

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Substitution der fossilen Brennstoffe durch erneuerbare Energien ist einer der Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung beizutragen. Der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtprimärenergieverbrauch lag im Jahr 2007 in Deutschland bei 6,7 %. Den bedeutendsten erneuerbaren Energieträger stellte hierbei die Biomasse mit 5,1 % am Primärenergieverbrauch dar. Etwa 55 % Wärme, 30 % Kraftstoffe und 15 % Strom wurden bezogen auf die Endenergie aus Biomasse (einschließlich Deponie- und Klärgas sowie der biogene Anteil des Abfalls) erzeugt. Bei der Wärmeerzeugung spielen vorrangig feste Biomassen (größer 90 %) und nur untergeordnet flüssige Biomassen und biogene gasförmige Brennstoffe (kleiner 10 %) eine Rolle. Dagegen werden bei der Stromerzeugung mehr als 50 % flüssige Biomassen und Biogas und nur etwa 49 % feste Biomassen eingesetzt (Bild 1.1). [1]

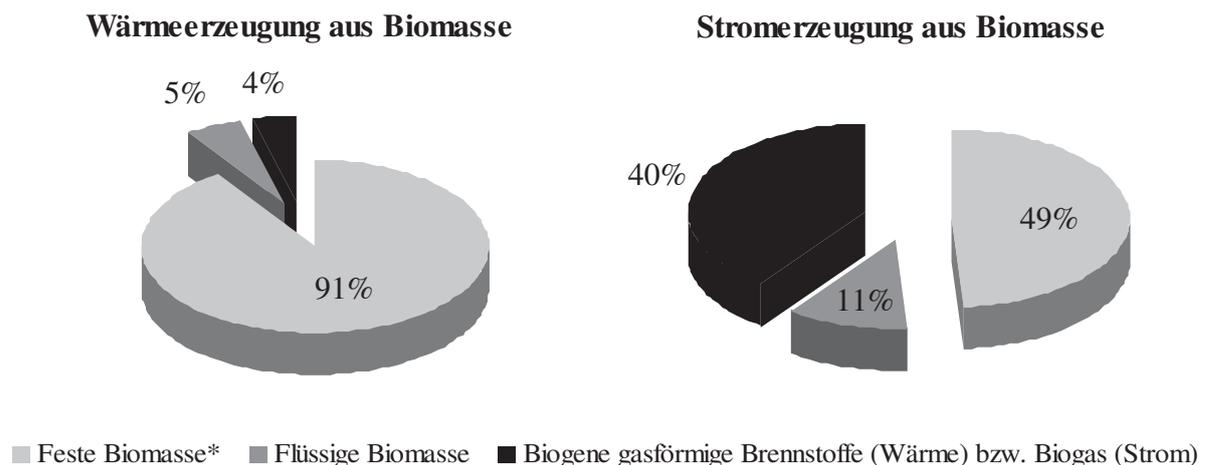


Bild 1.1 Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse (* einschließlich biogener Abfall) [1]

Obwohl der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtprimärenergieverbrauch noch relativ gering ist, hat er aufgrund der guten Förderbedingungen (z. B. durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und das Marktanzreizprogramm für Erneuerbare Energien) in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen und ist von 2,6 % im Jahr 2000 auf 6,7 % im Jahr 2007 gestiegen [1]. Mit einem weiteren Zuwachs ist aufgrund der nationalen und europäischen Vorgaben und den Zielen zur Erhöhung des Anteils von Erneuerbaren Energien auf 20 % des Endenergieverbrauchs in 2020 zu rechnen. Langfristig soll der Anteil sogar auf 50 % ansteigen. Einen nicht unerheblichen Anteil wird dabei die Biomasse und nicht zuletzt auch biogene Reststoffe und Abfälle liefern müssen.

