

Sabrina Metz

# **Evaluierung von Biomassefeuerungskonzepten**

Bewertung von Biomassefeuerungskonzepten im Leistungsbereich von  
15- 50 MW Brennstoffwärmeleistung

**Masterarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades einer  
Magistra  
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Karl- Franzens- Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Karl Jürgen  
Institut für Wärmetechnik, TU Graz

Graz, am 14.07. 2009

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen und die wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

(Unterschrift)

# KURZFASSUNG

Titel: Evaluierung von Biomassefeuerungskonzepten

Autor: Sabrina Metz

1. Stichwort: Biomasse
2. Stichwort: Feuerungstechnologien
3. Stichwort: Nutzwertanalyse

Die Masterarbeit mit dem Titel „Evaluierung von Biomassefeuerungskonzepten“ befasst sich mit dem Vergleich verschiedener Biomassefeuerungstechnologien für den Brennstoffwärmeleistungsbereich zwischen 15 und 50 MW.

Ziel der Arbeit ist es, aufbauend auf einem theoretischen Vergleich von Feuerungstechnologien, aus Herstellerangaben und dem Einholen von Betriebserfahrungen von Biomassefeuerungsanlagenbetreibern, ein Hilfsmittel zur Feuerungstechnologiebewertung zu erstellen. Hierfür wurde mittels einer Nutzwertanalyse ein Evaluierungstool erstellt, in das sowohl wirtschaftliche als auch technische Parameter einfließen. Mit diesem Evaluierungstool wurden sowohl Angebote von Biomassefeuerungssystemen, für einen konkreten Standort, bewertet als auch die Feuerungstechnologien selbst.

Der theoretische Vergleich zeigte, dass die optimale Biomassefeuerungstechnologie hauptsächlich von den Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs und der Größe der Anlage abhängt. Die Nutzwertanalyse der Biomassefeuerungstechnologien liefert, unter den zugrunde gelegten Daten, für die Wanderrostfeuerung den größten Nutzwert.

## ABSTRACT

Title: Evaluation of Concepts for Biomass Combustion

Author: Sabrina Metz

1<sup>st</sup> keyword: biomass

2<sup>nd</sup> keyword: combustion technologies

3<sup>rd</sup> keyword: value benefit analysis

In the master thesis “Evaluation of Concepts for Biomass Combustion” biomass combustion technologies in the range of input fuel capacity between 15 and 50 MW are compared.

A tool for evaluating offers of different biomass combustion systems is obtained using value benefit analysis. This tool is used to evaluate offers for a specific site but also biomass combustion technologies in general. Furthermore, biomass combustion technologies are theoretically compared with each other and the know-how of biomass plant operators is collected.

The theoretical comparison shows, that the choice of an optimal biomass combustion technology is dependent on the properties of the fuel and the magnitude of the plant. The travelling grate technology shows the highest benefit value according to the value benefit analysis of the biomass combustion technologies.

# VORWORT

Danke an alle!

Graz, am 14.07.2009

Sabrina Metz

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Vorstellung des Projekts „Hocheffizientes Biomasseheizkraftwerk“.....	1
1.2	Zielsetzung der Masterarbeit.....	2
1.3	Abgrenzung .....	2
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>3</b>
2.1	<b>Brennstoff Biomasse .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Zusammensetzung der Biomasse.....	3
2.1.2	Begriffsdefinitionen.....	3
a)	Oberer und unterer Heizwert [1].....	3
b)	Wassergehalt und Feuchte .....	4
2.2	<b>Verbrennung .....</b>	<b>4</b>
2.2.1	Begriffsdefinitionen.....	4
a)	Luftzahl $\lambda$ [4].....	4
b)	Adiabate Verbrennungstemperatur [9] .....	5
2.2.2	Phasen der Verbrennung.....	6
2.3	<b>Dampferzeugung.....</b>	<b>7</b>
2.3.1	Prozessablauf.....	7
2.3.2	Kesselwirkungsgrad.....	8
a)	Direkte Methode.....	8
b)	Indirekte Methode .....	9
<b>3</b>	<b>ÜBERSICHT ÜBER DIE BIOMASSEFEUERUNGSTECHNOLOGIEN.....</b>	<b>10</b>
3.1	<b>Rostfeuerung .....</b>	<b>11</b>
3.1.1	Wanderrost .....	11
3.1.2	Schürrost.....	12
a)	Vorschubrost [8].....	13
b)	Rückschubrost .....	14
3.1.3	Unterschubfeuerung mit rotierendem Rost.....	15
3.1.4	Vibrationsrost .....	17
3.1.5	Schoppe-Brennkammer .....	17
3.1.6	Rostkühlung.....	19

