

# **Stand und Entwicklung der Verbrennungstechnik**

Dr.-Ing. Ingwald Obernberger

Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, Österreich

Ingenieurbüro BIOS, Graz, Österreich

## **Zusammenfassung**

Obwohl die Verbrennung die älteste und ausgereifteste Technologie zur thermischen Nutzung fester Biomasse darstellt (im Vergleich zur Vergasung und Pyrolyse), sind dennoch große An- und Herausforderungen hinsichtlich der Entwicklung neuer, energetisch effizienterer und umweltverträglicherer Anlagen vorhanden. Die treibenden Kräfte dafür sind der Einsatz neuer Brennstoffe (Stroh, Getreide-Ganzpflanzen, Gräser), die spezielle Feuerungs- und Regelungstechnologien erfordern, sowie neue Prozesse und Entwicklungen, die höhere Anlagenwirkungsgrade und niedrigere Emissionen ermöglichen.

In dieser Arbeit wird daher auf die für die Verbrennung fester Biomasse eingesetzten Anlagensysteme hinsichtlich technologischer, ökologischer und auch wirtschaftlicher Aspekte näher eingegangen. Betrachtet werden dabei Feuerungsanlagen mit einer Kesselnennleistung größer  $0,5 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Es erfolgt ein Überblick über die in Biomassefeuerungen eingesetzten Brennstoffe, deren Eigenschaften und deren Einfluß auf die Verbrennungstechnik. Anschließend werden die einzelnen Feuerungstechnologien genauer beschrieben und untereinander verglichen, um sinnvolle Einsatzbereiche definieren zu können. Weiters wird auf die Wirkungsgrade der Wärmeproduktion und deren Einflußfaktoren genauer eingegangen, mit dem Ziel die bestehenden und in Entwicklung befindlichen Möglichkeiten einer energetischen Anlagenoptimierung aufzuzeigen.

Hinsichtlich der ökologischen Bewertung der Verbrennung fester Biomasse erfolgt ein Überblick über die freiwerdenden vermeidbaren und nicht vermeidbaren Emissionen sowie Möglichkeiten diese zu minimieren. In Hinblick auf zukünftige Entwicklungen werden die noch bestehenden technologischen Schwachpunkte von Biomassefeuerungsanlagen diskutiert und innovative Verbesserungsansätze aufgezeigt.

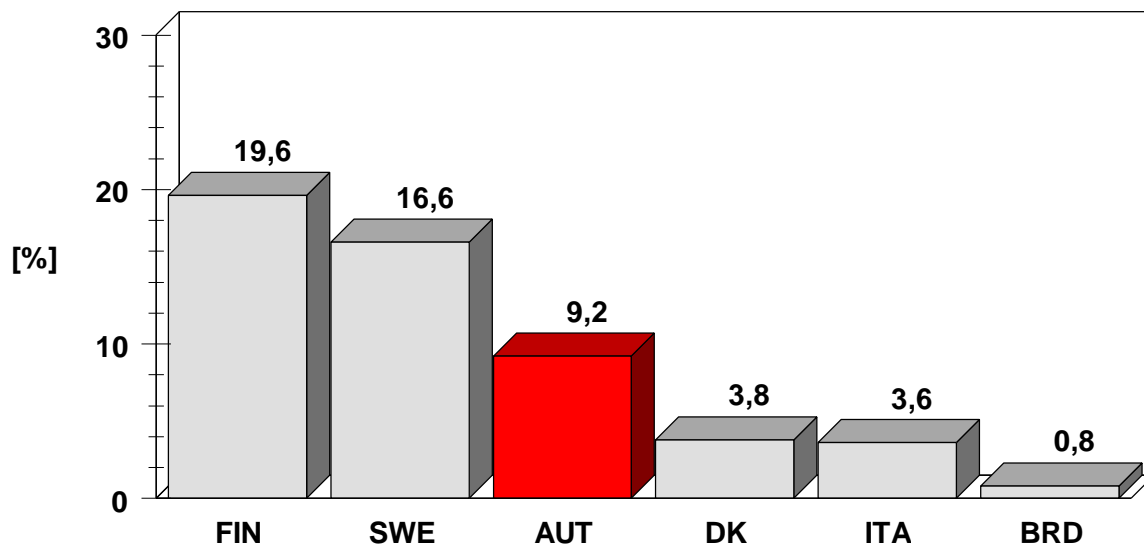
## **1. Bedeutung und zukünftige Entwicklungspotentiale der Biomasse-verbrennung in Europa**

Die derzeitige Bedeutung der thermischen Biomassenutzung in Europa ist in Abbildung 1 veranschaulicht, die den Anteil der Biomasse am Primärenergieeinsatz verschiedener europäischer Staaten gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die skandinavischen Länder Finnland und Schweden eine führende Position einnehmen, gefolgt von Österreich. Wesentlich ist es, bei derartigen Vergleichen immer anzugeben, worauf sich die angegebenen Zahlen genau beziehen, um sie direkt vergleichbar zu machen. Dies ist für die dargestellten Daten gewährleistet und auch spezifiziert. Bei den weiteren verfügbaren

Kennzahlen europäischer Länder war diese Datensicherheit nicht gegeben, weshalb sie in diesem Abschnitt auch nicht explizit berücksichtigt sind. Mit Schweden, Finnland, Österreich und Dänemark sind aber bezüglich der thermischen Biomassenutzung die derzeit führenden Staaten Europas erfaßt.

**Abbildung 1:** Prozentueller Anteil der Biomasse am Primärenergieeinsatz verschiedener europäischer Länder

Erläuterungen: Datenquellen [1,3,4,5,6,7,8]; der Begriff Biomasse beinhaltet dabei folgende Sortimente: Brennholz, Sägenebenprodukte, landwirtschaftliche Reststoffe, Energiepflanzen, Ablaugen aus der Papier- und Zellstoffindustrie, Alt- und Restholz.

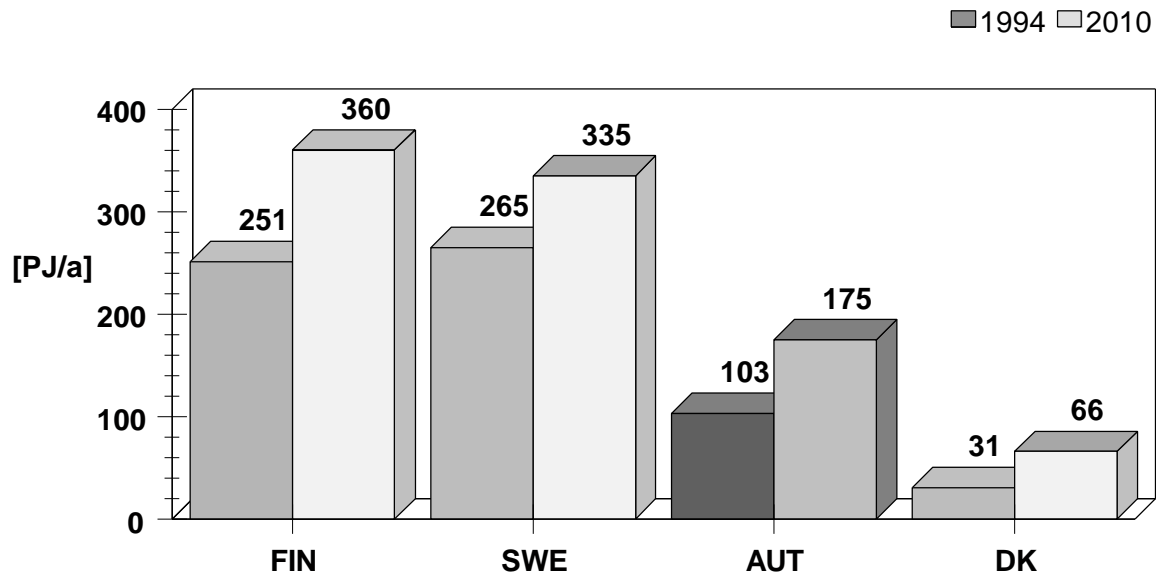


Der Gesamtdurchschnitt des Anteils der Biomasse an der Primärenergiebereitstellung der 15 EU-Staaten liegt derzeit bei knapp über 3,0 %, wobei in diesem Anteil auch die thermische Müllverwertung inkludiert ist [1, 3]. Erklärtes Ziel der Europäischen Union ist es, diesen Anteil bis zum Jahr 2010 auf 5,5 % und bis zum Jahr 2025 auf rund 8,0 % durch eine entsprechende Forschungs-, Entwicklungs-, Agrar- und Förderungspolitik zu steigern [1, 2, 4]. Dieses Ziel könnte durch die Vorbildwirkung der drei seit 1995 neuen Mitgliedsstaaten Schweden, Finnland und Österreich sowie die Energiepolitik Dänemarks positiv beeinflusst werden (siehe Abbildung 2). Insbesondere wird es dabei von großer Bedeutung sein, auch die großen EU-Staaten Deutschland, Frankreich und Großbritannien auf dieses Ziel einzuschwören.

Hinsichtlich der Forcierung einzelnen Sektoren bei der in Zukunft verstärkten thermischen Biomassenutzung wird in Finnland und Schweden insbesondere verstärkt auf den Bau großer Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gesetzt, in Schweden weiters auch auf die starke Forcierung von Einzelfeuerungen auf Pelletbasis. In Österreich legt man besonders Wert auf die weitere Forcierung dezentraler Biomassefernheizwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie auf die Forcierung moderner Biomasse-Einzelofenfeuerungen auf Pellet-, Brikett und Brennholzbasis. In Dänemark wird neben einem verstärkten Ausbau größerer dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen insbesondere auf die weitere Ausweitung der Biomassezuführung in Kohlekraftwerken gesetzt.

**Abbildung 2:** Erwarteter Anteil der Biomasse am Primärenergieeinsatz verschiedener europäischer Länder im Jahr 2010 im Vergleich zum Anteil im Jahr 1994

Erläuterungen: Datenquellen [1,3,4,5,6,7,8]; der Begriff Biomasse beinhaltet dabei folgende Sortimente: Brennholz, Sägenebenprodukte, landwirtschaftliche Reststoffe, Energiepflanzen, Ablaugen aus der Papier- und Zellstoffindustrie, Alt- und Restholz.



Während die Biomasseverbrennung bereits dem europäischen Stand der Technik entspricht und auch großtechnisch im Einsatz ist, befinden sich die Biomassepyrolyse und Biomassevergasung noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Die in diesem Abschnitt präsentierten Ist-Potentiale der thermischen Nutzung fester Biomasse sind somit fast zur Gänze der Biomasseverbrennung zuzuordnen. Es gibt zwar in mehreren europäischen Ländern großtechnische Biomassevergasungsanlagen (darunter auch eine Rindenvergasungsanlage in Österreich), jedoch wird in diesen Anlagen das erzeugte Gas einer nachgeschalteten Verbrennung zugeführt. Die Biomassevergasung mit nachgeschalteter gasmotorischer Nutzung bzw. nachgeschaltetem Gasturbinenbetrieb befindet sich seit langem im Entwicklungsstadium, ein technologischer Durchbruch ist jedoch bisher nicht gelungen. Aus diesen Ausführung wird die derzeitige und auch zukünftige Bedeutung der Biomasseverbrennung klar.

## **2. Überblick über die Eigenschaften von Biomasse-Brennstoffen und deren Einfluß auf den Verbrennungsprozeß**

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Biomasse-Brennstoffen haben wesentlichen Einfluß auf die Lagerdimensionierung, die Brennstoffförderung, die Feuerungs- und Rauchgasreinigungstechnologie, die erforderliche Anlagenregelung und die Ascheverwertungsmöglichkeiten. Die Qualität der verfahrenstechnischen Abstimmung der Biomassefeuerung an das zu verwendende Brennstoffsoriment bestimmt somit die Lebensdauer und Eignung der Anlage bzw. wichtiger Anlagenkomponenten.

Aus den genannten Gründen kommt der Beachtung der folgenden Punkte besondere Bedeutung zu:

- a) Die zu verwendenden Biomasse-Brennstoffe müssen bereits zu Beginn der Anlagenplanung genau definiert werden, da sie eine wichtige Ausgangsbasis für die Planung der Gesamtanlage darstellen.
- b) Wenn nicht konventionelle Biomasse-Brennstoffe verwendet werden sollen, ist eine genaue Untersuchung deren physikalischer und chemischer Brennstoffeigenschaften bereits im Zuge der Vorplanung notwendig, unter Umständen können auch Feuerungsversuche erforderlich sein.
- c) Zur Absicherung bezüglich der festgelegten Qualitätsanforderungen sind langfristige und genau definierte Lieferverträge zwischen dem Anlagenbetreiber und den Brennstofflieferanten empfehlenswert.

**Tabelle 1:** Der Einfluß des Aschegehaltes sowie der Korngröße und Partikeldichte der Flugasche auf die Feuerungstechnik und daraus abzuleitende Empfehlungen

Erläuterungen: Datenquelle: [1].

Verwendete Abkürzungen: GP...Ganzpflanzen; Submikronteilchen...Teilchen kleiner 1,0 µm.

Parameter	Limitierende Faktoren	Technologische Empfehlungen
Aschereiche Brennstoffe (Rinde, Stroh, GP, Heu)	Aschenaustragung aus dem Feuerraum	geeignete Feuerungstechnologien: Rostfeuerungen, Wirbelschichtfeuerungen
Aschearme Brennstoffe (Hackgut, Späne)	--	geeignete Feuerungstechnologien: keine Einschränkungen
Grobkörnige Flugasche mit hohen Partikeldichten: hoher mineralischer Anteil, Anteil an Submikronteilchen mäßig (Rinde, Hackgut, Späne)	Mäßige Deposition von Flugasche im Wärmetauscher	Automatische Wärmetauscherreinigung: optional Wärmetauscherkonzeption: keine Einschränkungen Flugaschenabscheidung: keine technologischen Einschränkungen
Feinkörnige Flugasche mit niedrigen Partikeldichten: hoher Salzanteil; Anteil an Submikronteilchen groß (Stroh, GP, Heu)	Deposition von Flugasche im Wärmetauscher; Korrosionsgefahr; Fliehkraftabscheidung nicht effizient;	Automatische Wärmetauscherreinigung: dringend empfohlen Wärmetauscherkonzeption: senkrechte Bauweise empfohlen Flugaschenabscheidung: Multizyklone nicht geeignet, Elektrofilter nur bedingt geeignet

Die wichtigsten physikalischen Kriterien, die bei der Bewertung eines Biomasse-Brennstoffes eine Rolle spielen sind dessen Form und Partikelgröße. Weiters sind der Wassergehalt und dessen Energiedichte

sowie die möglichen auftretenden Schwankungsbreiten dieser Größen wesentlich. Diese Parameter wirken sich insbesondere auf die Auswahl und Dimensionierung der Feuerung sowie auf die erforderliche Regelungstechnik aus (näheres siehe Abschnitt 3).

Hinsichtlich der richtigen Auswahl und Dimensionierung von Wärmetauscherreinigungsanlagen und Staubabscheidern ist es außerdem zu empfehlen, Kenntnisse über die zu erwartende Korngrößenverteilung und Partikeldichte der Flugasche einzuholen (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 2:** Vorgeschlagene Richtwerte bzw. Richtbereiche für Qualitätsparameter von Biomasse-Brennstoffen und Biomasse-Aschen hinsichtlich deren unproblematischer thermischer Nutzung

Erläuterungen: Datenquellen: [1, 2]; die Richtkonzentrationen in der Asche beziehen sich auf die Zusammensetzung des Verbrennungsrückstandes des laut ISO1171-1981 bei 550°C veraschten Brennstoffes bzw. auf die tatsächlich in einer Feuerungsanlage anfallende Asche (Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche); empfohlene Brennstoff- und Aschenanalyse: Säuredruckaufschluß mit anschließender ICP- bzw. GAAS-Messung.

