie eines gasförmigen Brennstoffes in Wärmeenergie
<b>typische Reaktoren</b>
Brennkammersysteme
<b>typischer Leistungsbereich</b>
einige kW <sub>th</sub> – viele MW <sub>th</sub>
<b>typische Parameter</b>
1.000 – 1.600 °C, Normaldruck
<b>Zielenergie</b>
Wärmeenergie
<b>einsetzbare Biomasse</b>
Pyrolysegas, Synthesegas aus der Vergasung, Biogas
<b>Produkte</b>
–
<b>Nebenprodukt/typische Schadstoffe</b>
Abgas
<b>Wirkungsgrade</b>
$\eta_{\text{Feuerung}} = 0,8 \text{ bis } 0,95$ (Brennwertnutzung bis > 1)

## 2.3. Umwandlung von Wärme in mechanische Energie

Für die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie eignet sich eine Vielzahl von Prozessen, die auf den bekannten thermodynamischen Kreisprozessen beruhen und nicht spezifisch für die Nutzung von Biomasse sind. Dies sind vor allem:

- Wasserdampfkraftprozesse unter Nutzung von Dampfturbinen, Dampfmaschinen und Dampfschraubenmotoren;
- Dampfkraftprozesse mit nichtwässrigem Arbeitsmedium (ORC-Prozesse),
- Gasturbinenprozesse,
- Verbrennungsmotorenprozesse,
- Stirlingprozesse.

Weiterhin existieren die so genannten Brennstoffzellen, mit denen eine direkte Umwandlung der chemischen Energie vor allem von Brenngasen, wie Wasserstoff und Methan, in elektrische Energie möglich ist. Ihr Einsatz ermöglicht hohe Wirkungsgrade, da Brennstoffzellen nicht an den Carnotwirkungsgrad gebunden sind. Ihr Einsatz wird mittelfristig erwartet.

## 3. Kurze Übersicht über typische Reaktoren für die Biomassenutzung

Für die Reaktionen zwischen Gas und Feststoffen beziehungsweise heterogen katalysierte Gasphasenreaktionen werden hauptsächlich drei Reaktortypen eingesetzt:

- Festbettreaktoren,
- Wirbelschichtreaktoren,
- Flugstromreaktoren.

Diese Reaktoren unterscheiden sich im Wesentlichen durch das Verhältnis zwischen der auf den Feststoff wirkenden Gewichtskraft und der am Feststoff wirkenden Transportkraft durch die Strömung des Gases. Diese ist der Gewichtskraft entgegen gerichtet, wenn das Gas entgegen der Richtung der Gewichtskraft strömt. Diese Kraftverhältnisse folgen neben der Strömungsgeschwindigkeit aus der Korngröße des Feststoffes. Als Ergebnis der Kraftwirkungen folgt eine spezifische Relativbewegung zwischen Gas und Feststoff sowie zwischen Feststoff und Reaktor.

Dabei gelten die folgenden Verhältnisse (Bild 9):

- **Festbettreaktor:** hohe Korngrößen des Feststoffes, die Transportkraft  $F_T$  ist viel kleiner als die Gewichtskraft  $F_G$ , der Feststoff ruht im Reaktor oder wird durch mechanische Einrichtungen bewegt,
- **Wirbelschichtreaktor:** mittlere Korngrößen, die Transportkraft  $F_T$  ist gleich der Gewichtskraft  $F_G$ , Feststoff befindet sich in Schwebelage (Wirbelbett),
- **Flugstromreaktor:** kleine Korngrößen, die Transportkraft  $F_T$  ist größer der Gewichtskraft  $F_G$ , Feststoff wird mit Gas transportiert.

Dabei sind die Rostfeuerung und der Schachtreaktor Sonderfälle des Festbettreaktors. Für den Wirbelschichtreaktor existieren zwei grundlegende Ausführungsformen, die zirkulierende und die stationäre Wirbelschicht. Die häufigste Umsetzungsform des Flugstromreaktors in der Energietechnik sind die Brennkammersysteme.