a)	Luftkühlung .....	19
b)	Wasserkühlung .....	19
3.1.7	Brennstoffaufgabe .....	19
<b>3.2</b>	<b>Wirbelschichtfeuerung .....</b>	<b>21</b>
3.2.1	Stationäre Wirbelschichtfeuerung .....	21
3.2.2	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung .....	23
a)	Zirkulierende Wirbelschicht mit Fließbettkühler.....	24
3.2.3	Düsenboden [23] .....	25
3.2.4	Bettmaterial .....	25
a)	Bettmaterialaufbereitung [23].....	25
<b>3.3</b>	<b>Einblasfeuerung .....</b>	<b>26</b>
<b>3.4</b>	<b>Asche .....</b>	<b>28</b>
3.4.1	Ascheabzug [23] .....	28
a)	Nassentaschung .....	28
b)	Trockenentaschung.....	29
3.4.2	Aschenausbringung .....	29
<b>3.5</b>	<b>Spezielle Herausforderungen der Biomassefeuerung .....</b>	<b>30</b>
3.5.1	Hochtemperaturchlorkorrosion.....	30
a)	Maßnahmen gegen die Hochtemperaturchlorkorrosion.....	32
3.5.2	Ascheschmelzverhalten .....	33
3.5.3	Agglomeration in Wirbelschichten.....	33
3.5.4	Primärmaßnahmen zur Schadstoffreduktion.....	34
a)	Gestufte Verbrennung.....	34
b)	Rauchgasrezirkulation .....	35
<b>3.6</b>	<b>Herstellerbefragung.....</b>	<b>36</b>
<b>3.7</b>	<b>Gegenüberstellung der Feuerungstechnologien .....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>NUTZWERTANALYSE.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Theorie der Nutzwertanalyse.....</b>	<b>39</b>
4.1.1	Module der Nutzwertanalyse [22] .....	39
4.1.2	Vorgehensweise bei der Nutzwertanalyse [22].....	39
<b>4.2</b>	<b>Nutzwertanalyse der Angebote .....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Systemgrenzen.....	41
4.2.2	Zugriffskriterien und Zielsystem .....	41
a)	Teilziel der Wirtschaftlichkeit .....	43

b) Teilziel der Technik.....	44
4.2.3 Ermittlung des Zielertrags .....	46
4.2.4 Gewichtung.....	47
4.2.5 Rahmenbedingungen .....	48
<b>4.3 Nutzwertanalyse der Biomassefeuerungstechnologien .....</b>	<b>49</b>
<b>4.4 Betreibernutzwertanalyse und Betreiberfragebogen.....</b>	<b>50</b>
4.4.1 Fragebogen über die Betriebserfahrungen .....	50
4.4.2 Erstellung der Betreibernutzwertanalyse .....	50
<b>5 ERGEBNISSE .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 Ergebnisse der Nutzwertanalyse der Angebote.....</b>	<b>52</b>
5.1.1 Darstellung der Nutzwerte der Teilziele .....	53
5.1.2 Gegenüberstellung der Angebote mit dem höchsten Nutzwert.....	57
5.1.3 Variation der Zielwerte.....	59
<b>5.2 Ergebnisse der Nutzwertanalyse der Biomassefeuerungstechnologien.....</b>	<b>61</b>
<b>5.3 Ergebnisse aus der Betreibernutzwertanalyse und des Betreiberfragebogens.....</b>	<b>63</b>
5.3.1 Auswertung des Betreiberfragebogens .....	63
5.3.2 Ergebnisse der Betreibernutzwertanalyse.....	69
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>70</b>
6.1 Schlussfolgerungen .....	71
<b>7 LITERATUR UND QUELLVERZEICHNIS.....</b>	<b>72</b>
<b>8 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>75</b>
<b>9 ANHANG .....</b>	<b>76</b>
9.1 Fragebogen über die Betriebserfahrungen mit Biomassefeuerungsanlagen .....	76
9.2 Herstellerfragebogen .....	80



## **1 EINLEITUNG**

Hintergrund und Zielsetzung der Masterarbeit werden nun erläutert.

### **1.1 Vorstellung des Projekts „Hocheffizientes Biomasseheizkraftwerk“**

Ziel des übergeordneten Forschungs- und Entwicklungsprojektes der Energie Steiermark AG ist die Konzeptentwicklung von Biomasse KWK- Anlagen aufbauend auf einer nachhaltigen Rohstoffversorgung und eines hocheffizienten Konversionsprozesses.

Die Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsprojektes sollen die Grundlagen liefern um eine rasche Bewertung von potentiellen Standorten zu ermöglichen und die Umsetzung von hocheffizienten Biomasse KWK- Anlagen forcieren.

Die Gesamtstrategie des Projektes umfasst somit folgende 2 Schwerpunkte:

#### **1. Erhöhung der Effizienz des Umwandlungsprozesses**

In diesem Zusammenhang werden innovative Prozesse wie Biomassevortrocknung, Rauchgaskondensation oder solare Speisewasservorwärmung untersucht, technisch sowie wirtschaftlich bewertet und gegebenenfalls in das Gesamtanlagenkonzept integriert.

Es erfolgt dabei eine enge Zusammenarbeit mit der TU Graz sowie mit führenden Technologieanbietern.

#### **2. Generierung zusätzlicher Primärenergieträger und Erhöhung der Flächeneffizienz**

Dabei steht die langfristige Sicherstellung der Versorgung mit Biomasse im Vordergrund. Unter anderem erfolgt dies durch Weiterentwicklung der Biomasseproduktion aus Kurzumtrieb, Steigerung der Flächeneffizienz, Nutzung von bisher nicht genutzten Flächen sowie Optimierung der Biomasse-Logistik.

Auch hier erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit der TU Graz, aber auch der Landwirtschaftskammer Steiermark, sowie mit führenden Kurzumtriebs-Saatgutproduzenten und Biomasselogistikern.

## **1.2 Zielsetzung der Masterarbeit**

Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts „Hocheffizientes Biomasseheizkraftwerk“ plant die Energie Steiermark AG die Errichtung eines hocheffizienten Biomasseheizkraftwerks mit einem elektrischen Wirkungsgrad, der über 40% liegt.

Ziel der Masterarbeit ist es, verschiedene Biomassefeuerungstechnologien nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu untersuchen und belastbare Ergebnisse mit Hilfe einer Nutzwertanalyse zu ermitteln.

Die Nutzwertanalyse soll auch für spätere Projekte verwendet werden, um aus alternativen Angeboten von Kesselherstellern, das nach den projektspezifischen Rahmenbedingungen beste Angebot zu ermitteln.