Verwendete Abkürzungen: HG....Hackgut; GP....Ganzpflanzen

Element	Richtkonzentration im Brennstoff [Gew% d. TS]	Limitierender Parameter	Probleme können auftreten bei	Technologische Möglichkeiten bei Nichteinhaltung des Richtbereiches
N	< 0,6	NO <sub>x</sub> -Emissionen	Stroh, GP, Heu  Restholz, Altholz	Primärmaßnahmen (Luftstufung, Reduktionskammer)  Sekundärmaßnahmen (SNCR- oder SCR-Verfahren)
Cl	< 0,1	Korrosion, HCl-Emissionen	Stroh, GP, Heu	gegen Korrosion: FR-Temperaturregelung, Wärmetauscherreinigung, Rohrbeschichtung; gegen HCl-Emissionen: Trockensorption, Wäscher
S	< 0,1	Korrosion	Stroh, GP, Heu	siehe Cl
Element	Richtkonzentration in der Asche [Gew% d. TS]	Limitierender Parameter	Probleme können auftreten bei	Technologische Möglichkeiten bei Nichteinhaltung des Richtbereiches
Ca	15 - 35	Aschenschmelzpunkt	Stroh, GP, Heu	Rost- und Feuerraumtemperaturkontrolle
Mg	> 2,5	Aschenschmelzpunkt		Rost- und Feuerraumtemperaturkontrolle
K	< 7,0	Aschenschmelzpunkt, Ablagerungen, Korrosion	Stroh, GP, Heu	gegen Korrosion: siehe Cl gegen Aschenschmelze: siehe Ca
Na	< 0,6	Aschenschmelzpunkt, Ablagerungen, Korrosion		gegen Korrosion: siehe Cl gegen Aschenschmelze: siehe Ca
Zn	< 0.08	Rezyklierbarkeit der Asche	Rinde, HG, Spänen	fraktionierte Schwermetallabscheidung
Cd	< 0.0005	Rezyklierbarkeit der Asche	Rinde, HG, Spänen	fraktionierte Schwermetallabscheidung

Aus chemischer Sicht sind die Konzentrationen an N, S, Cl und der Gesamtaschengehalt im Biomasse-Brennstoff von Relevanz. Weiters sollten die durchschnittlich auftretenden Konzentrationen an Ca, Mg, K und Na sowie der Schwermetalle Cd und Zn in der Asche des einzusetzenden Biomasse-Brennstoffs bekannt sein. Zur Absicherung der gewonnenen Ergebnisse und aufgrund der möglichen natürlichen Zu-

sammensetzungsschwankungen sind bezüglich dieser anorganischen Parameter Untersuchungen mehrerer Brennstoffproben zu empfehlen. Für diese Parameter und Elemente wurde versucht, aufbauend auf den bereits vorliegenden Erfahrungen aus Forschungsarbeiten und dem praktischen Anlagenbetrieb, Grenzkonzentrationen zu definieren, bei deren Überschreitung spezielle technologische Maßnahmen erforderlich werden bzw. besondere Vorsicht geboten ist (siehe Tabelle 2). Bei Einhaltung dieser Richtwerte bzw. Richtbereiche sollten dem Stand der Technik entsprechende Anlagentechniken für den betrachteten Brennstofftyp ausreichen. Bei Überschreitung dieser Werte bzw. Bereiche muß mit speziellen Problemen gerechnet werden, für deren Hintanhaltung zusätzliche feuerungs- bzw. regelungstechnische Anforderungen erfüllt werden müssen, die in Tabelle 2 stichwortartig angegeben sind und auf die in Abschnitt 3 und 5 noch genauer eingegangen wird.

Diese Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und muß dem jeweiligen Forschungs- und Entwicklungsstand entsprechend aktualisiert werden. Sie soll aber dem Planer bzw. Betreiber von Biomasseanlagen als Hilfestellung dienen eventuelle potentielle Probleme bereits frühzeitig zu erkennen und entsprechend darauf reagieren zu können. Dabei sollten insbesondere Primärmaßnahmen im Bereich Brennstoffbereitstellung (landwirtschaftlich-verfahrenstechnische Maßnahmen wie Düngereinsatz, Erntezeitpunkt, Erntetechnik, Pflanzenart) und im Bereich Energieumwandlung (hinsichtlich feuerungs- und regelungstechnischer Eingriffsmöglichkeiten) ins Auge gefaßt werden.

### **3. Feuerungsanlagen für feste Biomasse und deren Anwendung**

Die derzeit hauptsächlich verwendeten Feuerungssysteme zur thermischen Nutzung fester Biomasse sind Unterschubfeuerungen, Rostfeuerungen sowie stationäre und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen.

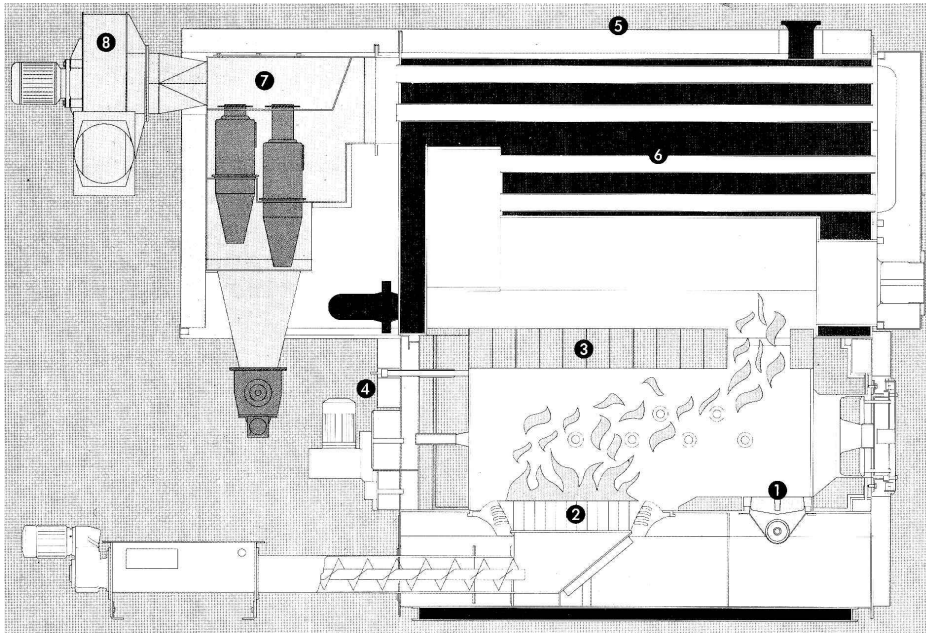
In Abschnitt 2 wurde bereits kurz auf den Einfluß der Art, Form und Korngröße des Biomasse-Brennstoffes hinsichtlich der Wahl der Feuerungstechnologie eingegangen. Diesem Punkt kommt große Bedeutung zu, da dadurch eine Vorselektion geeigneter Verbrennungssysteme erfolgt und die Art der erforderlichen Brennstoffaufbereitung bzw. Brennstoffzufuhr für eine bestimmte Feuerungstechnologie definiert wird.

Unterschubfeuerungen (siehe Abbildung 3) werden normalerweise nur bis zu einer Feuerungsnennleistung von rund 6 MW<sub>th</sub> gebaut und sind nur für Brennstoffe mit niedrigen Aschegehalten geeignet (Hackgut, Holzspäne). Den limitierenden Faktor bezüglich der Anlagengröße stellt die Brennstoffzufuhr über Förderschnecken dar, die die Biomasse von unten in den Feuerraum schieben. Bei aschereichen Brennstoffen treten Probleme bezüglich der Aschenaustragung aus dem heißen Feuerraum auf. Weiters können Ascheschichten an der Brennstoffoberfläche das Entweichen der Verbrennungsgase aus dem Glutbett kurzzeitig blockieren, was instationäre Verbrennungszustände bei jedem Gasdurchbruch zur Folge hat.

**Abbildung 3:** Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung für Hackgut und Sägespäne

Erläuterungen: Datenquelle [9]; 1....Aschenausstragsschnecke; 2....Verbrennungsretorte mit Primärluftzufuhr; 3....schamottierte Strahlungsdecke; 4....gestufte Verbrennungsluftzuführung (die Sekundärluft

wird in der Nachbrennzone zugeführt); 5...Isolation zur Reduktion von Strahlungsverlusten; 6...Rauchrohrkessel; 7...Multizyklon zur Rauchgasentstaubung; 8...Rauchgasventilator.

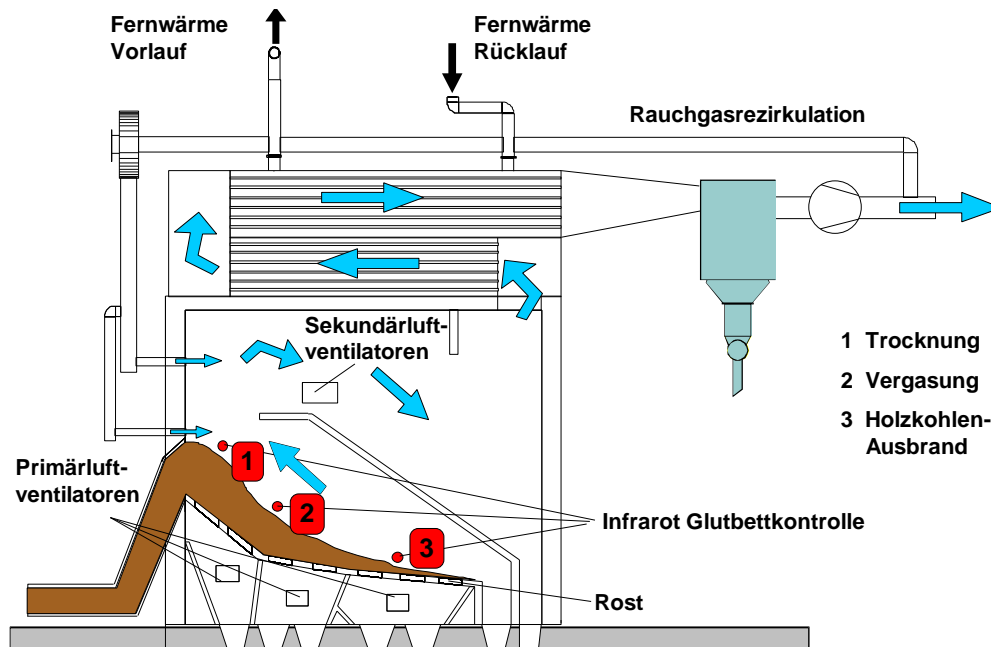


Rostfeuerungen sind in verschiedenen Ausführungen verfügbar und für Biomasse-Brennstoffe sehr universell einsetzbar. Für Feuerungs-nennleistungen kleiner  $1,0 \text{ MW}_{\text{th}}$  können nicht bewegliche Schrägroste verwendet werden. Die am meisten verwendete Rostfeuerungsvariante ist der Vorschubrost (siehe Abbildung 4). Dabei erfolgt der Brennstoff-Vorschub durch periodische Vor- und Zurückbewegungen jedes zweiten Rostelementes. Rostfeuerungen sind für Biomasse-Brennstoffe mit hohen Wassergehalten, mit variierenden Korngrößen (mit einer Limitierung nach unten, was den Feinanteil in der Brennstoffmischung betrifft) und für Biomasse-Brennstoffe mit hohen Aschegehalten geeignet. Mischungen holzartiger Biomasse-Brennstoffe können ebenfalls verwendet werden. Die derzeit verfügbaren Rostfeuerungs-technologien sind aber nicht geeignet Mischungen aus holzartiger Biomasse und halmartiger Biomasse (Stroh, Ganzpflanzen oder Gräsern) zu verbrennen, da das Verbrennungsverhalten, der Wassergehalt und das Ascheschmelzverhalten dieser Brennstoffarten zu unterschiedlich sind und Rostfeuerungen keine homogene Durchmischung des Brennstoffes während des Abbrandes gewährleisten, sondern sogar lokale Entmischungen der eingesetzten Brennstoffarten auf dem Rost möglich sind.

Gut konzipierte und geregelte Roste gewährleisten eine relativ gleichmäßige Verteilung des Brennstoffes bzw.- Glutbettes über die Rostflächen pro Rostzone. Dies ist sehr wichtig, um eine gleichmäßige Primärluftverteilung über das Glutbett zu erreichen. Die Primärluftzufuhr erfolgt über kleine Einkerbungen an den Seitenflächen der einzelnen Rostelemente von unten. Eine inhomogene Verteilung des Brennstoffes über die Rostfläche kann lokale Ascheschmelze, erhöhte Flugaschemengen und größere erforderliche Luftüberschüsse nach sich ziehen. Da Vorschubroste normalerweise den Brennstoff nur vertikal transportieren können, ist es wichtig bereits bei der Brennstoffaufgabe auf den Rost eine horizontal möglichst gleichmäßige Verteilung zu erreichen. Neu entwickelte Rosttechnologien zielen auf einen in vertikaler und horizontaler Richtung beweglichen Rost ab, um dadurch eine möglichst gleichmäßige Rostbelegung zu erreichen [13].

**Abbildung 4:** Schematische Darstellung einer modernen Biomasse-Vorschubrostfeuerung mit Infrarot-  
Glutbetthöhenkontrolle, dreigeteiltem Rostbereich und sektionsweise regelbarer Primär-  
luftzufuhr

Erläuterungen: Datenquellen [9, 12].