Neben den bereits heute genutzten Biomassen, wie z. B. Brennholz, Holzreste aus der Holzverarbeitenden Industrie, Altholz und teilweise Stroh, bleiben andere Biomassen und biogene Reststoffen, wie z. B. Waldrestholz, Grünschnitt, Straßenbegleitgrün, biogene Rückstände aus der Landwirtschaft sowie Energiepflanzen, bisher noch ungenutzt. Das für die energetische Nutzung jährlich verfügbare Potenzial an biogenen Reststoffen und Abfällen beträgt in Deutschland bis zu 550 PJ und könnte mit rund vier Prozent einen nicht unerheblichen Anteil des derzeitigen Primärenergiebedarfs decken [1]. Das Interesse an der energetischen Nutzung dieser eher minderwertigen Biomassen steigt aber auch aufgrund dessen, dass diese Reststoffe zu relativ niedrigen Preisen erhältlich sind. Durch den erhöhten Bedarf an Holz, sowohl zur stofflichen als auch zur energetischen Verwertung, sowie die limitierte Verfügbarkeit hochwertiger Biomasse sind die Brennstoffkosten in den letzten Jahren mitunter erheblich gestiegen. Hohe Brennstoffkosten behindern aber einen wirtschaftlichen Betrieb und der Einsatz kostengünstigerer Biomassepotentiale wird notwendig. Gründe für die bisher noch geringe Ausschöpfung dieses Biomassepotentials liegen u. a. in den hohen Kosten für die Konversionstechnologien zur Wärme- und Stromerzeugung. Da sich die nicht-holzartigen Biomassen mitunter in erheblichem Maße in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften von Holz unterscheiden, können diese Biomassen nicht ohne weiteres in konventionellen Biomassekonversionsanlagen genutzt werden.

So kann die Verbrennung von nicht-holzartiger Biomassen aufgrund ihrer geringen Ascheerweichungstemperatur im Anlagenbetrieb zu erheblichen Problemen führen. Biomassen mit geringem Ascheschmelzpunkt sollten daher möglichst bei geringen Temperaturen verbrannt werden, um ein Aufschmelzen der Asche zu verhindern. Geringe Verbrennungstemperaturen können aber wiederum zu erhöhten CO-Emissionen führen. Eine Möglichkeit zur Nutzung von Biomassen mit niedriger Ascheschmelztemperatur ist die gestufte Verbrennung, bei der die festen Biomassen zunächst bei niedrigen Temperaturen entgast und anschließend bei hohen Temperaturen verbrannt werden. Bedingung für die Verbrennung in einem konventionellen Brenner ist, dass das entstandene Entgasungsgas einen ausreichenden Heizwert ($H_u > 5 \text{ MJ/m}^3_{i,N.}$) aufweist, um stabil verbrannt werden zu können.

Weiterhin sind nicht-holzartige Biomassen und Reststoffen oft durch hohe Gehalte an Stickstoff u. a. Schadkomponenten (Chlor, Schwefel etc.) gekennzeichnet. Ohne Anpassungen an der Konversionstechnologie und zusätzlichen Reinigungsmaßnahmen kann der Einsatz dieser Biomassen zu erhöhten Emissionen führen. So wurden z. B. bei der Verbrennung von Stroh, Gras und Miscanthus NO_x-Emissionen zwischen 300 bis 800 mg/m³ gemessen [2]. Die Reduktion von NO_x ist eines der Hauptthemen bei der energetischen Nutzung von Biomasse, besonders bei stickstoffreichen Biomassen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine innovative Verbrennungstechnologie, die Flammlose Oxidation (FLOX[®] - eingetragenes Warenzeichen der Fa. WS Wärmeprozess-technik GmbH), aus dem Bereich fossiler Brennstoffe zu nutzen und für den Einsatz von biogenen Brennstoffen anzupassen. FLOX[®]-Brenner für Erdgas sind bereits kommerziell verfügbar und finden besonders in Hochtemperaturprozessen ihre Anwendung. Die Flammlose Oxidation von Erdgas ist hierbei gekennzeichnet durch niedrige Emissionen an CO und NO_x bedingt durch eine starke interne Rauchgasrezirkulation. Als weiterer Vorteil der FLOX[®]-Technik ist neben den niedrigen Schadstoffemissionen aber auch die hohe Verbrennungsstabilität selbst bei niedriger Brenngasqualität und schwankender Gaszusammensetzung zu nennen.