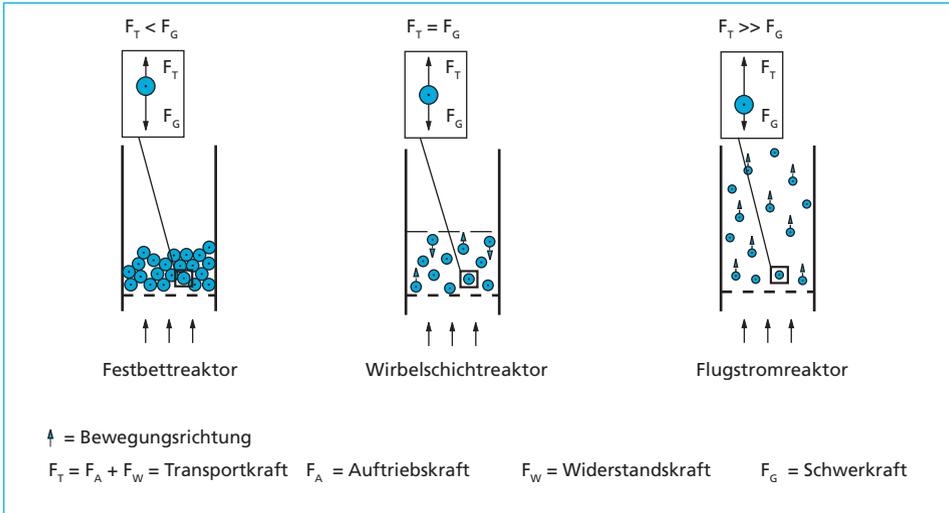


Bild 9: Kraftwirkungen am Feststoffpartikel und Bewegungsrichtungen für die Reaktorgrundtypen

In [15] sind die Apparate der thermischen Energietechnik umfangreich beschrieben. Tabelle 13 zeigt eine Zusammenfassung in Anlehnung an [15].

Tabelle 13: Grundcharakteristika der Reaktoren der thermischen Energietechnik

Apparatyp	Einsatzstoff	Temperatur	Verweilzeit	Vermischung des Feststoffes	Vermischung des Feststoffes mit dem Gas	Steuerung der Prozessbedingungen über den Reaktionsweg	Beispiele für den Einsatzbereich
Brennkammer	flüssig, gasförmig, staubförmig	bis 1.500 °C	im Sekundenbereich	sehr gut	sehr gut	sehr gut möglich	Nachverbrennung (Stäube, Abgase) Vergasungsreaktion, Verbrennung
Rost	stückig, pastös	~ 850 °C	~2 h	gut	sehr gut	sehr gut möglich	Verbrennung (z.B. Hausmüll) Vergasung (z.B. Hausmüll)
Wirbelschicht	Feststoff mit enger Korngrößenverteilung, flüssig	~ 850 °C	im Minutenbereich	sehr gut	sehr gut	nicht möglich	Verbrennung (z.B. Klärschlamm) Druckvergasung
Schachtreaktor	Schüttgut (fest), flüssig	bis 1.600 °C	Stunden- bis Tagebereich	bedingt	sehr gut	bedingt möglich	Druckvergasung, Schlackeeinsmelzung

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner, 2001

Die biochemischen Vorgänge finden in der Regel in Rührkesselreaktoren statt. Sie sind gekennzeichnet durch:

- Einsatzstoff in pastöser oder Suspensionsform,
- gute (ideale) Durchmischung,
- keine Steuermöglichkeit über den Reaktionsweg,
- Verweilzeit in Tagen,
- prozessbedingt Temperaturen unter 100 °C.