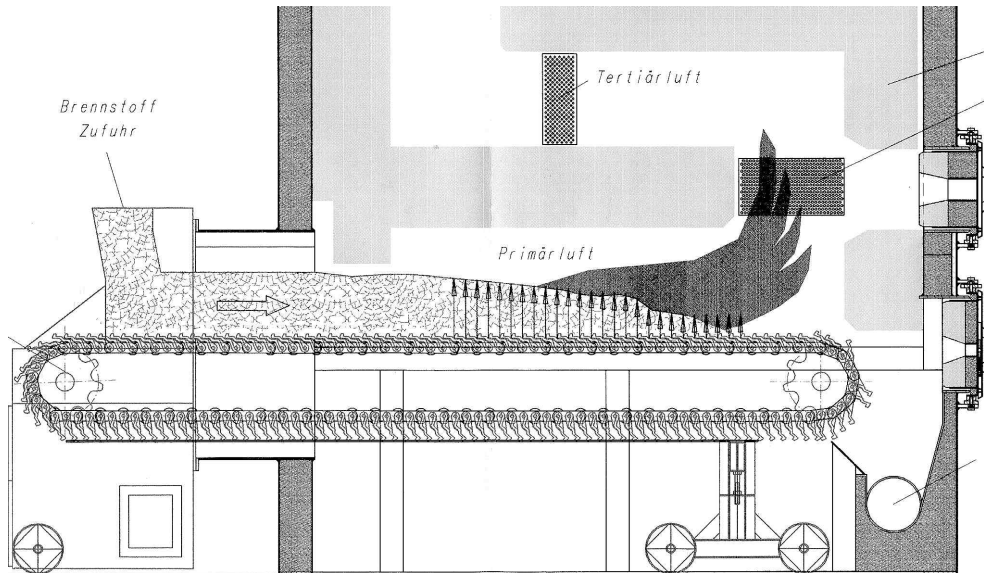
Moderne Vorschubroste sind weiters in mehrere Rostzonen unterteilt, deren Vorschubtakt und Primärluftzufuhr getrennt regelbar sind (siehe Abbildung 4). Dies ist erforderlich um eine dem Verlauf der Verbrennung angepaßte Regelung gewährleisten zu können. In der obersten Rostzone erfolgt eine Trocknung und Vorwärmung des Brennstoffes. Bei Verwendung sehr trockener Brennstoffe kann dieser Bereich entfallen, bei sehr feuchten Brennstoffen sollte der Rost so konzipiert sein, daß die heißen Rauchgase im Gegenstrom zum Brennstoffvorschub in die Sekundärverbrennungszone strömen, um die Brennstofftrocknung noch zu unterstützen. In der mittleren Rostzone, die normalerweise auch die heißeste ist, erfolgt die Entgasung des Brennstoffes und im untersten Rostbereich, die Verbrennung der Holzkohle. Durch die Möglichkeit der Luftmengenregelung für die einzelnen Rostbereiche ist es auch möglich die Rostfeuerung bis rund 25% der Feuerungsnennwärmeleistung kontinuierlich zu betreiben und die zugeführte Gesamtprimärluftmenge zu kontrollieren, was für die Realisierung einer  $\text{NO}_x$ -Reduktion durch Luftstufung eine Grundvoraussetzung darstellt [14].

Weiters ist es sehr wichtig, daß der Brennstofftransport über den Rost so ruhig wie möglich vor sich geht, um das Glutbett möglichst wenig zu stören und die Bildung von Löchern sowie die Aufwirbelung unverbrannter Partikel nach Möglichkeit zu vermeiden. Diese Anforderungen können durch kontinuierlich bewegte Roste, die jeweils nur kleine und langsame Vorschübe ausführen, durch die Verwendung möglichst schmaler einzelner Rostsegmente über den Querschnitt, durch eine frequenzgeregelte sektionsweise Primärluftzufuhr und eine Infrarot-Glutbetthöhenkontrolle für die einzelnen Rostabschnitte annähernd erfüllt werden.

Die stationären Rostelemente moderner Biomasse-Vorschubrostfeuerungen sind wassergekühlt ausgeführt, um einer Aschenschmelze vorzubeugen und das Rostmaterial zu schonen. Dies ist insbesondere bei der Verwendung sehr trockener Biomasse-Brennstoffe von Bedeutung.

**Abbildung 5:** Schematische Darstellung einer modernen Biomasse-Wanderrostfeuerung

Erläuterungen: Datenquelle [11].

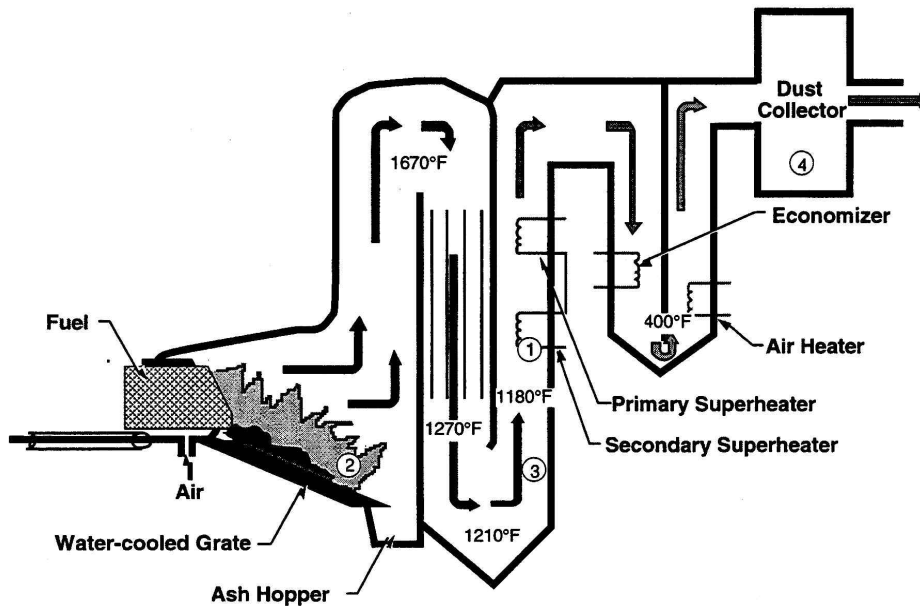


Eine interessante Variante der Rostfeuerung in diesem Zusammenhang ist der sogenannte Wanderrost (siehe Abbildung 5). Sein Vorteil besteht darin, daß das Brennstoffbett während des Abbrandes völlig in Ruhe bleibt, da sich der Rost selbst, über Ketten angetrieben, vorwärts bewegt. Nach Erreichen des Rostendes klappen die Rostglieder bei der Umlenkung nach unten auseinander und können so während der Rückbewegung gut gekühlt werden bevor sie sich bei der Umlenkung nach oben wieder schließen. Die Primärluftzufuhr erfolgt über Schlitze zwischen den einzelnen Rostgliedern. Die Gleichmäßigkeit der Brennstoffverteilung über den Rost hängt in diesem Fall von der Qualität der Brennstoffaufgabe ab und muß auf die Korngröße des Materials abgestimmt werden. Die bisher vorliegenden Erfahrungen mit dieser Rosttechnologie für Biomasse-Brennstoffe sind vielversprechend, da das ruhende Brennstoffbett prinzipiell einen homogenen Abbrand und eine einfachere Verbrennungsregelung ermöglicht, entsprechende Feinabstimmungen sind jedoch noch notwendig. Eine Einschränkung für den Einsatz von Wanderrostfeuerungen stellt die Notwendigkeit relativ gleichmäßiger Korngrößen des Brennstoffes dar, was eine Vorzerkleinerung von inhomogenen Materialien erforderlich macht, da ansonsten das Abbrandverhalten der Brennstoffpartikel zu unterschiedlich ist und somit zu ungleichmäßigen Rostbelegungen führt. Zur Verbrennung von Stroh und Ganzpflanzen werden vorwiegend Zigarrenfeuerungen eingesetzt (siehe Abbildung 6). Bei dieser in Dänemark entwickelten Technologie werden mittels hydraulischem Stößel der Feuerung kontinuierlich Ballen bzw. Ballenscheiben zugeführt. Beim Eintritt in die Brennkammer setzt die Vergasung des Brennstoffes ein. Während des erfolgenden Materialvorschubes auf dem Rost erfolgt dann der vollständige Ausbrand der Biomassekohle. Die strikte Kontrolle der Rost- und Feuer- raumtemperatur bei der Verbrennung von Stroh und Getreide-Ganzpflanzen spielt aufgrund deren nied-

riger Ascheschmelzpunkte und wegen der hohen, durch den geringen Brennstoff-Wasserhalt bedingten, adiabaten Feuerraumtemperatur eine wesentliche Rolle. Deswegen werden die Feuerräume mittels wasserdurchfluteter Wände oder mittels Rauchgasrezirkulation gekühlt (eine Kombination dieser beiden Verfahren ist ebenfalls möglich). Die Feuerraumtemperatur sollte 900°C nicht überschreiten.

**Abbildung 6:** Schematische Darstellung eines Zigarrenbrenners zur thermischen Stroh- und Getreide-Ganzpflanzennutzung

Erläuterungen: Datenquellen [18, 19].



Weiters ist mit der Verbrennung von Stroh und Ganzpflanzen aufgrund deren erhöhter Gehalte an K, Cl und S die Bildung sehr feiner und relativ leichter Flugaschepartikel verbunden, die durch Kondensation der gasförmigen Alkalidämpfe bei beginnender Abkühlung der Rauchgase gebildet werden. Zur Vermeidung fester Ablagerungen und zur Hintanhaltung von Korrosion an den Wänden der Wärmetauscherrohre ist daher eine effiziente und automatische Abreinigung der Wärmetauscherrohre erforderlich. Weiters sollte die Eintrittstemperatur der Rauchgase in den Kessel möglichst niedrig liegen, um die Kondensation der leichtflüchtigen Alkalidämpfe in den Feuerraum zu verlegen und so eine direkte Kondensation an den Wärmetauscherrohren weitgehend zu verhindern. Eine Absenkung der Rauchgastemperatur kann auch, wie in Abbildung 6 dargestellt, durch die Anordnung von Flammrohren oder parallel zur Strömungsrichtung verlaufenden ebenen Wärmetauscherflächen vor Eintritt der Rauchgase in den eigentlichen Wärmetauscherteil erfolgen.

Neben Ganzballen kann auch geschreddertes bzw. vorzerkleinertes Stroh in dem Zigarrenbrenner ähnlich konzipierten Feuerungssystemen eingesetzt werden. In diesem Fall ist nur die Art der Brennstoffaufbereitung und Brennstoffzuführung verschieden.

Semi-kontinuierliche Verbrennungssysteme für Stroh und Ganzpflanzen, bei denen die Ballen über ein Schleusensystem einer Vergasungskammer einzeln (im Batch-Betrieb) zugeführt werden, sind nicht zu empfehlen. Jede Zuführung eines neuen Ballens ist mit Instationaritäten verbunden, die Temperatur- und

CO-Spitzen verursachen und mit, dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden, Regelungssystemen nicht vermieden werden können.

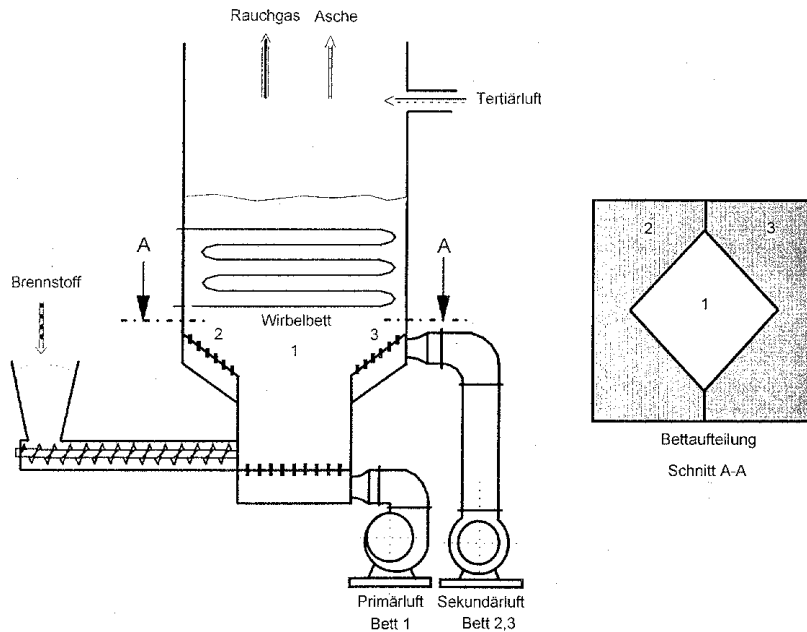
Für Anlagen mit einer Kesselnennleistung über 10 MW<sub>th</sub> sind auch stationäre Wirbelschichtfeuerungen (siehe Abbildung 7) von Interesse. In diesen Feuerungssystemen wird der Brennstoff in ein heißes Brennstoffbett, das normalerweise aus Silikatsand mit einer Korngröße von rund 1,0 mm besteht, aufgegeben. Das Gemisch aus Bettmaterial (98 bis 99%) und Brennstoff (1 bis 2%) wird durch die über einen Lochboden zugeführte Primärluft in Schwebelage gehalten. Die Fluidisierungsgeschwindigkeit, um diesen Schwebezustand zu erreichen, beträgt für stationäre Wirbelschichten zwischen 1,0 bis 2,5 m/s. Die Bett-Temperatur beträgt normalerweise zwischen 800 und 950°C, sie wird durch einen internen Wärmetauscher konstant gehalten. Beim Anfahren der Wirbelschichtfeuerung ist eine interne (über den eingebauten Wärmetauscher) oder externe (über einen Stützbrenner) Vorwärmung des Bettmaterial notwendig, bevor die Brennstoffzufuhr gestartet wird. Die Biomasse sollte, im Gegensatz zu Kohle-Wirbelschichtfeuerungen, aufgrund ihrer hohen Reaktivität nicht auf die Bettoberfläche sondern direkt in das Bett aufgegeben werden (siehe Abbildung 7) [20].

Die Sekundärluft bzw. Tertiärluft (je nach Ausführung der stationären Wirbelschichtfeuerung) wird normalerweise durch, über den kreisförmigen Feuerraumquerschnitt gleichmäßig verteilte, Düsenreihen zu Beginn des bettfreien Teiles der Feuerung, die Freeboard genannt wird, zugeführt. Durch diese Luftstufung in Verbindung mit einer kontrollierten Luftmengen- und -temperaturzufuhr in den einzelnen Feuerraumbereichen kann eine effiziente NO<sub>x</sub>-Emissionsreduktion erreicht werden. Weiters trägt die gute Durchmischung der Rauchgase und der Luft im Wirbelbett dazu bei, daß niedrigere Luftüberschüsse als in konventionellen Rostfeuerungen zur Erreichung einer vollständigen Verbrennung erforderlich sind.

Ein großer Vorteil stationärer Wirbelschichtfeuerungen ist deren hohe Flexibilität bezüglich der Korngröße und des Wassergehaltes der eingesetzten Biomasse-Brennstoffes. Weiters ist es auch möglich Mischungen verschiedener Biomassearten zu verwenden oder die Biomasse zu anderen Brennstoffen (z.B. Kohle, Ablauge aus der Papierindustrie) zuzufeuern [21, 22]. Nachteile von stationären Wirbelschichtfeuerungen sind deren im Vergleich zu Rostfeuerungen erhöhte Betriebskosten (es treten größere Druckverluste auf) und insbesondere deren beschränkte Teillastfähigkeit. Beide genannten Nachteile hängen mit der Notwendigkeit zusammen das Wirbelbett aufrecht zu erhalten. In modernen Wirbelschichtfeuerungen kann der Lastbereich durch Trennung oder Stufungen des Bettes vergrößert werden (siehe Abbildung 7).

**Abbildung 7:** Schematische Darstellung einer stationären Wirbelschichtfeuerung

Erläuterungen: Datenquelle [20].