## **1.3 Abgrenzung**

Neben der theoretischen Betrachtung, die sich hauptsächlich auf die Feuerungstechnologie beschränkt, wird im praktischen Teil, der Durchführung der Nutzwertanalyse, die Systemgrenze so gewählt, wie sie im Lieferumfang der Angebote vorliegt.

Somit werden bei der Nutzwertanalyse auch die Eckdaten des Kessels betrachtet.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Bei der Energiegewinnung aus Biomasse wird die in der Biomasse gebundene chemische Energie in Enthalpie eines Dampfes umgewandelt. Die Grundlagen hierzu liegen in der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs Biomasse, der Verbrennung und der Dampferzeugung.

### 2.1 Brennstoff Biomasse

Der Begriff Biomasse umfasst sämtliche Stoffe organischer Herkunft, also kohlenstoffhaltige Materie. Somit ist der Begriff sehr weit gefasst und umfasst sowohl Pflanzen als auch Tiere und tierische Produkte. Die Abgrenzung zu fossilen Brennstoffen bildet in meisten Ländern der Torf, der bereits als fossiler Energieträger angesehen wird.

In folgender Arbeit wird auf Feuerungstechnologien für holzartige Biomasse eingegangen.

Holzartige Biomasse, die als Brennstoff genutzt wird, hat ihren Ursprung meist in Restholz, wie Waldrestholz, Industrierestholz und Altholz, oder in Holz aus Kurzumtriebskulturen.

Halmgutartige Biomasse hingegen fällt hauptsächlich bei der Landschaftspflege und in der Landwirtschaft an. Zu ihr zählen z.B. Stroh und Grasschnitt. [9]

#### 2.1.1 Zusammensetzung der Biomasse

Die chemische Zusammensetzung der Biomasse variiert stark. Biogene Festbrennstoffe bestehen hauptsächlich aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Lignin weist durch seinen höheren Kohlenstoffgehalt einen höheren Heizwert als Cellulose auf. Holzartige Biomasse weist im Allgemeinen einen höheren Anteil an Lignin auf als halmgutartige Biomasse, aber auch für Holz aus dem Kurzumtrieb ist der Ligninanteil geringer. [9]

#### 2.1.2 Begriffsdefinitionen

Es folgen die wichtigsten Definitionen im Bereich des Brennstoffs.

##### a) Oberer und unterer Heizwert [1]

Der obere Heizwert, auch Brennwert genannt, und der untere Heizwert sind Angaben für die Wärmemenge die bei der Verbrennung einer Masseneinheit eines Stoffes frei wird.

Im Falle des oberen Heizwertes liegt das Wasser nach der Verbrennung in flüssiger Form vor, die Kondensationswärme ist also Teil des Heizwertes.

Im Falle des unteren Heizwerts liegt das Wasser noch im dampfförmigen Zustand vor. Er ist somit um die Verdampfungsenthalpie kleiner als der obere Heizwert. Der Heizwert lässt sich aus der Elementaranalyse eines Stoffes bestimmen.

### b) Wassergehalt und Feuchte

Für den Anteil an Wasser gibt es zwei geläufige Bezeichnungen

Der Wassergehalt( $w$ ) ist dabei als Quotient der Masse des Wassers zur Gesamtmasse eines Brennstoffs definiert.

$$w = \frac{M_W}{M_{TS} + M_W} \quad (1)$$

$M_W$ .....Masse des Wassers

$M_{TS}$ .....Masse der Trockensubstanz

Die Feuchte( $u$ ) hingegen ist der Quotient der Masse des Wassers zur Trockenmasse des Brennstoffs.

$$u = \frac{M_W}{M_{TS}} \quad (2)$$

Wassergehalt und Feuchte haben somit die folgende Beziehung zueinander:

$$u = \frac{w}{1-w} \quad (3)$$

## 2.2 Verbrennung

Verbrennung bezeichnet die Oxidation, also die Reaktion eines Stoffes mit Sauerstoff, bei hohen Temperaturen. Dabei wird vor allem Wasserstoff und Kohlenstoff, die in verschiedenen Mengen im Brennstoff enthalten sind, exotherm, also unter frei werden von Energie, oxidiert.

### 2.2.1 Begriffsdefinitionen

Es folgen einige Begriffsdefinitionen zur Verbrennung.

#### a) Luftzahl $\lambda$ [4]

Die Luftzahl  $\lambda$ , oder Luftüberschusszahl, siehe Formel (4), gibt den Quotienten zwischen der der Verbrennung tatsächlich zugeführten,  $m_{Luft,ges}$ , also der in der Praxis benötigten Luftmenge zu der für die Verbrennung theoretisch notwendigen Luftmenge,  $m_{Luft,min}$ , an.

$$\lambda = \frac{m_{Luft,ges}}{m_{Luft,min}} \quad (4)$$

Als unterstöchiometrisch wird eine Reaktion bezeichnet, bei der die Luftzahl kleiner 1 ist, während die Luftzahl bei einer überstöchiometrischen Reaktion einen Wert größer 1 annimmt.

**b) Adiabate Verbrennungstemperatur [9]**

Die adiabate Verbrennungstemperatur entspricht der mittleren Gastemperatur ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung. Sie wird durch den Luftüberschuss und den Heizwert des Brennstoffs, der im Fall von Biomasse hauptsächlich von der Feuchte abhängt, bestimmt, siehe Abbildung 1.