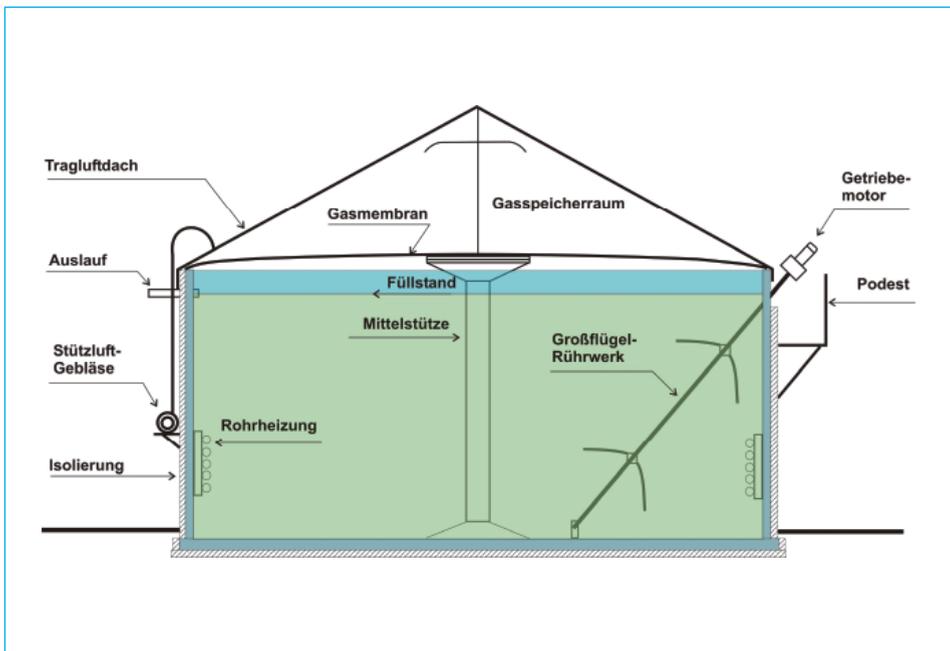


Bild 10: Schematische Darstellung eines Rührkesselreaktors einer Biogasanlage

Quelle: [www.fnr.de](http://www.fnr.de)

## 4. Gesamtprozesse

Die in Anwendung befindlichen Gesamtprozesse sind i.d.R. aus den unter Kapitel 2 beschriebenen Teilprozessen und den in Kapitel 3 genannten Apparaten zusammengesetzt. Bei der Bewertung von Anlagen zur Biomassenutzung ist

besonders zu beachten, dass die Wirkungsgrade von Teilprozessen als Produkt in den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses eingehen.

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots$$

Somit lassen sich alle Verfahren der Biomassenutzung über wenige, immer wieder vorkommende Teilprozesse beschreiben. Wegen der erwähnten Produktbildung bei der Zusammenfassung der Wirkungsgrade ist abzusehen, dass in der Regel einfache Prozesse die höchste Effizienz besitzen und hochkomplexe Gesamtprozesse nur in Ausnahmefällen zu bevorzugen sind. Zur Bilanzierung von Gesamtprozessen der energetischen Biomassenutzung sei an dieser Stelle auf [8] verwiesen.

Im Folgenden seien beispielhaft vier Gesamtprozesse kurz dargestellt:

- Biomasse-Heizkraftwerk,
- Biomasse-Vergasungsblockheizkraftwerk-Verfahren,
- Choren-Verfahren zur Herstellung synthetischen Dieselkraftstoffes,
- Bioliq-Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe.

wobei hier in Bezug auf den Stand der Entwicklung, Entwicklungs- und Optimierungspotential usw. auf das zugehörige Schrifttum verwiesen sei.