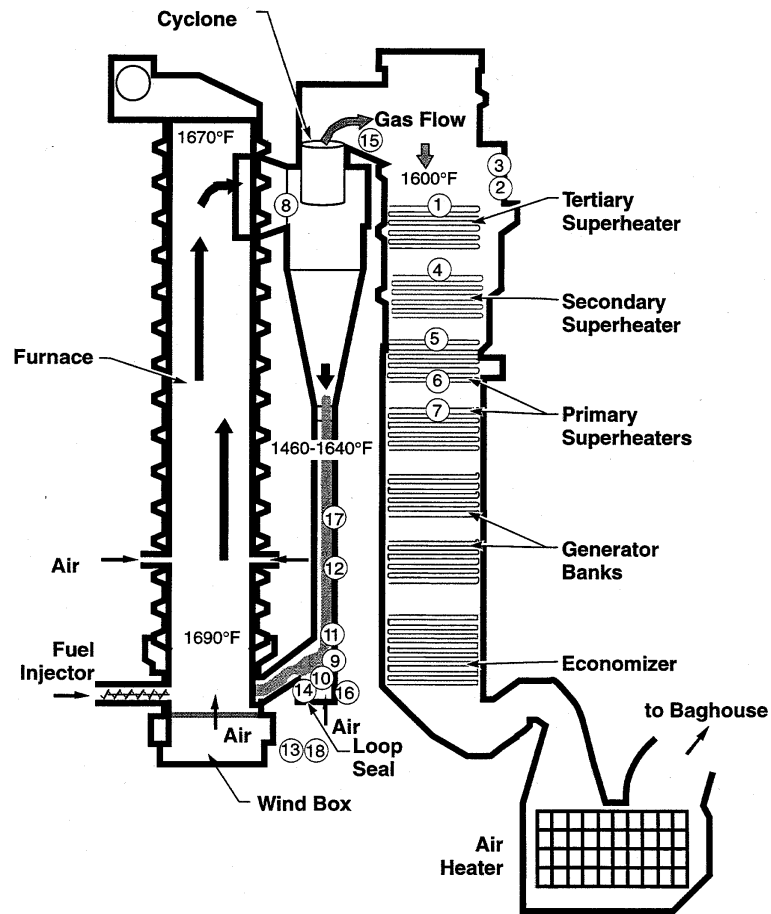


Durch Erhöhung der Fluidisierungsgeschwindigkeit auf 5 bis 10 m/s und den Einsatz von feinerem Bettmaterial mit Durchmessern zwischen 0,2 und 0,4 mm kann eine zirkulierende Wirbelschicht erreicht werden. In diesem Fall ist das Wirbelbett über den gesamten Feuerraum verteilt und das Bettmaterial wird erst in der Feuerung nachgeschalteten Zyklonen oder Prallplattenabscheidern vom Rauchgas abgetrennt und wieder in den Feuerraum rückgeführt (siehe Abbildung 8). Die Bett-Temperatur wird entweder mittels externen Wärmetauschern, die das rückgeführte Material kühlen oder mittels wassergekühlter Feuerraumwände kontrolliert. Die hohe Turbulenz und damit verbundene gute Durchmischung in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen verbessert den Wärmeübergang und führt zu einer relativ homogenen Temperaturverteilung in den einzelnen Bettbereichen. Dadurch werden die Verbrennungsbedingungen in den einzelnen Feuerungsabschnitten stabiler und besser kontrollierbar, was von Vorteil bezüglich der Luftstufung, des erforderlichen Luftüberschusses, der Zudosierung von Additiven und dem Einsatz von Wärmetauscherflächen im oberen Teil der Feuerung ist. Hinsichtlich der gestellten Anforderungen an den Biomasse-Brennstoff ist zwar eine hohe Flexibilität bezüglich Wassergehalt und Mischungen verschiedener Brennstoffarten gegeben, die Korngröße ist jedoch limitiert und sollte normalerweise zwischen 0,1 und 40 mm liegen, was in vielen Fällen eine vorgeschaltete Brennstoffaufbereitung erforderlich macht.

Weitere Nachteile der zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung sind die aufgrund der großen erforderlichen Baugrößen hohen Investitionskosten, die aufgrund der erforderlichen Fluidisierungsgeschwindigkeiten und des Verlustes von Bettmaterial mit der Asche hohen Betriebskosten, die erhöhten Staubgehalte im Rauchgas und die erhöhte Anfälligkeit dieses Systems hinsichtlich der durch Aschenschmelze bedingte Partikelagglomeration, die zum Zusammenbruch des Wirbelbettes führen kann [18, 21, 22, 23, 24]. Ein Teillastbetrieb unter 50% der Feuerungsnennwärmeleistung erfordert außerdem ein zweites Wirbelbett. Der Grund wieso zirkulierende Wirbelschichten für Anlagen größer 30 MW<sub>th</sub> dennoch von Interesse sind, ist der durch diese Systeme hohe erreichbare rauchgasseitige Wärmeübergang, der die erforderliche Übertragungsfläche verringert.

**Abbildung 8:** Schematische Darstellung einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung

Erläuterungen: Datenquelle [10].



**Tabelle 3:** Überblick über die Vorteile, Nachteile und Einsatzbereiche von Rostfeuerungen, stationären und zirkulierenden Wirbelschichtsystemen zur thermischen Biomassenutzung

Verwendete Abkürzungen: WS....Wirbelschicht.

Rostfeuerungen	
Vorteile	Nachteile
Niedrige Investitionskosten für Anlagen < 10 MW <sub>th</sub>	Keine Mischung von holz- und halmgutartigen Brennstoffen möglich
Niedrige Betriebskosten	Effiziente NO <sub>x</sub> Reduktion erfordert spezielle Technologie
Niedrige Staubbelastung im Rauchgas	Höherer O <sub>2</sub> -Überschuß verringert den Wirkungsgrad
Guter Ausbrand der Flugasche	Nicht so gleichmäßige Verbrennungsbedingungen als in WS-Feuerungen erreichbar
Gutes Betriebsverhalten bei Teillast möglich	
Weniger anfällig bezüglich Verschlackung als WS-Feuerungen	
Stationäre Wirbelschicht-Feuerungen	
Vorteile	Nachteile
Moderate Investitionskosten für Anlagen > 10 MW <sub>th</sub>	Hohe Betriebskosten
Keine bewegten Teile im heißen Feuerraum	Höhere Staubbelastung im Rauchgas
Effiziente NO <sub>x</sub> Reduktion durch Luftstufung	Teillastbetrieb erfordert spezielle Technologie
Hohe Flexibilität bezüglich Korngröße, Wassergehalt und Art der Biomasse-Brennstoffe	Mittlere Anfälligkeit bezüglich Aschenschmelze
Niedriger O <sub>2</sub> -Überschuß erhöht den Wirkungsgrad	Mittlere Anfälligkeit bezüglich Erosion der Wärmetauscherrohre im Wirbelbett
	Verlust von Bettmaterial mit der Asche
Zirkulierende Wirbelschicht-Feuerungen	
Vorteile	Nachteile
Keine bewegten Teile im heißen Feuerraum	Hohe Investitionskosten (erst ab Anlagen > 30 MW <sub>th</sub> interessant)
Effiziente NO <sub>x</sub> Reduktion durch Luftstufung	Hohe Betriebskosten
Hohe Flexibilität bezüglich Wassergehalt und Art der Biomasse-Brennstoffe	Niedrige Flexibilität bezüglich der Brennstoff-Korngröße
Homogene Verbrennungsbedingungen im Feuerraum	Hohe Staubbelastung im Rauchgas
Hohe Wärmeübertragungsleistung durch die hohe Turbulenz	Teillastbetrieb erfordert ein zweites Wirbelbett
Zugabe von Additiven einfach	Verlust von Bettmaterial mit der Asche
Effiziente S-Einbindung in die Asche, wenn genug Ca vorhanden	Hohe Anfälligkeit bezüglich Aschenschmelze
	Mittlere Anfälligkeit bezüglich Erosion der Wärmetauscherrohre

Tabelle 3 stellt die Vorteile, Nachteile und Einsatzbereiche von Rostfeuerungen, stationären und zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen im Überblick dar. Hinsichtlich der zu erwartenden gasförmigen Emissionen dieser Systeme kann festgehalten werden, daß, nach derzeitigem Stand der Technik, Wirbelschichtfeuerungen niedrigere CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen verursachen und Rostfeuerungen niedrigere Staubemissionen und eine besser ausgebrannte Flugasche aufweisen [22, 25, 26].

## 4. Wirkungsgrade und Möglichkeiten der energetischen Optimierung von Biomasseheizwerken

Tabelle 4 gibt einen Überblick über Möglichkeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Biomassefeuerungen und deren Potentiale [1, 27, 28]. Dabei wurde von feuchtem Brennstoff mit einem durchschnittlichen Brennstoff-Wassergehalt von 50 Gew% d. FS ausgegangen, wie er üblicherweise bei Sägenebenenprodukten bzw. Industriehackgut auftritt. Die gewählten feuerungstechnischen Basisparameter entsprechen einer Biomasse-Rostfeuerung bzw. einer Biomasse-Unterschubfeuerung nach Stand der Technik mit nachgeschaltetem Heißwasserkessel. Eine kurze Diskussion der angeführten Maßnahmen erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

**Tabelle 4:** Einfluß verschiedener Maßnahmen auf den Wirkungsgrad von Biomassefeuerungen

Erläuterungen: Zur Berechnung der Wirkungsgradänderungen wurde jeweils von Hackgut als Brennstoff und folgenden Randbedingungen ausgegangen:  $H_o=20,0$  MJ/kg TS; Lufttemperatur:  $5,0^\circ\text{C}$ , Wassergehalt: 50 Gew% d. FS,  $\text{O}_2$ -Gehalt im Rauchgas: 10,0 Vol% (bezogen auf trockenes Rauchgas), Temperatur des Rauchgases bei Kamineintritt:  $180^\circ\text{C}$ ; Wirkungsgrad = vom Kessel abgegebene Wärmeenergie / zugeführte Energie durch Brennstoff und Luft.

Verwendete Abkürzungen:  $H_u$ ....unterer Heizwert;  $H_o$ ....Brennwert;  $C_{org}$ ....organischer Kohlenstoff; RG....Rauchgas.

Maßnahme	Potential
Trocknung von 1,0 t FS an holzartiger Biomasse von 50 auf 30 Gew% d. FS Wassergehalt	8,7% (Erhöhung des Energieinhaltes in % bezogen auf $H_u$ von 1,0 t FS mit 50 Gew% Wassergehalt)
Reduktion des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas um 1,0 Vol% (bezogen auf trockenes RG)	ca. 0,9% (Erhöhung des Wirkungsgrades in % bezogen auf $H_u$ )
Absenkung der Rauchgastemperatur um $10^\circ\text{C}$ (bezogen auf die Kamineintrittstemperatur)	ca. 0,8% (Erhöhung des Wirkungsgrades in % bezogen auf $H_u$ )
Rauchgaskondensation (im Vergleich zu konventionellen Biomassefeuerungen)	rund 17% im Durchschnitt bis maximal 30% (Erhöhung des Wirkungsgrades in % bezogen auf $H_u$ )

Die in modernen, dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden, Biomassefeuerungen hervorgerufenen Wirkungsgradverluste durch unvollständige Verbrennung bzw. schlechten Ausbrand der Aschen sind vernachlässigbar klein. Der Gehalt an unverbranntem organischen Kohlenstoff in der anfallenden Asche liegt normalerweise unter 5,0 Gew% d. TS und der CO-Gehalt im Rauchgas unter  $250\text{ mg/Nm}^3$  (bezogen auf trockenes Rauchgas und 13,0 Vol%  $\text{O}_2$ ) [1, 26].

## **4.1. Innovative Möglichkeiten der Biomassetrocknung**

Durch Brennstofftrocknung besteht die Möglichkeit den unteren Heizwert anzuheben und damit den Wirkungsgrad der Feuerung zu verbessern. Dies ist insbesondere für sehr feuchte Biomasse-Brennstoffe von Interesse. Neben dem energetischen Aspekt kann die Trocknung von Biomasse-Brennstoffen im Heizwerk auch noch andere Vorteile mit sich bringen. Dazu gehören die Verhinderung von Selbstentzündungen von großen Rindenlagern sowie die Reduktion des Substanzverlustes durch mikrobiellen Biomasseabbau bei längeren Lagerzeiten, da die mikrobielle Aktivität mit sinkendem Wassergehalt abnimmt. Als weitere positive Aspekte sind eine Verringerung des benötigten Lagervolumens und eine Reduktion der entstehenden Rauchgasmengen pro kWh erzeugter Energie zu nennen. Trotz dieser für eine Biomassetrocknung sprechenden Argumente muß beachtet werden, daß der durch Trocknung erzielbare energetische bzw. sich daraus ableitende wirtschaftliche Vorteil (durch den geringeren Brennstoffverbrauch) nicht allzu groß ist und daher eine Brennstofftrocknung aufgrund der damit verbundenen zusätzlichen Investitionen und Betriebskosten (Stromkosten, Personal- und Maschinenkosten) oft insgesamt ein negatives wirtschaftliches Resultat für ein Biomasseheizwerk bringen kann und daher vor einer Realisierung genau durchkalkuliert werden muß [29, 30].

Durch das Lagern von großen Biomassehaufen im Freien oder in Lagerhallen über mehrere Monate erfolgt, bedingt durch Selbsterwärmung und natürliche Konvektion, eine Abtrocknung des Materials, die in Österreich bei Lagerung über die Sommermonate zu Reduktionen des Wassergehaltes von 50 Gew% d. FS auf 30 bis 35 Gew% d. FS führen kann. Gleichzeitig kommt es aber auch in Folge der mikrobiellen Aktivität zu einem Substanzabbau der durchschnittlich zwischen 1,0 und 2,0 Gew% d. TS pro Monat beträgt. Die niedrigeren Werte gelten dabei für Holz, die höheren für die leichter abbaubare Rinde [29, 30]. Dadurch ist diese Art der Biomassetrocknung als nicht wirtschaftlich zu betrachten. Das Einlagern des Brennstoffs kann jedoch sinnvoll sein, wenn in den Sommermonaten der Brennstoff zu deutlich günstigeren Preisen eingekauft werden kann.

In fast allen Fällen ist eine Biomassetrocknung im Heizwerk nur wirtschaftlich wenn vorgewärmte Luft günstig oder kostenlos zur Verfügung steht. Beispiele dafür sind die Solartrocknung [1] und die Trocknung mit vorgewärmter Luft aus Rauchgaskondensationsanlagen [1, 12].

## **4.2 Verbrennungs- und regelungstechnische Möglichkeiten der Minimierung des erforderlichen Luftüberschusses und dessen energetische Bewertung**

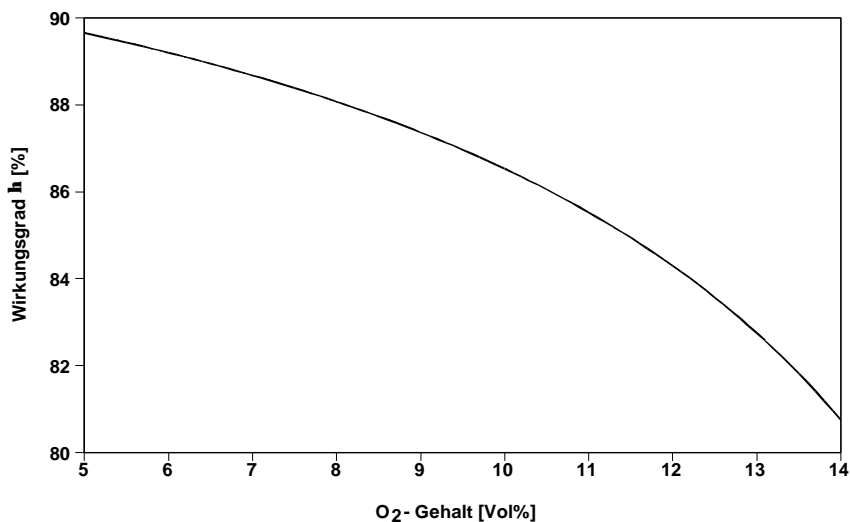
Wie in Tabelle 4 und Abbildung 9 dargestellt, ist durch die Reduktion des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas eine effiziente Möglichkeit zur Erhöhung des Anlagenwirkungsgrad gegeben. Eine feuerungstechnische Möglichkeit zur Reduktion des erforderlichen Luftüberschusses besteht in einer entsprechenden Optimierung der Feuerraumgeometrie und der Luftzufuhr. Regelungstechnisch ist eine Minimierung des Sauerstoffgehaltes unter gleichzeitiger Kontrolle der Verbrennungsqualität durch eine kombinierte O<sub>2</sub>-CO-Regelung möglich [1, 31]. In modernen Rostfeuerungen kann bei Beachtung dieser Randbedingun-

gen der  $O_2$ -Gehalt auf 8,0 bis 9,0 Vol% (bezogen auf trockenes Rauchgas) abgesenkt werden, in Rostfeuerungen mit nachgeschaltetem Heißzyklon auf 6,0 bis 7,0 Vol%, in stationären Wirbelschichtfeuerungen auf 5,0 bis 6,0 Vol% und in zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen auf 2,5 bis 3,5 Vol% [1, 22, 23]. Die Wirtschaftlichkeit einer  $O_2$ -Regelung hängt in erster Linie von den Kosten, der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit der Sensoren ab. Sauerstoffsonden für Biomassefeuerungen sind bereits sehr günstig erhältlich, während CO-Sonden noch relativ teuer sind.