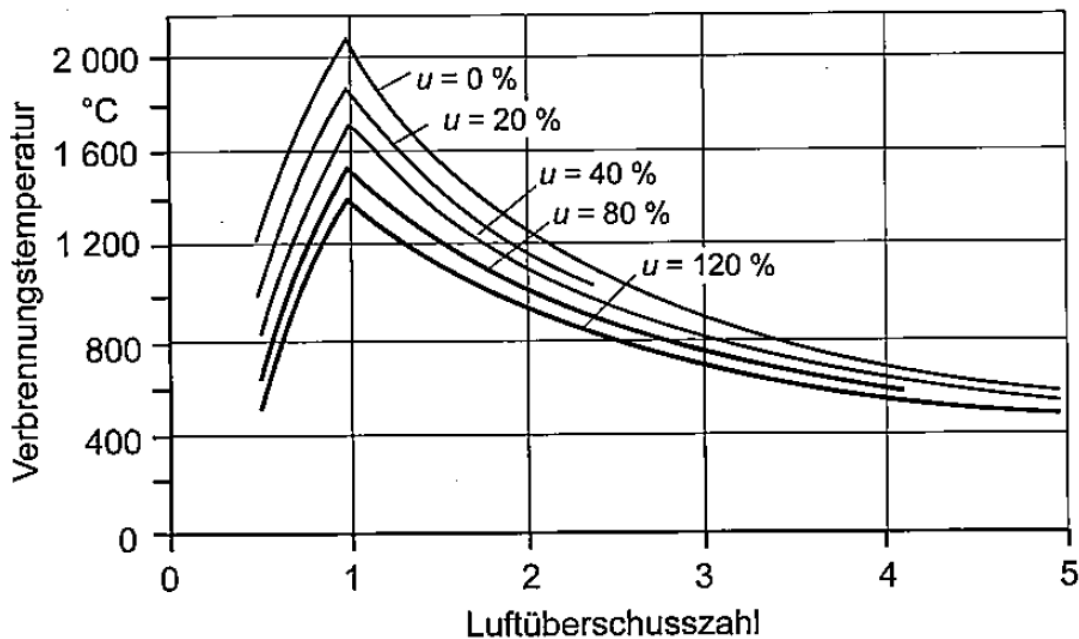


Abbildung 1: Abhängigkeit der adiabaten Verbrennungstemperatur von der Feuchte und der Luftüberschusszahl [9]

Wie in der Abbildung erkenntlich erreicht die adiabate Verbrennungstemperatur bei einer Luftüberschusszahl, die knapp unter 1 liegt ihr Maximum und fällt danach im unterstöchiometrischen Bereich stark und im überstöchiometrischen Bereich etwas langsamer ab. Höhere Feuchte des Brennstoffs führt auch zu einem Absinken der adiabaten Verbrennungstemperatur.

## 2.2.2 Phasen der Verbrennung

Die Verbrennung kann für Festbrennstoffe in mehrere Phasen, siehe Abbildung 2, eingeteilt werden, [9]. Die Verbrennung wird mit der Zündung eingeleitet, wobei die Zündtemperatur die Temperatur ist ab der sich die Verbrennung selbstständig abläuft, da mehr Wärme durch die Reaktion freigesetzt wird als an die Umgebung abgegeben wird, [4]. Danach erfolgt die Aufheizung des Brennstoffs durch Rückstrahlung von der Flamme, dem Glutbett und den Feuerraumwänden. Ab 100°C startet die Trocknung des Brennstoffs, bei der das im Brennstoff enthaltene Wasser verdampft. Die Dauer dieser Phase ist stark vom Wassergehalt des Brennstoffs abhängig. Daraufhin setzt die Pyrolyse ein. Die Pyrolyse, die thermische Spaltung organischer Verbindungen und die Austreibung der flüchtigen Bestandteile, findet ohne zusätzliche Sauerstoffzufuhr, also bei einer Luftzahl von 0 statt. Als nächster Schritt im noch unterstöchiometrischen Bereich findet die Biomassevergasung statt, bei der beispielsweise Kohlenstoff zu CO oxidiert.

Im überstöchiometrischen Bereich, bei Temperaturen zwischen 700 und 1500°C findet dann die Oxidation der brennbaren Gase zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O statt. [9]

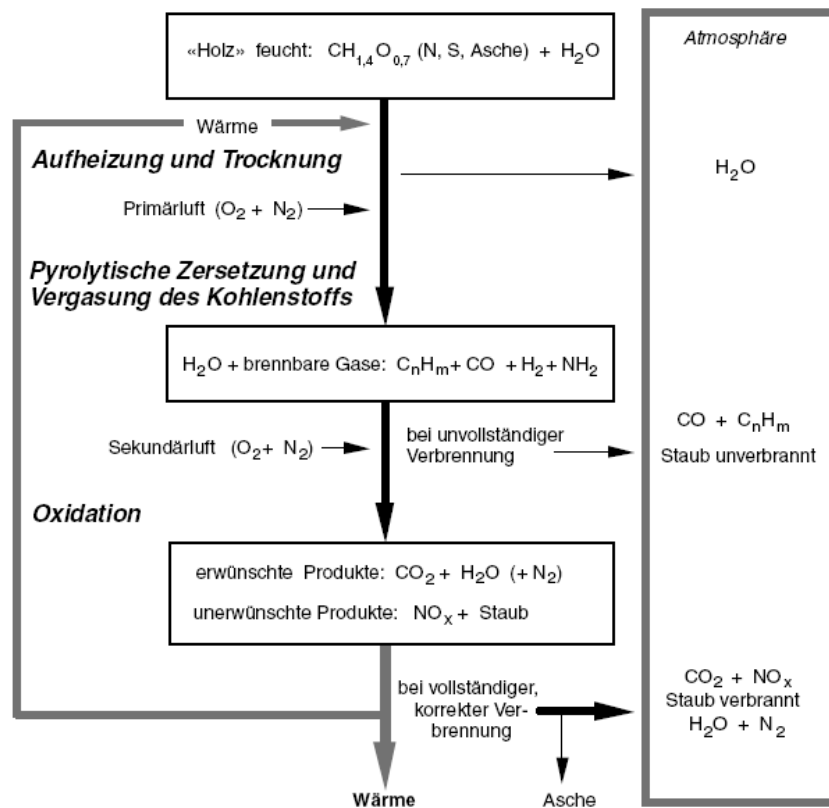


Abbildung 2: Abbrandverhalten von Holz [9]

### 2.3 Dampferzeugung

Bei der Dampferzeugung wird aus der bei der Verbrennung gewonnenen thermischen Energie aus Wasser Dampf mit vorgegebenen Parametern erzeugt. Dampferzeuger bestehen aus der Feuerung und dem Wärmeübertragungssystem, [1], das im Kraftwerksbereich in der Regel aus Economizer, Verdampfer, Überhitzer und Luftvorwärmer besteht, [4].