Biomasse-Heizkraftwerk (z.B. [2, 6, 12, 13, 16]) und Biomasse-Vergasungsblockheizkraftwerk (z.B. [3, 5, 9, 10, 11, 13, 17]) sind die beiden typischen Lösungen zur Erzeugung von elektrischer Energie aus Biomasse, oft unter Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung (Bilder 11 und 12). Wie in Kapitel 1.2. ausgeführt, ist ein wichtiges Entscheidungskriterium zwischen diesen Varianten die Leistungsgröße, wobei mit steigender Leistung das Biomasseheizkraftwerk, aufbauend auf dem Wasserdampfprozess immer deutlicher bevorzugt ist.

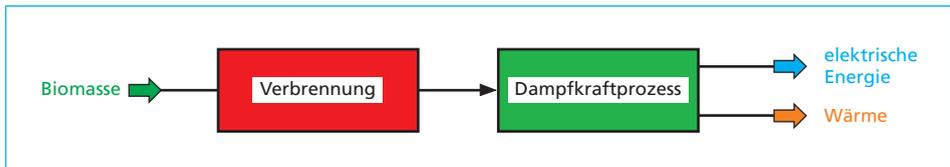


Bild 11: Prinzipielle Darstellung eines Biomasse-Heizkraftwerkes

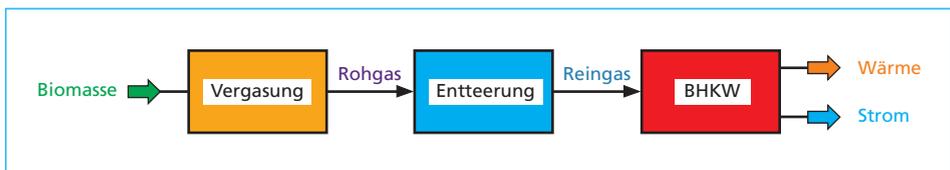


Bild 12: Prinzipielle Darstellung eines Biomasse-Vergasungsblockheizkraftwerkes

Das Verfahren der Freiburger Firma Choren [7, 14] (Bild 13) geht von einer langsamen Pyrolyse der Biomasse als ersten Umwandschritt aus. Die Produkte, der Pyrolysekoks und ein heißes, gasförmiges Gemisch aus dem Pyrolysegas und Dämpfen des Pyrolyseöls werden in einem Flugstromvergaser als 2. Einheit vergast. Nach Angaben der Entwickler erübrigt sich durch die hohen Vergasungstemperaturen eine Gasreinigung. Das gebildete Synthesegas wird zur Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe in der Fischer-Tropsch-Synthese eingesetzt. Diese synthetischen Kohlenwasserstoffe können zu Dieselöl weiterverarbeitet werden.

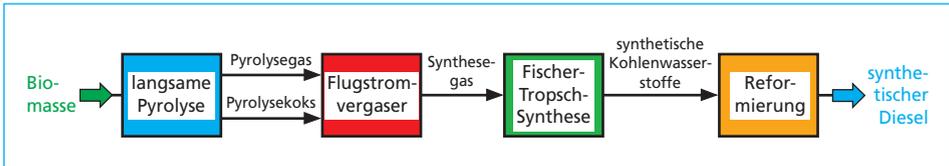


Bild 13: Prinzipielle Darstellung des Choren-Verfahrens zur Herstellung synthetischen Diesels

Im Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe [4] (Bild 14) zur Herstellung synthetischen Diesels sind prinzipiell ähnliche Verfahrensgrundbausteine wie im Choren-Verfahren enthalten. Zur ersten Umwandlung der Biomasse dient eine Flash-Pyrolyse, wodurch die Produkte nicht von gasförmigen sondern bei Raumtemperatur flüssigen Verbindungen dominiert werden. Der wesentliche Unterschied der Gesamtkette liegt in der Herstellung einer Suspension – Slurry – aus Pyrolyseöl und Pyrolysekoks als Zwischenprodukt. Die Suspension ist deutlich besser als die Biomasse transportierbar, so dass die Möglichkeit besteht, diese aus vielen Pyrolyseanlagen an einer Vergasungsanlage zu sammeln oder als eigenständiges Produkt, etwa als Heizölersatz, zu verkaufen.