Bei der Verbrennung von minderwertigen Biomassen können die stark wechselnden Brennstoffqualitäten (z. B. Heizwert und Wassergehalt) zu einer unzureichenden Flammenstabilität und hohen Emissionen in Verbrennungsanlagen führen. Durch Einsatz eines FLOX[®]-Brenners könnten diese Probleme bei der energetischen Nutzung von minderwertiger nicht-holzartiger Biomasse im Leistungsbereich kleiner 1 MW_{th} überwunden werden. Im Rahmen der Arbeit soll daher ein Brenner für biogene Schwachgase basierend auf der Flammlosen Oxidation entwickelt und in eine Vorofenfeuerung integriert werden, um die energetische Nutzung von nicht-holzartiger Biomasse mit minderer Qualität bei gleichzeitig geringen Schadstoffemissionen zu ermöglichen.

Zunächst soll untersucht werden, inwieweit eine konventionelle Vorofenfeuerung, die das Konzept der gestuften Verbrennung realisiert und für die Verbrennung von Holzhackschnitzeln ausgelegt wurde, bereits für den Einsatz von nicht-holzartiger Biomasse geeignet ist. Hierbei sollen gegebenenfalls Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden, die eine Nutzung nicht-holzartiger Brennstoffe in einer Vorofenfeuerung ermöglichen können. Anschließend soll ein FLOX[®]-Brenner für die im Vorofen entstehenden Entgasungsgase entwickelt und getestet werden, um das Potential der FLOX[®]-Technik für die Nutzung nicht-holzartiger Biomassen in einer Vorofenfeuerung zu bewerten. Der Fokus soll hierbei auf der Minderung der NO_x-Emissionen bei Einsatz stickstoffreicher Biomassen liegen. Möglichkeiten zur Optimierung des FLOX[®]-Brennerdesigns und -betriebs hinsichtlich der Verbrennungsstabilität und Schadstoffemissionen sollen identifiziert und unter Verwendung von rechnergestützten Simulationsrechnungen und experimentellen Ergebnissen untersucht werden.



2 Kenntnisstand

2.1 Biogene Reststoffe

2.1.1 Aufkommen und Potenzial

Deutschland verfügt insgesamt über 17 Mio. ha landwirtschaftlich genutzte Fläche, wovon 12 Mio. ha als Ackerfläche und 5 Mio. ha als Grünlandfläche genutzt werden. Weiterhin umfassen die Wälder in Deutschland eine Fläche von 11 Mio. ha. Von den 12 Mio. ha Ackerfläche stehen langfristig Flächen von 2 bis 3,5 Mio. ha für die energetische Nutzung von Biomasse zur Verfügung. Dies entspricht abhängig von den Flächenerträgen einem Gesamtenergieertrag von 360 bis 800 PJ pro Jahr. Hinzu kommt ein Potential von 100 PJ pro Jahr aus der Grünlandfläche. Aus der Forstwirtschaft wurden bisher durchschnittlich 136 PJ der Holzmengen pro Jahr energetisch genutzt. Schätzungen zufolge stehen weitere 65 bis 116 PJ pro Jahr als technisch nutzbares Potential zur Verfügung. Neben den forst- und landwirtschaftlichen Biomassen können auch biogene Rest- und Abfallstoffe energetisch genutzt werden und stellen im Vergleich zu den forst- und landwirtschaftlichen Biomassen ein nicht unerhebliches Potential von 550 PJ pro Jahr dar. In Bild 2.1 sind die verschiedenen Rest- und Abfallstoffe und deren Bedeutung am Energiepotential zusammengefasst. [1]