Die Größe des Dampferzeugers wird vom benötigten Dampfmassenstrom festgelegt, [1].

#### 2.3.1 Prozessablauf

Um überkritischen Dampf zu erzeugen wird dem Speisewasser Wärme zugeführt um es zunächst auf Siedetemperatur zu bringen, dann zu verdampfen und schließlich zu überhitzen, wobei die erforderliche Wärmemenge vom Druck abhängig ist. Die erforderliche Wärme wird über Heizflächen durch Konvektion und Strahlung übertragen. [4]

Der Prozessablauf wird in Folge nur für den Naturumlauf erklärt, der bei Biomassekraftwerken üblich ist. Der Naturumlauf, siehe Abbildung 3, nutzt den Dichteunterschied zwischen dem Wasser/Dampfgemisch in den Steigrohren und dem Wasser in den Fallrohren um eine Umlaufströmung auszubilden.

Das Speisewasser wird zunächst im ECO vorgewärmt, wodurch die Rauchgastemperatur abgekühlt wird, und dann in den Verdampfern, die in der Regel in den Brennkammerwänden angeordnet sind, verdampft. Das Wasser/Dampfgemisch gelangt nun über die Steigrohre in die Kesseltrommel, in der Dampf von Wasser getrennt wird und der erzeugte Dampf zu den Überhitzern geleitet wird während das abgeschiedene Wasser über die Fallrohre wieder zum Verdampfer geleitet wird, [1]. Im Überhitzer wird der Dampf schließlich auf die geforderte Frischdampf Temperatur gebracht.

Der Zwischenüberhitzer hat die Aufgabe den Dampf, der vom Hochdruckteil der Turbine entspannt wurde, wiederum zu erwärmen und auf eine bestimmte Temperatur zu bringen. [4]

Der Naturumlauf kann bis zu Drücken von 175 bar nach Austritt des Verdampfers eingesetzt werden, [1].

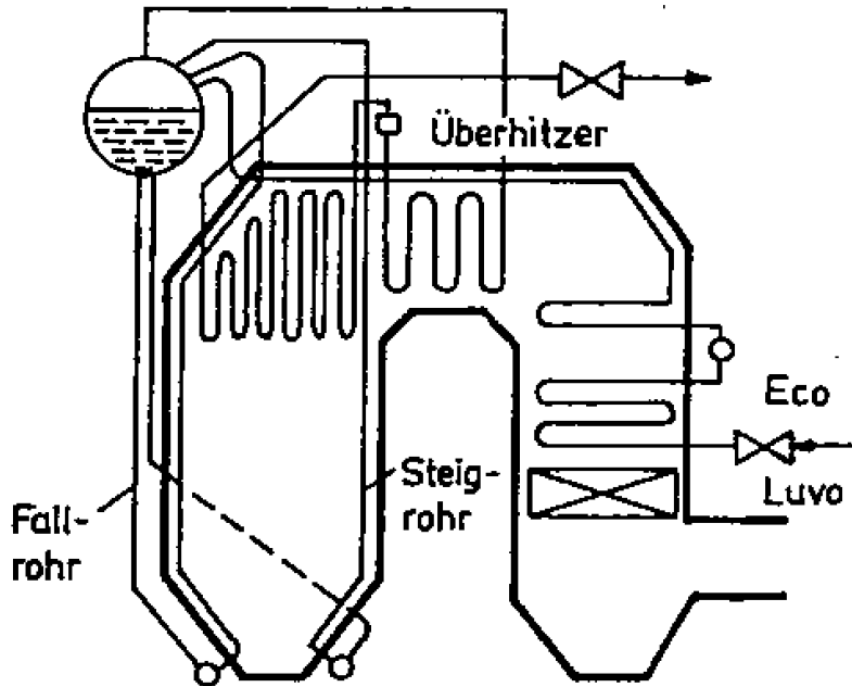


Abbildung 3: Schema des Naturumlaufdampferzeugers [1]

### 2.3.2 Kesselwirkungsgrad

Beim Kesselwirkungsgrad, oder Brennstoffausnutzungswirkungsgrad, wird die abgeführte Nutzwärmeleistung in Bezug zu der mit dem Brennstoff zugeführten Wärmeleistung gebracht.

Der Kesselwirkungsgrad ist das Produkt des Feuerungswirkungsgrads und des Heizflächenwirkungsgrads.

Der Feuerungswirkungsgrad,  $\eta_F$ , wird bestimmt aus dem Anteil des tatsächlichen verbrannten Brennstoffs zu der zugeführten Brennstoffmenge. [1]

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_B H_U}{\dot{m}_{B0} H_U} \quad (5)$$

$\dot{m}_B$  [kg/s]...tatsächlich verbrannte Brennstoffmenge

Der Kesselwirkungsgrad lässt sich laut DIN 1942 auf zwei verschiedene Arten berechnen.