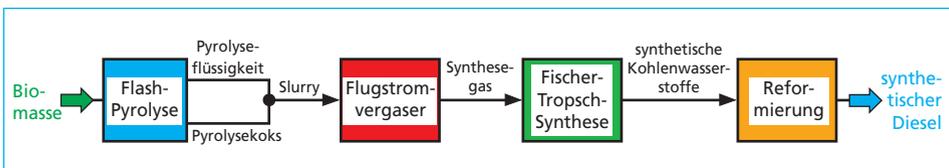


Bild 14: Prinzipielle Darstellung des Verfahrens des Forschungszentrums Karlsruhe zur Herstellung synthetischen Diesels

## 5. Quellen

- [1] Beckmann, M.; Pohl, M.; Ncube, S.; Gebauer, K.: Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in: Müllmagazin – RECYCLINGPOTENZIALE IN EUROPA (6/2008), Rhombos Verlag.
- [2] Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. Erschienen in: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witzenhausen. XVIII. Kasseler Abfallwirtschaftskonferenz, 25.-27. April 2006. ISBN 3-928673-46-7, S. 180-205.

- [3] Böhning, D.; Klemm, M.: Aufbereitung teerhaltiger Brenngase aus der Biomassevergasung. 40. Jahrestreffen Deutscher Katalytiker. Weimar 14.-16. März 2007
- [4] Dahmen, N.; Dinjus, E.; Henrich, E.: Das Karlsruher bioliq®-Verfahren – Stand und Entwicklung. Tagung Mobil mit Biomasse. Stuttgart 27. September 2006
- [5] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse. Landwirtschaftsverlag Münster 2006
- [6] Gilli, P. G.; Brandstätter, G.: Heizkraftwerk mit überkritischen Dampfparametern und Biomassenutzung. 34. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden September 2002
- [7] Kernstück der Technologie: Das CARBO-V®-Verfahren, Technik. Internet: 03.07.2008 ([http://www.choren.com/de/biomass\\_to\\_energy/carbo-v-technologie/](http://www.choren.com/de/biomass_to_energy/carbo-v-technologie/))
- [8] Klemm, M.; Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von fossilen Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe und Biomasse. 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium. Dresden 14.-15. Oktober 2008
- [9] Klemm, M.; Wilhelm, R.; Hiller, A.: Dezentrale Energieversorgung auf Basis einer Biomassefestbettvergasung in einem virtuellen Kraftwerksverbund. XXXVII Kraftwerkstechnisches Kolloquium *Heizkraftwerke und dezentrale Energieerzeuger* Dresden 18.-19. Oktober 2005
- [10] Klemm, M.; Hiller, A.; Wilhelm, R.; Schneider, M.: Erzeugung eines anwendungsgerechten Brenngases aus Biomasse in einem System aus Gleichstromvergaser und Heißentteerung. VDI Expertenforum Entwicklungslinien der Energietechnik Bochum 7.-8. September 2004
- [11] Klemm, M.: Katalytische partielle Oxidation löst Kernproblem der Biomassevergasung. Erdöl-Erdgas-Kohle 121 (2005) H. 10 S. 356-359
- [12] Obernberger, I.; Hammerschmitt, A.: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien. Graz dbv-Verlag 1999
- [13] Obernberger, I.; Biedermann, F.: Combustion and Gasification of solid Biomass for heat and power production in Europe – state-of-the-art and relevant future developments. 2005
- [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] Spiegel, W. et al.: Korrosions-Früherkennung bei Abfall-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 235-258
- [17] Steinbrecher, N.; Walter, J.: Marktübersicht dezentrale Holzvergasung: Marktanalyse 2000 für Holzvergaserysteme bis 5 MW. Erstellt für das Ökoinstitut. Darmstadt 2001
- [18] Stelzer, Th.: Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen – Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Diss. TU Stuttgart 1999