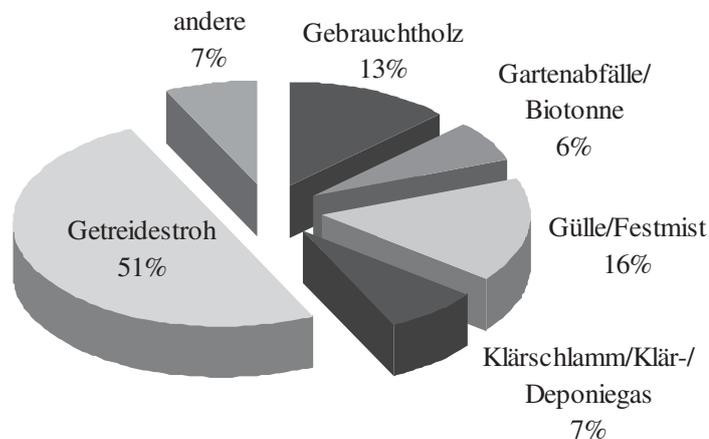


Bild 2.1 Zusammensetzung des biogenen Rest- und Abfallstoffpotentials [1]

In Summe belaufen sich die zukünftigen technischen Biomassepotentiale somit auf 1.210 bis 1.700 PJ pro Jahr, wovon allein 30 bis 45 % der Gesamtenergie durch biogene Rest- und Abfallstoffe bereitgestellt werden können. Im Hinblick auf den derzeitigen Primärenergiebedarf von 14.500 PJ pro Jahr in Deutschland könnte die Biomasse einen Anteil von 8 bis 12 % bzw. Rest- und Abfallstoffe einen Anteil von 4 % stellen. [1]

Eine besondere Bedeutung kommt den biogenen Rest- und Abfallstoffen durch die zunehmende Konkurrenz zwischen stofflicher Nutzung des Holzes und direkter energetischer Nutzung zu. Auch innerhalb der energetischen Nutzung konkurrieren die Pfade Wärmeerzeugung, Stromerzeugung und zukünftig wahrscheinlich auch noch die Erzeugung von Biokraftstoffen der 2. Generation. Es gilt daher, zukünftig sämtliche Biomassepotentiale auszunutzen und verstärkt auch biogene Rest- und Nebenstoffe sowie Ganzpflanzen zu verwerten und soweit möglich die Flächenerträge zu erhöhen. [1]

2.1.2 Charakterisierung biogener Reststoffe

Biogene Festbrennstoffe lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien einteilen. Aktuell laufende Normierungsarbeiten zur Klassifizierung von festen Biobrennstoffen führten z. B. zur Einteilung der biogenen Festbrennstoffe nach deren Herkunft (Bild 2.2) [3]. Weiterhin lassen sich die Biomassen in Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen (kurz: biogene Reststoffe) sowie speziell angebauten Energiepflanzen unterscheiden. Die biogenen Reststoffe können dabei sowohl in der Forst- und Landwirtschaft als auch in der Holzverarbeitenden und Lebensmittelindustrie anfallen.