#### a) Direkte Methode

Bei der direkten Methode wird der Quotient aus erzeugter Nutzwärmeleistung und mit dem Brennstoff zugeführten Feuerungswärmeleistung berechnet. [12]

$$\eta_B = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_{FWL}} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{m}_{B0} \cdot H_u} \quad (6)$$

$\dot{Q}_N$  [kW]...erzeugte Nutzwärmeleistung- Energiestrom, der im Dampferzeuger an Wasser bzw. Dampf übertragen wird



$\dot{Q}_{FWL}$  [kW]...mit Brennstoff zugeführte Feuerungswärmeleistung

$\dot{m}_{B0}$  [kg/s]...zugeführter Brennstoffmassenstrom

$H_u$  [kJ/kg]...unterer Heizwert des zugeführten Brennstoffes

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades werden die Dampfmassenströme mit ihren Enthalpien und die in der gleichen Zeit zugeführte Brennstoffmenge gemessen.[1]

### b) Indirekte Methode

Die Wärmeverlustmethode ist eine indirekte Methode, die vor allem für feste Brennstoffe hilfreich ist, für die der genaue Brennstoffmassenstrom schwierig zu bestimmen ist.

Gemessen werden hierbei der Abgasmassenstrom und die Ascherückstandsmengen.

Der Strahlungsverlust wird zur Vereinfachung nur angenommen. [1]

$$\eta_B = 1 - \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_N + \dot{Q}_V} \quad (7)$$

$\dot{Q}_N$  [kW]....erzeugte Nutzwärmeleistung

$\dot{Q}_V$  [kW]... Verlustleistung

Als Verluste treten hierbei Rauchgasverluste, Strahlungsverluste und Ascheverluste auf.

Die Rauchgasverluste, die den Kesselwirkungsgrad bestimmen, sind abhängig vom CO- Gehalt des Abgases, dem Abgasmassenstrom, der vom Luftüberschuss beeinflusst wird und der Abgastemperatur.

Die Ascheverluste werden bestimmt vom Restkohlenstoffgehalt in der Asche und der Temperatur der Asche.

Die Strahlungsverluste sind dabei abhängig von der Oberflächentemperatur des Kessels. [12]

### 3 ÜBERSICHT ÜBER DIE BIOMASSEFEUERUNGSTECHNOLOGIEN

Die Biomassefeuerungstechnologien werden nun mittels Informationen aus der Literatur beschrieben. Außerdem wird auf die Herausforderungen bei der Verbrennung von Biomasse eingegangen.

Obwohl sich Biomasse von fossilen Brennstoffen, vor allem durch ihre chemische Zusammensetzung, die stark variiert, unterscheidet, haben die Biomassefeuerungstechnologien ihren Ursprung in den für Kohlefeuerungen benutzten Technologien, [2].

Nun folgt eine Übersicht über Feuerungstechnologien, die für den Brennstoffwärmeleistungsbereich von 15-50 MW<sub>th</sub> geeignet sind.

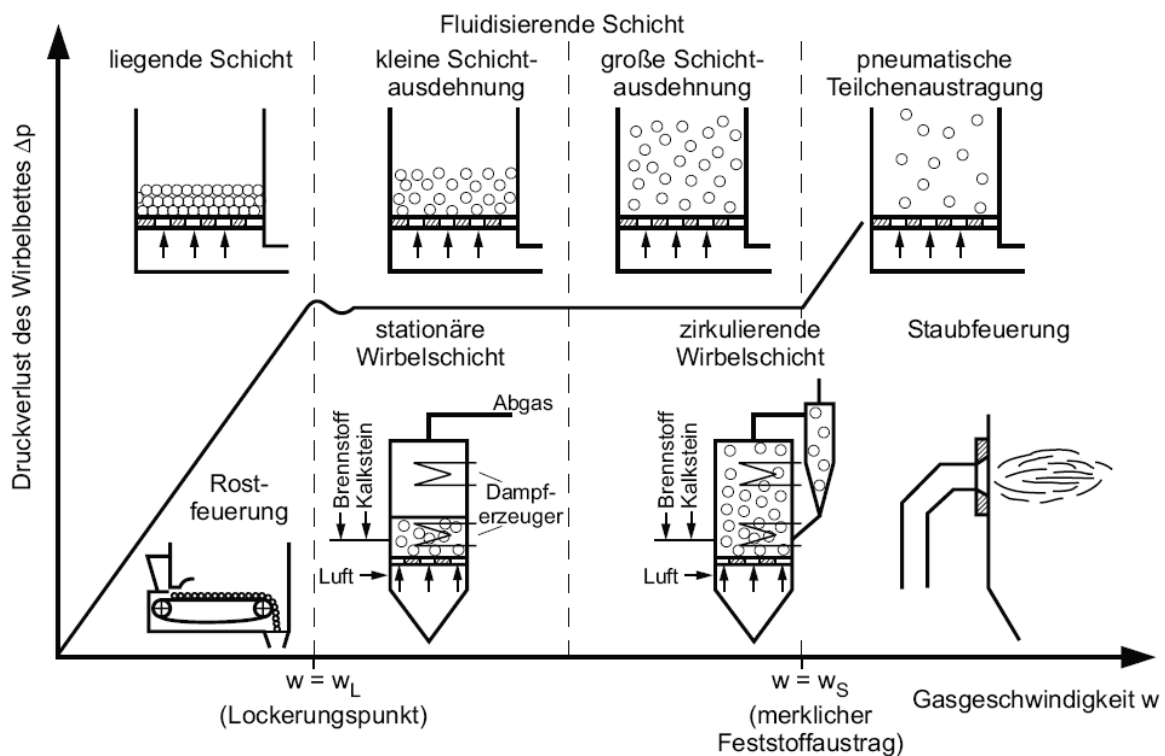


Abbildung 4: Vergleich verschiedener Verbrennungstechnologien [4]

### 3.1 Rostfeuerung

Bei der Rostfeuerung lagert eine Brennstoffschüttung auf einem langsam bewegten oder ruhenden Rost, die Schüttung wird von unten mit Luft durchströmt, wobei die Gasgeschwindigkeit unter der Lockerungsgeschwindigkeit der Schicht,  $w_L$ , liegt, siehe Abbildung 4.