**Abbildung 9:** Der Einfluß des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas auf den Wirkungsgrad der Feuerungsanlage

Erläuterungen: Datenquelle [1]; zur Berechnung wurde von Hackgut als Brennstoff und folgenden Randbedingungen ausgegangen:  $H_o=20,0$  MJ/kg TS; Lufttemperatur:  $5,0^\circ\text{C}$ , Wassergehalt: 50 Gew% d. FS, Temperatur des Rauchgases bei Kamineintritt:  $165^\circ\text{C}$ ; Wirkungsgrad  $\eta$  = vom Kessel abgegebene Wärmeenergie / zugeführte Energie durch Brennstoff (auf  $H_u$  bezogen) und Luft.

Verwendete Abkürzungen:  $H_o$ ...Brennwert.



Beachtet muß in diesem Zusammenhang auch werden, daß mit abnehmendem Sauerstoffgehalt die adiabate Feuerraumtemperatur ansteigt, wodurch deren Regelung erforderlich wird. Diese erfolgt normalerweise durch Rückführung eines Teilstromes des gebildeten Rauchgases (Rauchgasrezirkulation) und wird aus Sicherheitsgründen gegen Temperaturüberschreitungen im Feuerraum und der damit verbundenen Gefahr einer Aschenschmelze in fast allen modernen Biomassefeuerungen, unabhängig davon ob eine  $O_2$ -Regelung erfolgt oder nicht, vorgesehen [1].

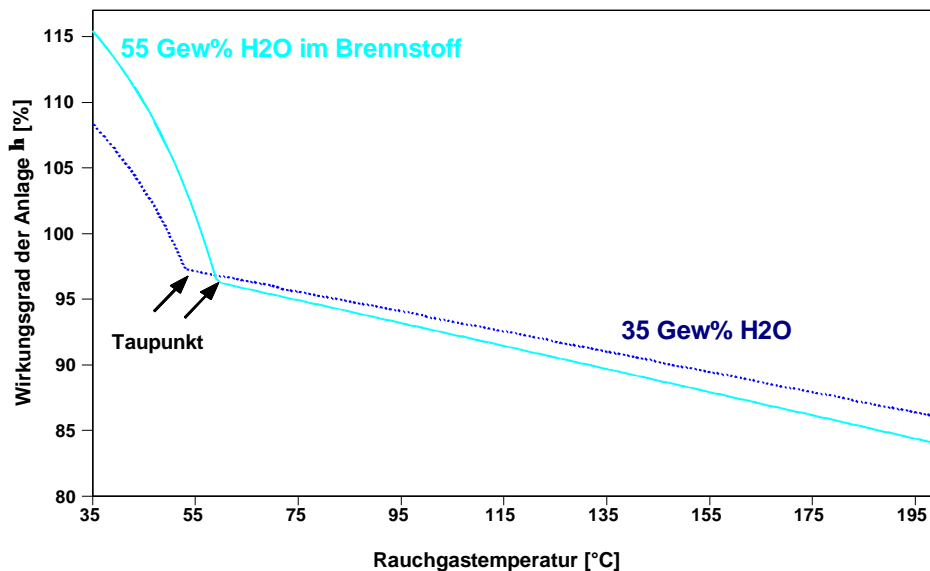
Eine noch wesentlich größere Wirkungsgradverbesserung durch eine Minimierung des  $O_2$ -Gehaltes im Rauchgas läßt sich erzielen, wenn die Biomassefeuerung mit einer nachgeschalteten Rauchgaskondensationsanlage ausgestattet ist (siehe Abschnitt 4.3), da durch die Reduktion des Luftüberschusses der Taupunkt des Rauchgases ansteigt. Bei einer bestimmten Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes kann somit eine deutlich größere Menge an Kondensationswärme des Rauchgases energetisch genutzt werden.

Ein zusätzlicher Vorteil einer Minimierung des erforderlichen Luftüberschusses ist die damit verbundene Verringerung der Rauchgasmenge, die zu einer Reduktion der Druckverluste im Kessel und den nachgeschalteten Anlagenteilen beitragen kann.

### 4.3 Rückgewinnung von fühlbarer und latenter Wärme im Rauchgas

**Abbildung 10:** Erreichbare Wirkungsgrade von Biomassefeuerungen mit Rauchgaskondensationsanlagen in Abhängigkeit von der Rauchgasaustrittstemperatur aus dem Kondensator

Erläuterungen: Datenquelle [1]; zur Berechnung wurde von Hackgut als Brennstoff und folgenden Randbedingungen ausgegangen:  $H_o=20,0$  MJ/kg TS; Lufttemperatur:  $5,0^\circ\text{C}$ ,  $\text{O}_2$ -Gehalt (bezogen auf trockenes Rauchgas): 9,4 Vol%, H-Gehalt des Brennstoffes: 6,0 Gew% d. TS; der Taupunkt bezieht sich auf den im Rauchgas enthaltenen Wasserdampf; Wirkungsgrad  $\eta$  = Summe der vom Kessel, dem Economiser und dem Kondensator abgegebene Wärmeenergie / zugeführte Energie durch Brennstoff (auf  $H_u$  bezogen) und Luft; Wassergehaltsangaben in Gew% d. FS.



Die effektivste Methode der Wärmerückgewinnung aus Biomassefeuerungen besteht in der Installation einer Rauchgaskondensationsanlage. In der Praxis ist die erreichbare Energierückgewinnung aus dieser Kondensationsstufe von der Menge und Temperatur der benötigten Niedertemperatur-Wärme im Fernwärmenetz abhängig. Je tiefer das Rauchgas durch den Netzzrücklauf gekühlt werden kann, desto höher das Potential an rückgewinnbarer fühlbarer und bei Unterschreitung des Taupunktes insbesondere auch an latenter Wärme (siehe Abbildung 10). Bereits vorliegende Betriebsdaten aus in österreichischen Biomasseheizwerken installierten Rauchgaskondensationsanlagen zeigen, daß durchschnittlich Anlagenwirkungsgrade von rund 102% (bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes) bzw. von rund 82,5% (bezogen auf den Brennwert des Brennstoffes) erreichbar sind [1, 32]. Das Wärmerückgewinnungspotential durch Rauchgaskondensation ist somit sehr hoch. Falls aufgrund zu hoher Temperaturen des Netzzrücklaufes keine Kondensationswärme des Rauchgases genutzt werden kann, ist auf jeden Fall die Rückgewinnung eines beträchtlichen Teils der fühlbaren Wärme im Rauchgas durch Verwendung eines Economisers möglich. Der Anlagenwirkungsgrad kann nur durch eine Economiserstufe laut Abbildung

10 auf rund 96% (bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes) angehoben werden, was einer Wirkungsgradverbesserung von rund 10% im Vergleich zu konventionellen Feuerungsanlagen ohne Wärmerückgewinnung entspricht.

Ein weiterer großer Vorteil neben der Wärmerückgewinnung aus dem Rauchgas ist, daß durch die Kondensation auch eine durchaus effiziente Entstaubung des Rauchgases von 60 bis 85% (bezogen auf die Staubbelastung des Rauchgases am Eintritt zur Kondensationsanlage) erfolgt [1].

#### **4.4 Die Optimierung des Stromeinsatzes in Biomasseheizwerken**

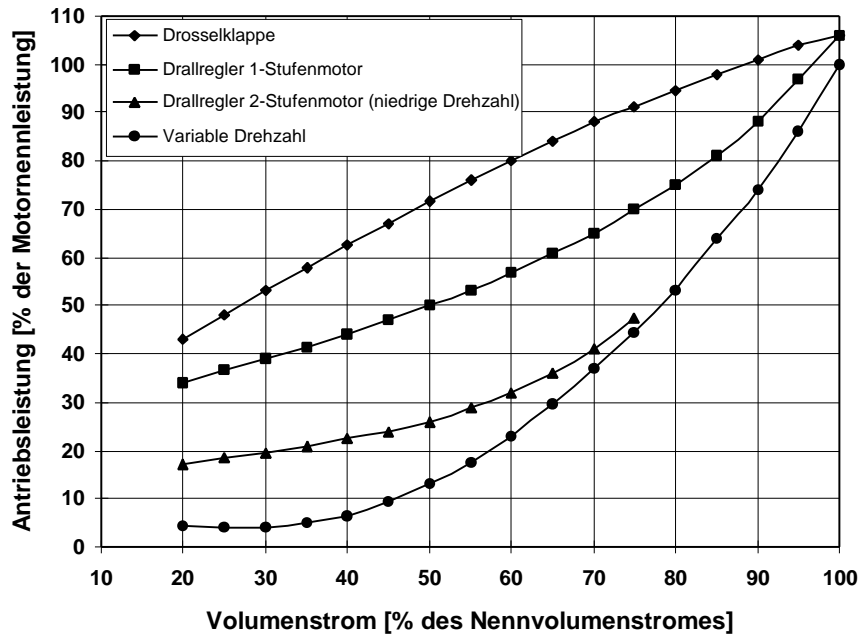
Nach Berechnungen aus Betriebsdaten von österreichischen Biomasseheizwerken betrug der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch im Jahre 1992 zwischen 13 und 28 kWh gesamt verbrauchter elektrischer Energie pro erzeugter MWh thermischer Energie durch die Heizanlage [1]. Der Einsatz elektrischer Energie setzt sich zusammen aus dem Stromverbrauch für Betrieb und Regelung der Feuerungsanlage (insbesondere für den Ventilatorenbetrieb und die Brennstoffförderung), dem Stromverbrauch des Fernwärmenetzes (der Netzpumpen), dem Stromverbrauch der Kondensationsanlage (Entschwadungsluftventilator) und dem sonstigen Stromverbrauch (für Beleuchtung, EDV, Reparaturen). Nachdem frequenzgeregelte Netzpumpenregelungen bereits Stand der Technik sind, liegt das Haupteinsparungspotential bei der Optimierung der Ventilatorendimensionierung und Ventilatorenregelung. Eine deutliche Stromverbrauchsreduktion erscheint hier realisierbar, wenn man bedenkt, daß in einer Biomassefeuerung normalerweise 2 bis 3 Primärluftventilatoren, 2 Sekundärluftventilatoren, ein Rauchgasrezirkulationsventilator, ein Saugzugventilator und bei Betrieb einer Rauchgaskondensationsanlage auch noch 1 bis 2 Entschwadungsluftventilatoren arbeiten und diese Ventilatoren häufig noch klappen- bzw. Drallgeregelt sind.

Abbildung 11 zeigt qualitativ die benötigte Antriebsleistung bei verschiedenen Ventilatorenregelsystemen in Abhängigkeit vom Volumensstrom. Hieraus ist der eindeutige Vorteil der Drehzahlregelung im gesamten Arbeitsbereich gegenüber der Drall- bzw. Drosselklappenregelung ersichtlich. Vor allem im Bereich zwischen 30 und 70% des Nennvolumenstromes ergibt sich bei Drehzahlregelung eine beträchtliche Reduzierung der Antriebsenergie insbesondere gegenüber der Drosselklappenregelung. Dies ist besonders im Hinblick auf den in Biomasseheizwerken häufig dominierenden Teillastbetrieb interessant, da sich hier durch umrüsten bestehender, konventioneller Regelsysteme auf drehzahlgesteuerte Regelungen beträchtliche Einsparungen bei den Betriebskosten erzielen lassen.

Der spezifische Stromverbrauch österreichischer Biomassefernheizwerke betrug 1994 durchschnittlich 15 kWh pro MWh erzeugte Wärmeenergie. Dieser Wert kann durch Optimierung der Ventilatorenauswahl und Ventilatorenregelung auf weniger als 10 kWh/MWh reduziert werden [1, 32, 33].

**Abbildung 11:** Vergleich der benötigten Antriebsleistung verschiedener Systeme zur Volumenstromregelung von Ventilatoren

Erläuterungen: Datenquelle: [33].



Die Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern hat sich aus energetischen Gründen in den letzten Jahren zum Industriestandard entwickelt. Deshalb bietet sich diese Regelungsmethode für den Einsatz in neu zu errichtenden Biomassefeuerungen und auch für die Umrüstung bestehender, konventioneller Regelungen an (die Amortisationszeiten für derartige Maßnahmen liegen zwischen ein und zwei Jahren).

#### 4.5. Optimierte Auslegung und Regelung von Fernwärmenetzen

Die größten Wärmeverluste der derzeit in Österreich in Betrieb befindlichen Biomassefernheizwerke treten während des Wärmetransportes im Leitungsnetz auf. Sie lagen 1994 bei durchschnittlich 28% der vom Heizwerk ausgelieferten Wärme. Weiters beträgt der Investitionskostenanteil der Fernwärmenetze im Durchschnitt fast 50% der Gesamtinvestitionskosten der Anlage, was die Bedeutung dieser Thematik noch unterstreicht [1].

Eine korrekte Rohrdimensionierung verringert die Investitionskosten und stellt für eine Minimierung der Betriebskosten (Wärmeverlust- und Pumpkosten) eine wesentliche Grundlage dar. Durch korrekte und genaue Wärmebedarfserhebungen sowie eine EDV-gestützte Netzauslegung und Netzregelung, die auf dem derzeitigen Stand der Technik basiert, erscheint eine Reduktion der durchschnittlich auftretenden Wärmeverluste auf rund 20% (bezogen auf die vom Heizwerk ausgelieferte Wärme) realistisch.