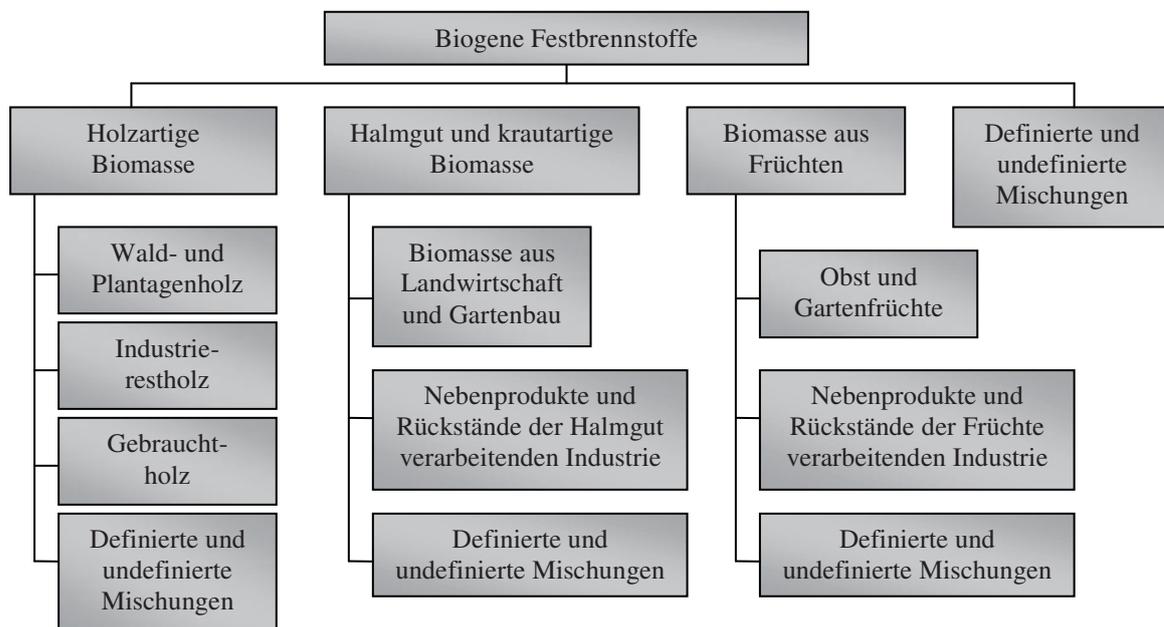


Bild 2.2 Einteilung biogener Festbrennstoffe [3] (nach prCEN TS 14961 [4])

Holzartige Biomassen sind in ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem Heizwert bezogen auf asche- und wasserfreien Brennstoff sehr ähnlich. Sie können sich aber stark in ihrem Asche- und Wassergehalt unterscheiden. Hohe Aschegehalte können u.a. aus Verunreinigung mit Fremdstoffen, wie z. B. Erde und Steine, resultieren. Der Wassergehalt von Holz-

artigen Biomassen wird u. a. durch den Zeitpunkt der Fällung und der Dauer der Lagerung beeinflusst.

Nicht-holzartige Biomasse (Gräser, Straßenbegleitgrün, Stroh, Getreide, Olivenkerne etc.) können große Unterschiede in ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrem Asche- und Wassergehalt, ihrem Ascheschmelzverhalten, ihrem Heizwert sowie ihren physikalischen Eigenschaften aufweisen. In Tabelle 2.1 sind einige relevante Brennstoffeigenschaften von holzartigen und nicht-holzartigen (halmgutartigen) Biomassen zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Brennstoffeigenschaften von holzartigen und halmgutartigen Biomassen [7]

Brennstoffeigenschaft	Holzartige Biomasse	Halmgutartige Biomasse
Elementarzusammensetzung		
C in Ma-% (wf)	47-50	41-47
H in Ma-% (wf)	5-7	5-7
O in Ma-% (wf)	42-45	37-42
N in Ma-% (wf)	0,15-0,55	0,4-0,85
S in Ma-% (wf)	0,02-0,05	0,05-0,09
Cl in Ma-% (wf)	0,004-0,01	0,2-0,5
K in Ma-% (wf)	0,1-0,4	0,8-1,7
Brennstofftechn. Eigenschaften		
Hu in MJ/kg (wf)	18-19	16-18
Wasser in Ma-%	12-50	8-20
Flüchtige in Ma-% (wf)	80-84	75-78
Asche in Ma-% (wf)	0,6-2,0	5-7
Ascheerweichungspunkt in °C	1300-1450	950-1050

So sind z. B. einige nicht-holzartige Biomassen durch einen hohen Gehalt an Stickstoff, Chlor, Schwefel und/oder Kalium gekennzeichnet. Ein weiteres Merkmal vieler nicht-holzartiger Biomassen ist die geringe Schütt- und damit Energiedichte sowie mitunter ein hoher Asche- und Wassergehalt. Aschegehalte von Reisschalen liegen z. B. zwischen 18 und 25 Ma-% [5] im Vergleich zu naturbelassenem Holz mit kleiner 1 Ma-%.