Der Vorteil der Rostfeuerung liegt vor allem in den niedrigen Investitionskosten, im niedrigen Eigenbedarf, der einfachen Wartung und Bedienung, im guten Teillastverhalten und im breiten Brennstoffband, wobei meist keine Zerkleinerung des Brennstoffs nötig ist. [1]

Die Stückgröße ist bei Rostfeuerungen nur durch die Aufgabevorrichtung beschränkt. [4]

Die Verbrennungstemperaturen bei der Rostfeuerung liegen zwischen 1100 und 1300°C.

Durch den hohen Luftüberschuss, zwischen 1,2 und 2, und dem im Vergleich zur Wirbelschicht oder Staubfeuerung hohen Feuerungsverlust von 2- 4 %, ist der Wirkungsgrad begrenzt. [5]

Ein weiterer Nachteil der Rostfeuerung mit Ausnahme der Aldavia- Technologie, liegt in der schlechten Regelbarkeit, da sich relativ viel Brennstoff in der Brennkammer befindet. [17]

#### 3.1.1 Wanderrost

Der Wanderrost ist eine vollmechanische Feuerung, bei der das Brennmaterial wie auf einem Transportband befördert wird, siehe Abbildung 5. Er besteht aus auf Gelenkketten befestigten Roststäben, die ein Endlosband bilden, das horizontal durch den Feuerraum verläuft. [23]

Am Ende der Brennkammer fällt die Asche automatisch vom Rost, da sich die Roststäbe umdrehen.

Die Primärluft wird von unten durch den Rost eingeblasen. Der Abstand der Roststäbe sollte in einer Größenordnung sein, welche die für die Verbrennung notwendige Luftzuführung, mittels Primärluft, ermöglicht, ohne eine Luftgeschwindigkeit zu erreichen, die so groß ist, dass es zum Brennstoffaustrag kommt. Hierzu muss der Abstand aber klein genug sein, um das Durchfallen des Brennstoffes zu verhindern.

Da die Roststäbe mit hohen thermischen Beanspruchungen konfrontiert sind, müssen sie gekühlt werden. Dies erfolgt durch die an ihnen vorbeiströmende Primärluft, die konstruktionsbedingt, als einzige mögliche Kühlung dient. [1]

Die Sekundärluft, die den Turbulenzgrad in der Brennkammer erhöht und für den vollständigen Ausbrand notwendig ist, wird oberhalb des Rostes in die Brennkammer eingeblasen. [4]

Die Verweildauer des Brennstoffs am Rost kann durch die Fördergeschwindigkeit reguliert werden. Außerdem kann die Verbrennung durch die Schichthöhe und im Falle eines Zonenwanderrosts durch die Luftverteilung gesteuert werden. Im Zonenwanderrost wird die Rostbahn in verschiedene Zonen eingeteilt, in denen die Verbrennungsluft gesteuert zugegeben wird. [1]

Da das Brennstoffbett nicht durchmischt wird, kommt es zu besonders geringem Flugaschenanteil, aber auch zu einer längeren Ausbrandzeit.

Um CO- Bildung einzuschränken ist, aufgrund der schlechten Durchmischung und der somit entstehenden Orte mit hohen Temperaturen, im Vergleich zur Schürrostfeuerung ein höherer Luftüberschuss notwendig.

Wird der Brennstoff jedoch mit Wurfbeschickung zugeführt, kommt es zu einem gleichmäßigen Verteilen des Brennstoffs am Rost und die Ausbrandzeit wird verkürzt [7].

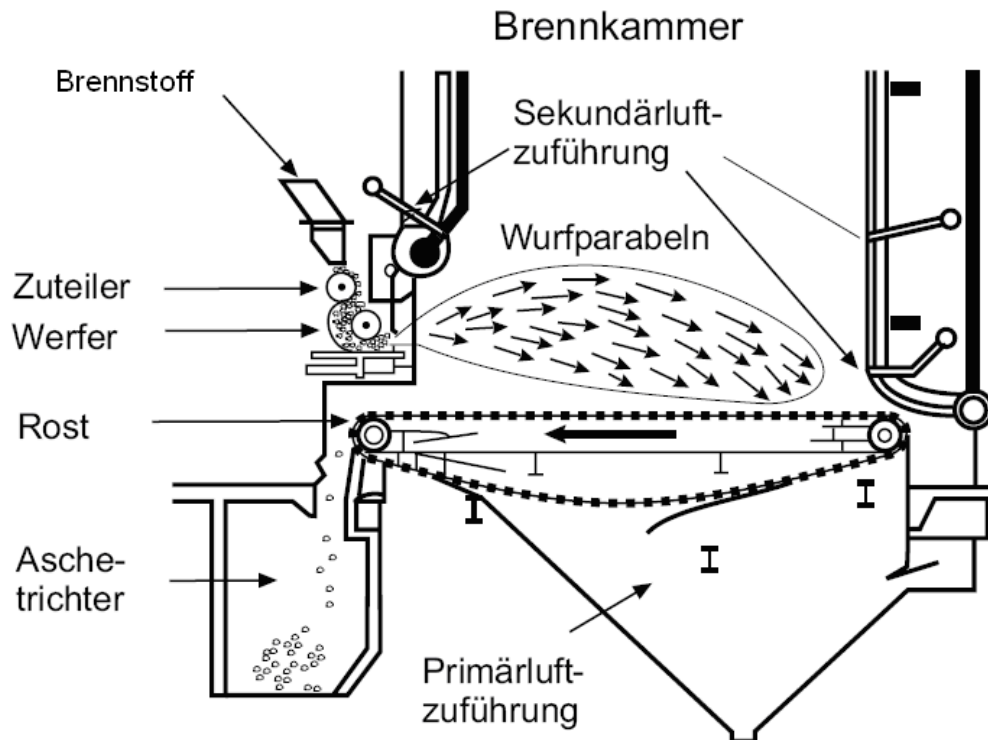


Abbildung 5: Wanderrost mit Wurfbeschickung [3]