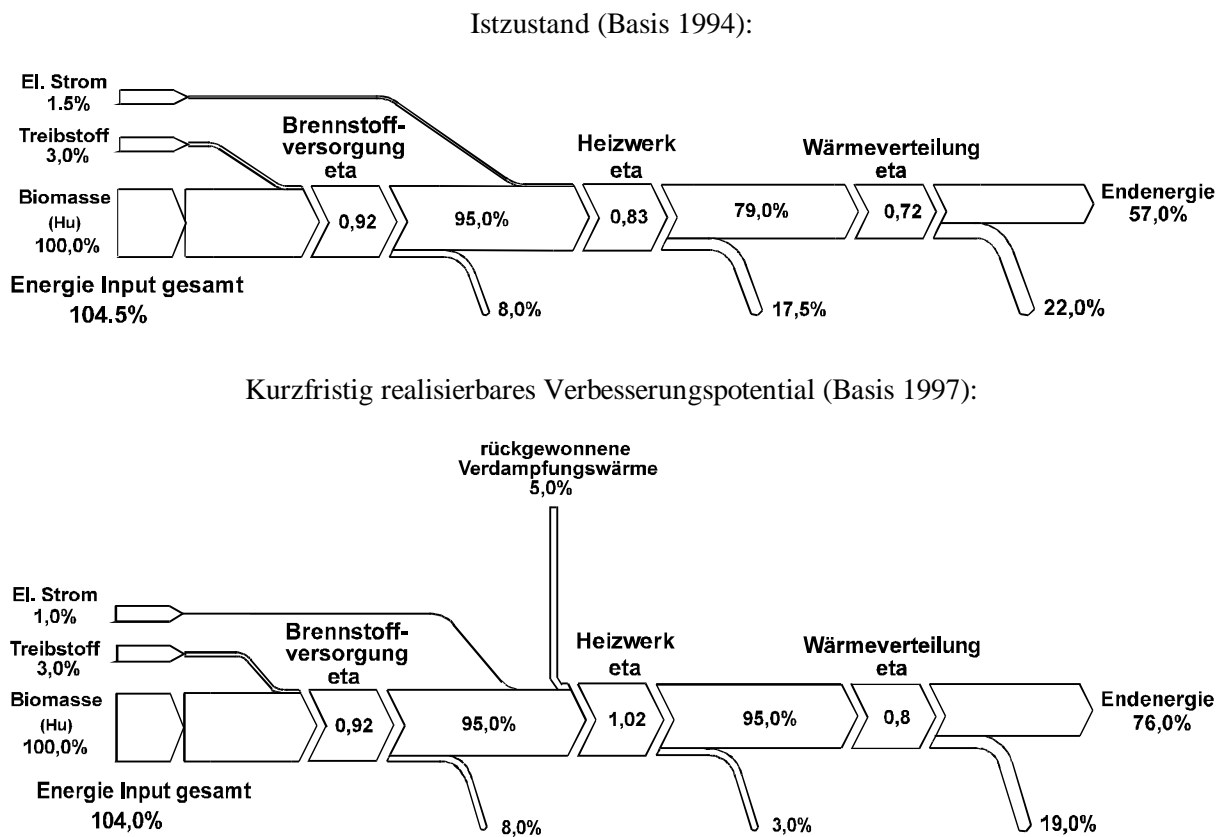
#### 4.6. Die bei der thermischen Nutzung fester Biomasse auftretenden Wirkungsgrade - Istzustand und zukünftiges Verbesserungspotential

Abbildung 12 stellt die im Zuge der thermischen Biomassenutzung zu berücksichtigenden Energieeinsätze, Energieverluste und die daraus resultierenden Wirkungsgrade für die Bereiche Brennstoffaufbereitung, Konversion (Verbrennung) und Wärmetransport dar. Weiters wird, als Schlußfolgerung aus den in den Abschnitten 4.1 bis 4.5 besprochenen Möglichkeiten der energetischen Optimierung von Biomassefeuerungen das realistisch erscheinende Verbesserungspotential, das bei der Errichtung von Neuanlagen genutzt werden kann, aufgezeigt.

**Abbildung 12:** Energieflüsse und daraus resultierende Wirkungsgrade im Zuge der thermischen Biomassenutzung - Istzustand und kurzfristig realisierbares Verbesserungspotential

Erläuterungen: Datenquellen [1, 34]; Bezugsperiode 1994; der Wirkungsgrad der Brennstoffbereitstellung und der Verbrennung beziehen sich jeweils auf den durchschnittlichen unteren Heizwert von Säge Nebenprodukten (Rinde, Industriehackgut, Späne mit ca. 50 Gew% d. FS Wassergehalt); Wirkungsgrad der Wärmeverteilung = an die Kunden gelieferte Wärme ab Übergabestation (=Endenergie) / produzierte Wärme im Heizwerk; der Einsatz von Fremdenergien ist ebenfalls auf den unteren Heizwert des Biomasse-Brennstoffes bezogen.

Verwendete Abkürzungen:  $H_u$ ....unterer Heizwert;  $\eta$ ....Wirkungsgrad.



Die durchschnittlichen Energieverluste für Biomasseernte und Biomasseaufbereitung (Durchforstung, Fällung, Rückung, Entrindung, Hackschnitzelerzeugung), den Transport und die Lagerung (Lagerverluste) belaufen sich für österreichische Biomassefernheizwerke auf durchschnittlich 8% des

unteren Heizwertes des Biomasse-Brennstoffes. Dabei entfallen rund 3% auf Treib- und Schmierstoffe und 5% auf Trockensubstanzverluste während der Lagerung. Der durchschnittliche Wirkungsgrad der Konversion (Verbrennung) lag nach vorliegenden Erhebungen für österreichische Biomassefernheizwerke und Biomassefeuerungen in Holzverarbeitenden Betrieben mit Kesselnennleistungen größer 0,5 MW<sub>th</sub> 1994 bei durchschnittlich 83% (bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes) [1]. Alle weiteren in Abbildung 12 enthaltenen Wirkungsgrade und Verbesserungspotentiale wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert.

Der durchschnittliche Gesamtwirkungsgrad der österreichischen Biomassefernheizwerke, einschließlich aller auftretenden Verluste, beträgt somit derzeit rund 57% (bezogen auf den mittleren unteren Heizwert der eingesetzten Brennstoffe). Berücksichtigt man die angesprochenen Verbesserungsmaßnahmen, dann kann der Gesamtwirkungsgrad bereits bestehender Anlagen auf bis zu 66% und für neu zu errichtende Anlagen mit Rauchgaskondensation auf bis zu 75% gesteigert werden. Dieses große energetische Verbesserungspotential sollte bei der Auslegung neuer Biomasseheizwerke aber auch für die Verbesserung bestehender Anlagen beachtet und genutzt werden, um die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen zu verbessern und dadurch deren Konkurrenzfähigkeit gegenüber fossilen Energieträgern zu erhöhen.

## **5. Verbrennungsbedingte Emissionen von Biomassefeuerungen und deren Bewertung**

In diesem Kapitel soll kurz auf die Grundlagen der Verbrennung eingegangen werden. Weiters erfolgt eine Übersicht über die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen, wobei insbesondere auf gasförmige Emissionen und die Möglichkeiten der Reduktion umweltrelevanter Schadstoffe durch entsprechende verfahrens- und regelungstechnische Maßnahmen überblicksweise eingegangen wird. Hinsichtlich der bei der Biomasseverbrennung anfallenden festen Emissionen (die Aschen) und flüssigen Emissionen (das Kondensatwasser) wird auf die entsprechenden Beiträge in diesem VDI-Bericht verwiesen.

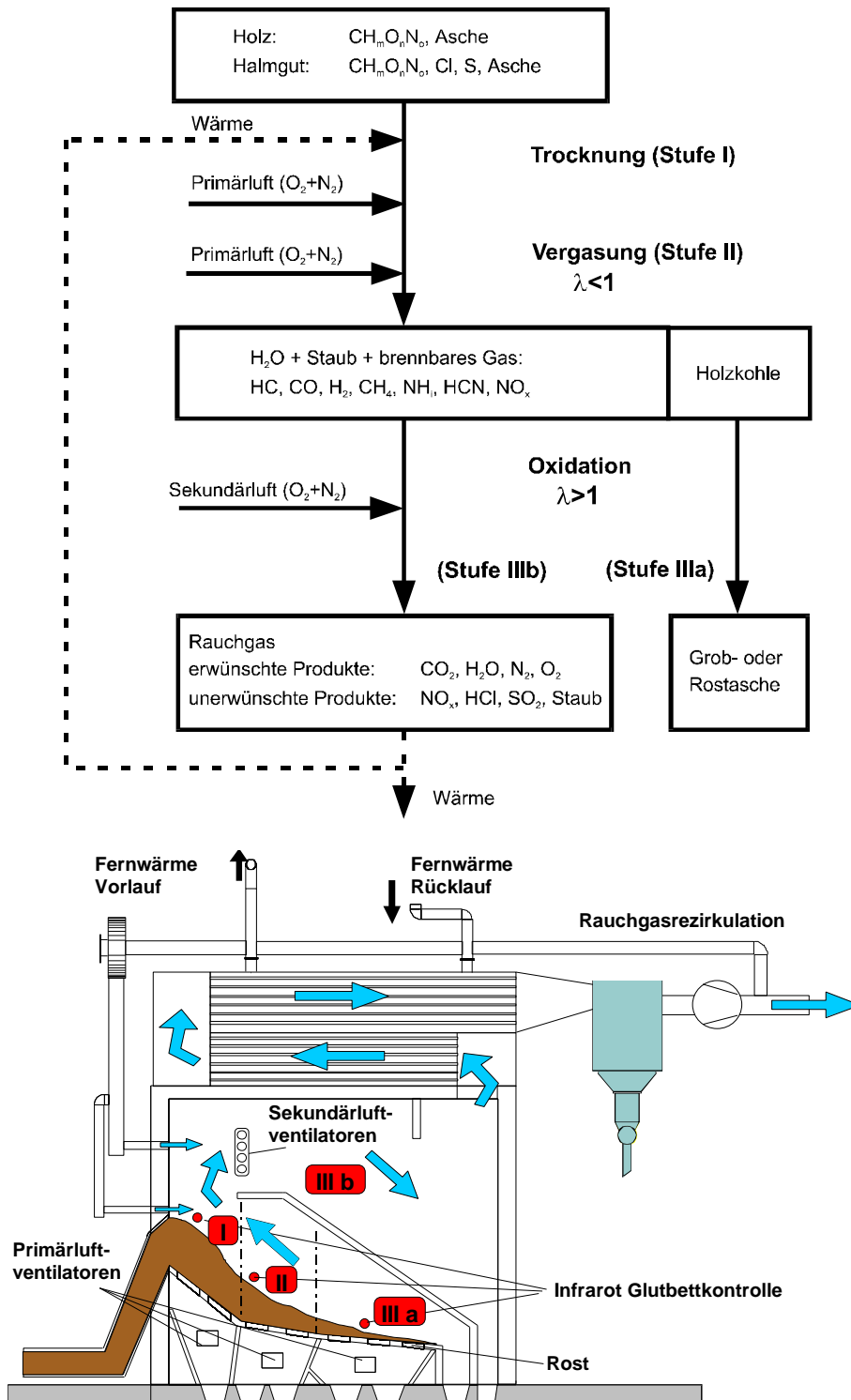
### **5.1. Grundlagen und Anforderungen für eine schadstoffarme Verbrennung fester Biomasse**

Die Holzverbrennung erfolgt prinzipiell in 3 Stufen (siehe Abbildung 13):

- I) der Trocknung (bis ca. 150 °C),
- II) der Vergasung (150 - 600 °C;  $\lambda < 1$ ) und
- III) der Oxidation (400 - 1.300 °C;  $\lambda > 1$ ) von
  - a) der Holzkohle und
  - b) der brennbaren Gase.

**Abbildung 13:** Schematische Darstellung des Ablaufes der Verbrennung fester Biomasse und der räumlichen Zuordnung dieser Phasen in einer Rostfeuerung

Erläuterungen: Datenquellen [1, 35, 36].



Den Stufen I, II und IIIa sollten bei Rostfeuerungen auch drei getrennte Rostbereiche entsprechen, um die einzelnen Phasen der Verbrennung optimal regeln zu können (siehe auch Abschnitt 3). Stufe IIIb sollte bei allen Biomassefeuerungen räumlich getrennt von den anderen Verbrennungsphasen ablaufen.

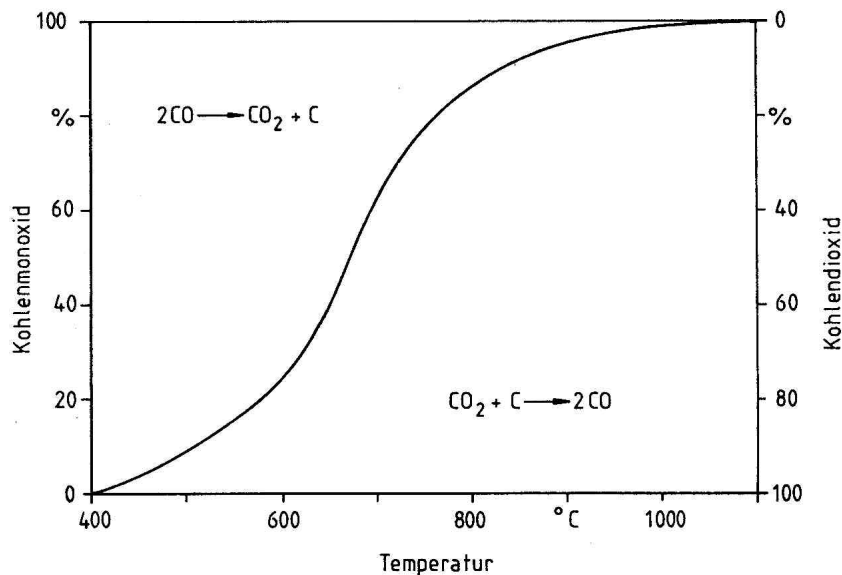
In der Trocknungsphase, die nur bei sehr feuchten Brennstoffen von Relevanz ist, erfolgt eine Vorwärmung und Trocknung des Brennstoffes durch die Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers. Die dafür erforderliche Wärme wird von den gebildeten heißen Rauchgasen aus der Vergasungszone sowie durch Strahlungswärme der Feuerraumwände bereitgestellt.

Ab Temperaturen von 150°C beginnt langsam die Freisetzung flüchtiger Verbindungen, nämlich CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und weiterer organischer Komponenten. Ab 300°C setzt dieser Prozeß voll ein und bei Temperaturen von 500 bis 600°C sind rund 85% der Brennstoff-Trockensubstanz in Gase umgesetzt. Die Temperaturbereiche in denen diese Vergasungsreaktionen ablaufen variieren für die einzelnen Biomasse-Brennstoffe nur geringfügig [1].

Auf die während der Vergasung der Biomasse ablaufenden einzelnen Pyrolysereaktionen und heterogenen Gas-Fest-Reaktionen soll hier nicht näher eingegangen werden, sie sind in [35, 36] beschrieben. Ein für die Verbrennung fester Biomasse sehr wesentliches Reaktionsgleichgewicht, das sog. Boudouardgleichgewicht (siehe Abbildung 14), soll aber noch etwas genauer behandelt werden, da es für die Erreichung einer vollständigen Verbrennung und die Konzeption des Feuerraumes von großer Bedeutung ist. Bei hohen Temperaturen wird CO<sub>2</sub> an Kohlenstoff zu CO reduziert. Das Gleichgewicht dieser Reaktion liegt bei Temperaturen über 1.000°C praktisch vollständig beim CO. Zur Vermeidung dieser unerwünschten Rückreaktion ist es notwendig, die Oxidationszone der brennbaren Gase (Stufe IIIb) in der Feuerung von der Entgasungszone und der Oxidationszone der Holzkohle zu trennen.

**Abbildung 14:** Gleichgewichtskurve der Boudouardreaktion bei 1,0 bar

Erläuterungen: Datenquelle [36].