2.2 Biogene Reststoffe zur Wärme- und Strombereitstellung

Für die Nutzung von Biomassen stehen verschiedene Konversionstechnologien zur Verfügung, deren Auswahl sich einerseits durch die Qualität des Einsatzstoffes und andererseits durch die gewünschte Nutzenergie bzw. das gewünschte Endprodukt bestimmen. Bei den thermo-chemischen Verfahren unterscheidet man zwischen Verbrennung, Vergasung und Pyrolyse. Abhängig vom ausgewählten Anlagentyp sowie der Qualität der Biomassen be-

dürfen die Einsatzstoffe einer mehr oder weniger aufwendigen Aufbereitung bevor sie entweder in einstufigen oder mehrstufigen Verfahren zur Erzeugung von Wärme und Strom eingesetzt werden können (Bild 2.3). Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, können sich biogene Reststoffe erheblich in ihren Brennstoffeigenschaften unterscheiden und erfordern daher eine entsprechende Berücksichtigung bei der Auswahl bzw. Auslegung der Konversionsverfahren. In den folgenden Kapiteln soll daher auf den Einfluss und die Auswirkungen der Brennstoffeigenschaften bei der thermo-chemischen Umwandlung eingegangen und geeignete Verfahren zur Nutzung biogener Reststoffe am Beispiel der Verbrennung und Vergasung vorgestellt werden.

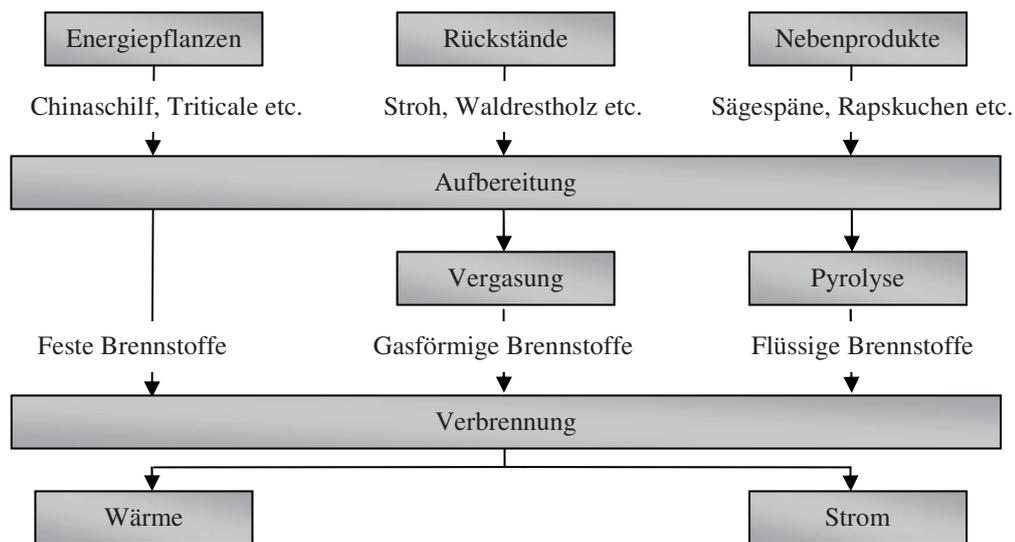


Bild 2.3 Bereitstellung von Wärme und Strom aus Biomasse mittels thermo-chemischer Verfahren

2.2.1 Besonderheiten bei der energetischen Nutzung von biogenen Reststoffen

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von biogenen Reststoffen haben einen großen Einfluss auf die Wahl der Konversionstechnologien sowie auf die notwendigen Vor- bzw. Nachbehandlungsverfahren. Im Folgenden soll der Einfluss der verschiedenen Eigenschaften auf den Anlagenbetrieb sowie auf die Höhe der Schadstoffemissionen beschrieben werden [5]-[7].

Wassergehalt: Hohe Wassergehalte im Brennstoff verringern den Heizwert und führen zu niedrigeren Verbrennungstemperaturen. Wirkungsgradverluste und erhöhte Rauchgasmengen sind das Resultat von hohen Wassergehalten und führen u. a. zu einer größeren Dimensionierung der Rauchgasreinigungsanlagen.

Aschegehalt und -zusammensetzung: Ein hoher Aschegehalt in biogenen Reststoffen führt zu Ablagerungen im Feuerraum und in den Wärmeübertragern und erhöht den Reinigungs-