Feuerungstechnisch heißt das, daß für die vollständige Oxidation der gebildeten brennbaren Gase eine eigene Verbrennungszone, die sogenannte Sekundärverbrennungszone erforderlich ist und sich in dieser Zone, in der normalerweise Temperaturen zwischen 800 und 1.100°C auftreten, möglichst keine festen unverbrannten Anteile mehr im Rauchgas befinden sollten. Eine Temperatur von 800°C muß in der Oxidationszone als Mindesttemperatur angesehen werden, um eine vollständige Verbrennung bei ak-

zeptablen Verweilzeiten (Feuerraumgrößen) zu erreichen. Bei niedrigeren Temperaturen laufen die in dieser Zone erfolgenden Gas-Gas-Reaktionen zu langsam ab [35, 36]. Bei Rostfeuerungen muß daher versucht werden, das Glutbett auf dem Rost möglichst ruhig zu halten, um eine Aufwirbelung unverbrannter Brennstoffteilchen weitgehend zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist es auch von großer Bedeutung die Feuerungsanlage bei Teillast kontinuierlich betreiben zu können, da jeder An- und Abfahrvorgang einer Feuerung Emissionsspitzen verursacht. Die zur Erfüllung dieser Bedingungen erforderliche Anlagentechnik wurde bereits in Abschnitt 3 erläutert.

Eine zusätzliche Anforderung an moderne Biomassefeuerungen ist die, daß aufgrund der bereits gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich einer  $\text{NO}_x$ -Reduktion durch Primärmaßnahmen versucht werden sollte in der Primärverbrennungszone, wo die Trocknung und Entgasung des Brennstoffes abläuft, nach Möglichkeit understöchiometrische Luftverhältnisse zu gewährleisten [1, 12, 31].

Aus diesen Anforderungen an die Feuerungs- und Regelungstechnik hinsichtlich der Erreichung einer möglichst vollständigen und emissionsarmen Verbrennung wird klar, wieso der Möglichkeit der getrennten Primärluftzufuhr in den einzelnen Bereichen einer Rostfeuerung so große Bedeutung zukommt. In der obersten Rostzone erfolgt bei Einsatz feuchter Brennstoffe die Trocknung. Die in dieser Zone zugeführte Primärluft dient somit weitgehend zum Abtransport des gebildeten Wasserdampfes und reagiert bei Gegenstrom-Rostfeuerungen erst am Übergang von der Primär- in die Sekundärverbrennungszone mit den gebildeten brennbaren Gasen (sie kann in diesem Fall somit nur zum Teil als Primärluft angesehen werden). Für trockene Brennstoffe kann dieser Rostbereich entfallen. Die mittlere Rostzone dient der Vergasung des Brennstoffes, hier ist eine genau dosierte Primärluftzufuhr besonders wichtig. In der untersten Rostzone erfolgt die Oxidation der Holzkohle. Die dafür erforderliche Primärluft sollte ebenfalls möglichst genau dosiert werden, um eine Rückvermischung des überschüssigen Sauerstoffes in die Vergasungszone zu verhindern.

Die Verweilzeit der Rauchgase in der Primärverbrennungszone sollte zumindest 0,5 Sekunden, die in der Sekundärverbrennungszone (bei Temperaturen größer  $800^\circ\text{C}$ ) größer als 1,0 Sekunden sein [1].

## **5.2. Durchschnittliche Emissionen von Biomassefeuerungen**

Um die Emissionen von Biomassefernheizwerken korrekt und repräsentativ erfassen zu können, wurde versucht, neben den eigenen durchgeführten Messungen an Biomassefeuerungsanlagen eine möglichst breite Menge an vorhandenem Datenmaterial aus anderen aktuellen Forschungsarbeiten in die Auswertung miteinzubeziehen [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]. Die in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse beziehen sich dabei nur auf Rost- und Unterschubfeuerungen, die Hackgut, Rinde oder Sägespäne als Brennstoff einsetzen und Kesselnennleistungen zwischen 0,5 und  $10,0 \text{ MW}_{\text{th}}$  aufweisen. Für Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen sind bisher zu wenige und zu stark schwankende Einzelmeßwerte vorhanden, um repräsentative Bereiche festlegen zu können. Alle Werte sind im Vergleich zu den bundesweit gültigen gesetzlichen Grenzwerten laut Österreichischen Luftreinhaltegesetz 1989 dargestellt.

Die in Tabelle 5 angeführten Resultate entsprechen dem momentanen Wissens- und Technologiestand und können nicht als endgültig angesehen werden. Vielmehr ist eine laufende Anpassung an neue Erkenntnisse notwendig. Im Gegensatz zu den meisten fossilen Energieträgern kommt es bei Biomasse durch die stark schwankenden Brennstoffeigenschaften (Wassergehalt, Korngröße, Ascheschmelzverhalten) und unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen in Abhängigkeit vom Alter und der Größe der Anlagen zu teilweise stark differierenden Ergebnissen.

**Tabelle 5:** Durchschnittliche Emissionen österreichischer Biomassefeuerungen

Erläuterungen: Die angegebenen Daten beziehen sich auf Hackgut-, Rinden- und Sägespänefeuerungen mit Kesselnennleistungen zwischen 0,5 und 10,0 MW<sub>th</sub>.

Verwendete Abkürzungen: TE....Toxizitätsäquivalent; PCDD/F....polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane; PAK....polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe; B[a]P....Benzo[a]pyren; TOC....total organic carbon (Summe der Kohlenwasserstoffe C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>); RGtr....trockenes Rauchgas.

Parameter		Bereich der Emissionen	Erläuterungen zu den Emissionsdaten (Quellenangaben und Bemerkungen)
CO <sub>2</sub>	[kg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	[0,151]	eigene Berechnungen und Stoffbilanzen
	Gesetzl. Grenzwert:	keiner	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
Staub	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	30,0 - 250,0	[66, 69, 70]
	Meßdatenanzahl:	39	und eigene Messungen
	Gesetzl. Grenzwert:	bis 2 MW: 150; bis 5 MW: 120; über 5 MW: 50	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
CO	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	100,0 - 1.600,0	[66, 69, 70]
	Meßdatenanzahl:	25	und eigene Messungen
	Gesetzl. Grenzwert:	unter 2 MW: keiner; über 2 MW: 250	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	130,0 - 270,0	[39, 40, 66, 69, 70]
	Meßdatenanzahl:	22	[T.NUSSBAUMER, 1989]
	Gesetzl. Grenzwert:	unter 3 MW: keiner; über 3 MW: 300	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
TOC	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	4,0 - 10,0	berechnet aus Abhängigkeit TOC - CO nach [39, 40]
	Gesetzl. Grenzwert:	bis 0,5 MW: 150; bis 1 MW: 100; über 1 MW: 50	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
Benzo[a]pyren	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	4,0E-06 - 8,3E-04	[51, 71]
	Gesetzl. Grenzwert:	0,1	(Daten beziehen sich auf RG und Flugstaub) [ TA-Luft ]
PCDD/F	[ngTE / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	0,01 - 0,23	[51, 52, 60]
	Meßdatenanzahl:	8	(Daten beziehen sich auf RG und Flugstaub)
	Gesetzl. Grenzwert:	über 10 MW: 0,1	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
SO <sub>2</sub> (RG+Staub)	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	15,0 - 60,0	[66, 69, 70] und eigene Messungen und Stoffbilanzen
	Meßdatenanzahl:	17	(Daten beziehen sich auf RG und Flugstaub)
	Gesetzl. Grenzwert:	keiner	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
Cl (RG+Staub)	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	1,0 - 8,0	[66, 69, 70] und eigene Messungen und Stoffbilanzen
	Meßdatenanzahl:	12	(Daten beziehen sich auf RG und Flugstaub)
	Gesetzl. Grenzwert:	keiner	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
F	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ]	0,20	[66, 69, 70] (nur Mittelwerte angegeben)
	Gesetzl. Grenzwert:	keiner	[Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]
PAK	[mg / Nm <sup>3</sup> RGtr.; 13%O <sub>2</sub> ] (16 Verb. laut US-EPA)	5,0E-04 - 5,0E-02	[51] und Berechnungen aus der Abhängigkeit PAH - CO nach [40]
	Gesetzl. Grenzwert:	keiner	(Daten beziehen sich auf RG und Flugstaub) [Ö. LUFTREINHALTEVERORDNUNG, 1989]

Als alle berücksichtigten Emissionsparameter sind die Ergebnisse als Bereich angegeben, der zwischen den durch die Standardabweichung um den Mittelwert aller berücksichtigten Einzelwerte festgelegten Grenzen liegt.

Für SO<sub>2</sub>, Cl, PCDD/F und PAK beziehen sich die Ergebnisse jeweils auf die Summe der im Rauchgas selbst und im mitgeführten Flugstaub enthaltenen Konzentrationen. Die Brutto-CO<sub>2</sub>-Emission wurde in Abhängigkeit von der mittleren Brennstoffzusammensetzung für holzartige Brennstoffe und der C-Konzentration in den anfallenden Aschen auf Basis von 8 vorliegenden Stoffbilanzen um Biomassefernheizwerke berechnet [1].

### Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse

Die Auswertung der Einzelemissionsdaten zeigte, daß bei zunehmender Anlagengröße die Emissionen normalerweise deutlich abnehmen. Dies liegt einerseits an der besseren Anlagenregelung, andererseits an effizienteren Rauchgasreinigungseinrichtungen (Anlagen mit mehr als 4 MW<sub>th</sub> Kesselnennleistung sind normalerweise neben einem Multizyklon auch mit einem E-Filter oder einer Rauchgaskondensationsanlage ausgestattet). Eine Ausnahme stellt in diesem Zusammenhang die NO<sub>x</sub>-Konzentration im Rauchgas dar. Sie steigt mit abnehmendem CO-Gehalt (verringerten reduzierenden Bedingungen) an. Für kleinere Biomassefeuerungen sind teure Regeleinrichtungen und Feinstaubabscheider aufgrund der derzeit schwierigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Österreich (niedrige Fossilenergiepreise) nicht bzw. nur teilweise finanzierbar.

Weiters nehmen mit zunehmender Anlagengröße die auftretenden Emissionsschwankungen zwischen den vorliegenden bzw. durchgeführten Einzelmessungen deutlich ab. Der Heizwerksbetrieb läuft, aufgrund besserer Regelungssysteme, kontinuierlicher und besser kontrolliert ab. Die Emissionen sind trotz des bezüglich Zusammensetzung und Feuchte inhomogenen Brennstoffes Biomasse gut kalkulierbar. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang der Übergang von einer "Stop and Go-Regelung" zu einer kontinuierlichen Anlagenregelung, die wiederholte tägliche An- und Abfahrvorgänge vermeidet.

Im Einzelnen können die in Tabelle 5 angeführten Emissionen wie folgt beurteilt werden:

- a) Die Emissionen an SO<sub>2</sub>, Cl und F sind bei der Verfeuerung holzartiger Biomasse gering, da die entsprechenden Konzentrationen im Brennstoff sehr klein sind. Vorliegende Einzelmeßergebnisse aus Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen liegen für Cl zwischen 80 und 800 mg/Nm<sup>3</sup> (trockenes Rauchgas; 13,0 Vol% O<sub>2</sub>) [42, 43].
- b) Die Emissionen an TOC und PAK (inklusive B[a]P) sind ebenfalls als gering einzustufen und können durch Reduktion der CO-Emissionen weiter gesenkt werden.
- c) Die PCDD/F-Emissionen sind beim Einsatz von chemisch unbehandelter holzartiger Biomasse sehr gering.
- d) Das bei der Verbrennung von Biomasse emittierte CO<sub>2</sub> ist weitgehend aufkommensneutral. Das heißt, daß bei einer nachhaltigen Waldwirtschaft die bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub>-Menge wieder

durch die nachwachsende Biomasse gebunden wird. Aus diesem Grund wurde der in Tabelle 5 angeführte Emissionswert in Klammern dargestellt.

- e) Die CO-Emissionen sind insbesondere bei älteren Anlagen noch zu hoch. Durch eine frequenzgeregelte Luftzufuhr, eine Regelung des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas sowie besser ausschamottierte Feuerräume kann ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb und eine höhere und konstantere Brennkammertemperatur erreicht werden, was zu einer wesentlich besseren Verbrennung führt. Es ist somit in den nächsten Jahren durch die steigende Inbetriebnahme technologisch verbesserter Anlagen mit einer schrittweisen Absenkung der CO-Emissionen zu rechnen. Die CO-Emissionen von Anlagen größer  $2 \text{ MW}_{\text{th}}$  sind bereits derzeit niedrig.
- f) Die Staubemissionen sollten aus ökologischen Gründen weiter abgesenkt werden. Das angestrebte Ziel ist die Einhaltung von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  (bezogen auf trockenes Rauchgas und  $13,0 \text{ Vol\% O}_2$ ). Durch eine verbesserte Staubabscheidung kann ein Großteil der im Rauchgas enthaltenen PCDD/F und leicht flüchtigen Schwermetalle (Cd, Zn, As, Pb) aus dem Gasstrom entfernt werden, da diese zum Großteil an den Staubpartikeln angelagert sind [1, 17]. Innovative Technologien werden zukünftig auch für kleinere Biomassefeuerungen einen wirtschaftlichen Einsatz von Feinststaubabscheidern ermöglichen [1, 44].
- g) Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind bei großen und neuen Biomassefeuerungen oft höher als bei älteren Anlagen, da sie mit abnehmendem CO-Gehalt im Rauchgas ansteigen. Da eine schrittweise Reduktion der CO-Emissionen durch die verbesserte Anlagen- und Regelungstechnik von Neuanlagen erfolgt und N-reichere Brennstoffe wie Stroh- und Ganzpflanzen verstärkt zum Einsatz kommen, ist mit einem Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu rechnen, wenn dem nicht durch entsprechende Maßnahmen entgegen gewirkt wird.  $\text{NO}_x$ -Emissionsmessungen für Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen ergaben Werte zwischen  $250$  und  $600 \text{ mg/Nm}^3$  (trockenes Rauchgas;  $13,0 \text{ Vol\% O}_2$ ) [42, 43]. Auf diesem Gebiet besteht für die nahe Zukunft großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

## **6. Forschungs- und Entwicklungsrichtungen auf dem Gebiet der thermischen Biomassenutzung in Europa**

Tabelle 6 enthält eine Übersicht der wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsbereiche auf dem Gebiet der Biomasseverbrennung. Einen Schwerpunkt dieser Arbeiten stellt die Erforschung des Verhaltens der aschebildenden Elemente (Alkali- und Erdalkalimetalle, Schwefel, Chlor, Schwermetalle) während der Biomasseverbrennung dar. Die wichtigsten Fragestellungen dieses sehr umfassenden und komplexen Gebietes, die es in diesem Zusammenhang zu lösen gilt, betreffen die Verhinderung von Aschenschmelze während der Verbrennung, die Hintanhaltung von Ablagerungen und Korrosion auf Wärmetauscherrohren, die fraktionierte Schwermetallabscheidung in Biomassefeuerungen, die nachhaltige Verwendung der bei der Verbrennung entstehenden Biomasse-Aschen und die Minimierung partikelförmiger Emissionen. Diese Punkte sind hinsichtlich der Umweltverträglichkeit, Betriebssicherheit und Lebensdauer von Biomassefeuerungen von großer Bedeutung. Die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet haben in Öster-

reich, Dänemark, Schweden, Finnland und den USA vor rund fünf Jahren begonnen, wesentliche grundlegende Erkenntnisse wurden bereits erarbeitet, viele Fragen sind aber auch noch offen [1, 24, 44, 45, 46, 47].

Mit in diesen Bereich des Verhaltens aschebildender Elemente in Biomassefeuerungen spielt auch die Charakterisierung und der Einsatz von Energiepflanzen als Brennstoff sowie die Möglichkeit deren Verbrennungsqualität durch entsprechende landwirtschaftliche Primärmaßnahmen während des Anbaues und der Ernte zu verbessern. Auf diesem Gebiet sind vor allem Schweden, Dänemark und Deutschland tätig.

**Tabelle 6:** Wichtige europäische Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Biomasseverbrennung

Erläuterungen: Datenquellen [1, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

Forschungsgebiet	Status
Aschecharakterisierung und Aschenverwertung	läuft
Verhalten aschebildender Elemente während der Verbrennung und Vergasung von Biomasse	läuft
Ascheschmelzverhalten	laufend / geplant
Testläufe mit Ganzpflanzen, Gräsern und Miscanthus als Brennstoffe	laufend / geplant
Ablagerungen und Korrosion in Biomassefeuerungen	laufend / geplant
Pelletierung und Brikettierung von Biomasse - Potential, Verfahrensoptimierung, logistische Aspekte, Feuerungstechnik	laufend / geplant
Entwicklung von neuen Technologien für KWK-Anlagen im kleinen Leistungsbereich (< 10MW <sub>th</sub> ) (Sterling-Motor, Schraubenexpansionsmaschine, ORC-Prozesse)	läuft
Demonstration von neuen Technologien für KWK-Anlagen im kleinen Leistungsbereich (< 10MW <sub>th</sub> ) (Sterling-Motor, Schraubenexpansionsmaschine, ORC-Prozesse)	geplant
Neue wirtschaftliche und effiziente Technologien zur Biomassetrocknung	laufend / geplant
Optimierung der Regelung von Biomassefeuerungen (CO-λ-Regelung, NO <sub>x</sub> -Reduktion)	läuft
Qualitätsverbesserungsmaßnahmen für Stroh und Ganzpflanzen durch landwirtschaftliche Primärmaßnahmen	laufend / geplant
Neue wirtschaftliche und effiziente Gasreinigungstechnologien	laufend / geplant

Pellets und Briketts werden als Biomassebrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen in Zukunft stark an Bedeutung gewinnen, da sie einfach transportier- und lagerbar sind, eine relativ hohe Energiedichte besitzen und die Feuerungsanlagen aufgrund der gleichmäßigen und definierten Brennstoffqualität weitgehend automatisch betrieben werden können. In diesem Zusammenhang stehen weniger Forschungs- als vielmehr Entwicklungsaktivitäten im Vordergrund, da Technologien zur Pelletierung und Pelletverbren-

nung bereits am Markt verfügbar sind, technologisch und logistisch ausgereifte Gesamtkonzepte vom Rohstoff Biomasse bis zum Kunden aber noch fehlen [1]. Die Vorreiterrolle auf diesem Gebiet haben Schweden und Finnland übernommen, in Österreich sind ebenfalls bereits Aktivitäten angelaufen.

Weiters werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hinsichtlich einer Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen durch den Einsatz innovativer Anlagen- und Regelungstechnologien weitergeführt [12, 43].

Ein vierter Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt sind Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung auf Biomassebasis für Anlagen mit Kesselnennleistungen kleiner 10,0 MW<sub>th</sub>. Die Konzepte reichen dabei vom Sterling-Motor, über ORC-Prozesse bis hin zur Entwicklung eines neuen Dampfmotors, dem Schraubenmotor [1, 48].

## **Literatur**

1. OBERNBERGER Ingwald, 1997: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente, Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung", Band 1, ISBN 3-7041-0241-5, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich
2. OBERNBERGER Ingwald, 1996: Erforderliche Brennstoffeigenschaften holz- und halmgutartiger Biomasse für den Einsatz in Großanlagen (1-20 MW<sub>th</sub>). In: Tagungsband zur internationalen Tagung "Eigenschaften fester Bioenergieträger - Beeinflussungsmöglichkeiten, Anforderungen, Normung", Mai 1996, Stuttgart, Deutschland, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 6, Landwirtschaftsverlag Münster, Deutschland
3. EUROPEAN COMMISSION, 1996: The European Renewable Energy Study, main report, ISBN 92-826-6450-3, DG XVII (ed.), Brussels, Belgium
4. ALAKANGAS E., 1996: European network to co-ordinate information exchange between national biomass energy programmes on agricultural and forestry biomass, final report-phase I, national report of Finland (ed.), Jyväskylä, 1995
5. ELSAM/ELKRAFT, 1996: Action plan for Bioenergy, information letter No.7 (1996), ELSAM/ELKRAFT (ed.), Copenhagen, Denmark
6. VATTENFALL, SÖDRA, 1993: Skogsbränsle, Slutrapport för Projekt Skogskraft, Vattenfall (ed.), Vällingby, Sweden
7. NUTEK, 1994: Energiläget 1994, ISSN 0282-2539, Alfa-Print AB (ed.), Sundbyberg, Sweden
8. ZAE BAYERN, 1996: Biomasse-Heizwerke - Gegenwärtiger Stand und Entwicklungstendenzen, Studie, Bayernwerk AG (Hrsg.), München, Deutschland
9. SCHMID AG, 1996: Firmenschrift, Schmid AG (Hrsg.), Eschlikon, Switzerland
10. KOHLBACH Ges.m.b.H&CoKG, 1996: Firmenschrift, Kohlbach Ges.m.b.H&CoKG (Hrsg.), Wolfsberg, Austria
11. MAWERA G.m.b.H, 1996: Firmenschrift, Mawera Ges.m.b.H. (Hrsg.), Hard, Österreich
12. BRUNNER Thomas, OBERNBERGER Ingwald, 1996: New Technologies for NO<sub>x</sub>-Reduction and Ash Utilization in Biomass Combustion Plants - JOULE THERMIE 95 Demonstration Project; to be published in: Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Bioenergy Conference, June 1996, Copenhagen, Denmark; Elsevier Science Ltd (ed.), Oxford, United Kingdom
13. NUSSBAUMER Thomas, HUSTAD J.E., 1996: Overview of Biomass Combustion; In: Proceedings of the International Conference "Developments in Thermochemical Biomass Conversion", May 1996, Banff, Canada; ISBN 0 7514 0350 4 (volume 2), Blackie Academic and Professional (ed.), London, United Kingdom

14. KELLER Roland, 1994: Primärmaßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung, Forschungsbericht Nr. 18 (1994), Laboratorium für Energiesysteme (Hrsg.), ETH Zürich, Schweiz
15. BIEDERMANN Friedrich, OBERNBERGER Ingwald, 1997: Aschen aus Biomassefeuerungen - Charakteristik und Behandlung. In: Tagungsband zur Europäischen Fachtagung "Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung", April 1997, Salzburg, Österreich, VDI-Bildungswerk (Hrsg.), Düsseldorf, Deutschland
16. OBERNBERGER Ingwald, 1996: Anlagenkonzept zur fraktionierten Ascheabscheidung bei Holzfeuerungen. In: Tagungsband zum 4. Holzenergie-Symposium, Okt. 1996, Zürich, Schweiz, Bundesamt für Energiewirtschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
17. OBERNBERGER Ingwald, BIEDERMANN Friedrich, KOHLBACH Walter, 1997: FRACTIO - Fraktionierte Schwermetallabscheidung in Biomasseheizwerken, Endbericht zum gleichnamigen ITF-Projekt mit Unterstützung der Bund-Bundesländerkooperation; Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
18. National Renewable Energy Laboratory, Sandia National Laboratory, University of California, Foster Wheeler Dev. Corp., U.S. Bureau of Mines, T.R.MILES, 1996: Alkali Deposits found in Biomass Power Plants, research report NREL/TP-433-8142 SAND96-8225 Vol I and II; National Renewable Energy Laboratory (ed.), Oakridge, USA
19. NIKOLAISEN L., 1994: Danish experience with straw combustion in district heating plants; In: Proceedings of the COMETT Expert Workshop "Biomass Combustion", May 1994, Graz, Joanneum Research (ed.), Graz, Austria
20. HEIN D., SCHMITZ W., 1995: Innovationen in der Feuerungstechnik für nachwachsende Rohstoffe; In: Tagungsband zum internat. Symposium "Biobrennstoffe und umweltfreundliche Heizanlagen", Sept. 1995, Regensburg; OTTI-Technologie Kolleg (Hrsg.), Regensburg, Deutschland
21. HOFBAUER H., 1993: Fluidized Bed Combustion; In: Minutes of Meeting of the IEA Bioenergy Agreement, Task X, Activity 1, May 1993, Vienna, Sintef, Division of Thermal Energy (ed.), Trondheim, Norway
22. LECKNER Bo, KARLSSON M., 1993: Gaseous emissions from circulating fluidized bed combustion of wood; In: Biomass and Bioenergy Vol.4, No. 5, pp. 379-389 (1993)
23. GADERER Mathias, 1996: Ash behaviour in Biomass Combustion Plants, MS-thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden and Institute of Chemical Engineering, University of Technology Graz, Austria
24. BAXTER L., BLANDER M., DAYTON D., MILNE T., 1996: Thermochemical Equilibrium as an indicator of ash deposition problems; In: Proceedings of the International Conference "Developments in Thermochemical Biomass Conversion", May 1996, Banff, Canada; ISBN 0 7514 0350 4 (volume 2), Blackie Academic and Professional (ed.), London, United Kingdom
25. WESTERMARK Mats, 1994: Termisk kadmiumrening av träbränsleaskor, preliminär version, report, Vattenfall Utveckling AB(ed.), Vällingby, Sweden
26. RUCKENBAUER Peter, OBERNBERGER Ingwald, HOLZNER Heinrich, 1996: Erforschung der Verwendungsmöglichkeiten von Aschen aus Hackgut- und Rindenfeuerungen, Endbericht der Projektphase II, Forschungsprojekt StU48 der Bund-Bundesländerkooperation; Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (Hrsg.), Universität für Bodenkultur Wien, Österreich
27. OBERNBERGER Ingwald, 1996: Decentralized Biomass Combustion - State-of-the-Art and Future Development; to be published in: Biomass and Bioenergy (accepted)
28. BIEDERMANN Friedrich, 1994: EDV-gestützte Bilanzierung und Bewertung von Biomasseheizwerken, Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, Österreich
29. JIRJIS Raida, LEHTIKANGAS Päivi, 1992: Long term storage of mixed bark-shavings fuel, report No. 230, ISSN 0348-4599, Swedish University of Agricultural Sciences(ed.), Uppsala, Sweden
30. WEINGARTMANN H., 1991: Hackgut-Trocknung, Landtechnische Schriftenreihe Nr. 178 (1991); Österreichisches Kuratorium für Landtechnik (Hrsg.), Wien, Österreich
31. GOOD Jürgen, 1992: Verbrennungsregelung bei automatischen Holzschnitzelfeuerungen, Forschungsbericht Nr. 11, Laboratorium für Energiesysteme (Hrsg.), ETH Zürich, Schweiz

32. LAUCHER Andreas, 1995: Biomasse-Ortszentralheizungen - Technische und betriebswirtschaftliche Überlegungen; In: Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 5, Landwirtschaftsverlag Münster, Deutschland
33. OBERNBERGER Ingwald, MOSER Franz, 1996: Luft- und Rauchgasführung in Biomasseheizwerken - Vermessung und Optimierung; Forschungsbericht I-B1-1996; Ingenieurbüro BIOS OEG (Hrsg.), Graz, Österreich
34. STOCKINGER Hermann, OBERNBERGER Ingwald, 1996: Life Cycle Analysis of District Heating with Biomass; In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Bioenergy Conference, June 1996, Copenhagen, Denmark; Elsevier Science Ltd (ed.), Oxford, United Kingdom
35. NUSSBAUMER Thomas, 1989: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Forschungsbericht Nr. 6, Laboratorium für Energiesysteme (Hrsg.), ETH Zürich, Schweiz
36. MARUTZKY Rainer, 1991: Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten, WKI-Bericht Nr. 26, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung (Hrsg.), Braunschweig, Deutschland
37. SPITZER Josef, 1988: Emissionsbezogene Bewertung von Energieplanungsmaßnahmen, Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, Forschungsgesellschaft Joanneum Ges.m.b.H. (Hrsg.), Graz
38. BRAUN H., ANGÜNER B., ECKER P., GSCHAIDER R., SORGER A., 1991: Emissionen bei der Verbrennung, Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung (Hrsg.), Wien
39. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ANGELEGENHEITEN, 1993: Energiebericht 1993 der Österreichischen Bundesregierung, Wien
40. STANZEL W., JUNGMEIER G., SPITZER J., 1995: Emissionsfaktoren und energietechnische Parameter für die Erstellung von Energie- und Emissionsbilanzen im Bereich Raumwärmeversorgung, Endbericht, Bericht Nr. IEF-B-02/95, Forschungsgesellschaft Joanneum, Institut für Energieforschung (Hrsg.), Graz, Österreich
41. JUNGMEIER G., GOLJA F., 1995: Emissionsfaktoren und energietechnische Parameter für die Erstellung von Energie- und Emissionsbilanzen im Bereich Raumwärmeversorgung, Datenband, Bericht Nr. IEF-B-02/95, Forschungsgesellschaft Joanneum, Institut für Energieforschung (Hrsg.), Graz, Österreich
42. OBERNBERGER Ingwald, WIDMANN Walter, WURST Friedrich, WÖRGETTER Manfred, 1995: Beurteilung der Umweltverträglichkeit des Einsatzes von Einjahresanzpflanzungen und Stroh zur Fernwärmeerzeugung, Jahresbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt; Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
43. NUSSBAUMER Thomas, HUSTAD J.E., 1996: Overview of Biomass Combustion; In: Proceedings of the International Conference "Developments in Thermochemical Biomass Conversion", May 1996, Banff, Canada; ISBN 0 7514 0350 4 (volume 2), Blackie Academic and Professional (ed.), London, United Kingdom
44. BROUWERS Bert, Rotational Particle Separator: A New Method for Separating Fine Particles and Mists from Gases; In: Chem.Eng.Technol. 19, pp. 1-10 (1996)
45. RIEDL Rudolf, OBERNBERGER INGWALD, 1996: Corrosion and Fouling in Boilers of Biomass Combustion / Gasification Plants; to be published in: Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Bioenergy Conference, 24-27 June 1996, Copenhagen, Denmark; Elsevier Science Ltd (ed.), Oxford, United Kingdom
46. OBERNBERGER Ingwald, DAHL Jonas, 1996: Fractionated heavy metal separation in biomass combustion and gasification plants, six monthly progress report, JOULE III project No. JOR3-CT950001; European Commission DG XII (ed.), Brussels, Belgium
47. J. DAHL, 1995: Thermodynamic Investigation of the Fate of the Heavy Metals Cd, Pb and Zn in Biomass Combustion, MS thesis, Department of Chemical Engineering Design (ed.), Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden and Institute of Chemical Engineering, University of Technology Graz, Austria
48. KAUDER Knut, 1996: Schraubenmaschinen, Forschungsbericht Nr. 4 des FG Fluidenergiemaschinen, Universität Dortmund (Hrsg.), Dortmund, Deutschland
49. LEWANDOWSKY Iris, 1996: Grundlagen der Biomassebildung, Manuskript zum Lehrgang "Thermische Nutzung von Biomasse", Technische Akademie Esslingen (Hrsg.), Deutschland