#### 3.1.2 Schürrost

Im Falle eines Schürrosts wird der Brennstoff transportiert indem bewegliche Rostreihen gegen feststehende Rostreihen bewegt werden, wodurch eine Schubbewegung entsteht.

Der Rost kann außerdem noch geneigt sein, womit die Schwerkraft zusätzlich zum Brennstofftransport genutzt wird.

Schürroste sind vor allem für Feuerung von feuchten Brennstoffen, die eine lange Verweilzeit im Kessel benötigen, geeignet. [1]

In einem Schürrost wird der Brennstoff durch die Schubbewegung nicht nur weiterbewegt sondern auch durchmischt, wodurch der Abbrand gegenüber dem im Wanderrost verbessert wird, [2].

Der Brennstoff durchläuft entlang des Rostes die unterschiedlichen Phasen der Verbrennung. In der ersten Zone des Rostes findet die Trocknung statt. Gefolgt von der Hauptzone, in der Mitte

des Rostes, in der dann Pyrolyse und Vergasung stattfinden. Am Ende des Rosts erfolgt der Restabbrand der Holzkohle. Als letzter Schritt wird die Asche in den Aschetrichter transportiert. Die Menge der Primärluft, die durch den Rost eingeblasen wird kann für jede Verbrennungsstufe speziell eingestellt werden. [9]

Zusätzlich kann auch die Transportgeschwindigkeit für jede Verbrennungszone eingestellt werden, [23]. Die Sekundärluft wird oberhalb des Rostes zugeführt und dient dem vollständigen Ausbrand der brennbaren Gase, [9].

#### a) Vorschubrost [8]

Beim Vorschubrost geschieht die Schubbewegung in Richtung Ascheabwurf, also in Richtung Rostende.

Der Wassergehalt des Brennstoffs kann zwischen 5 und 60 % liegen.

Der Vorschubrost kann bis auf eine Teillast von 30% hinuntergeregelt werden.

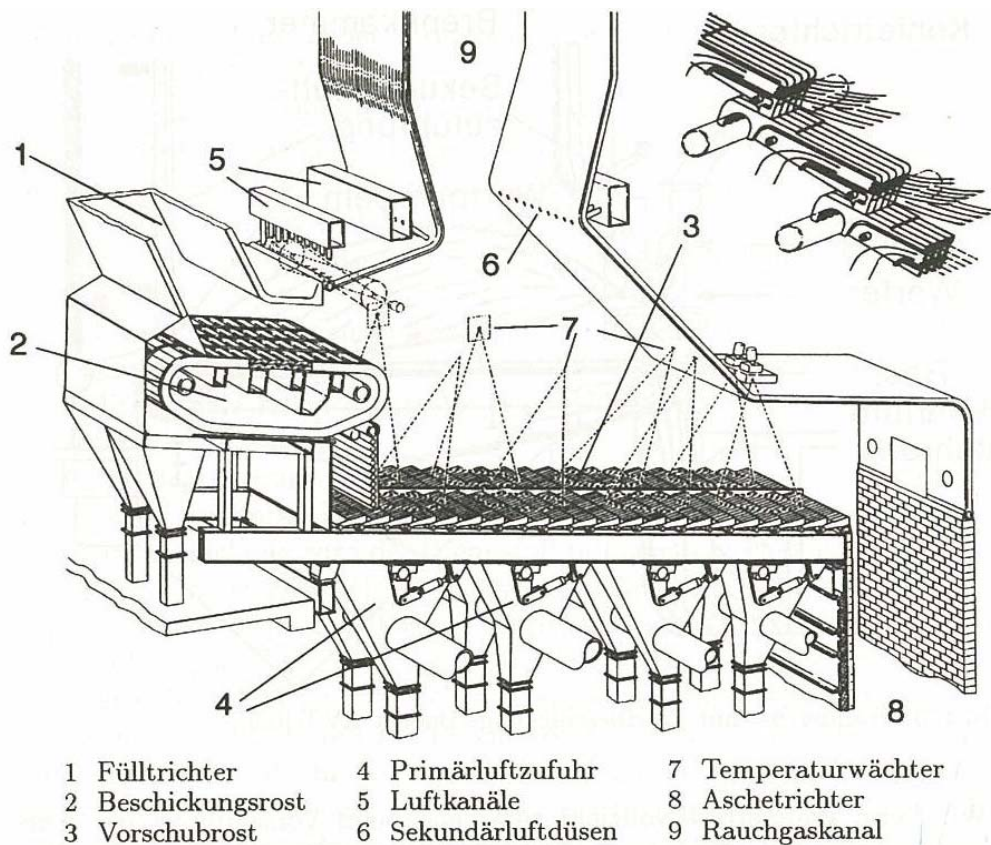


Abbildung 6: Vorschubfeuerung mit Beschickungsrost [3]

#### 3.1.2.a.1 Aldavia- Technologie [24]

Diese Technologie ist von der Firma Aldavia patentiert und sie ist im Leistungsbereich von 500kW<sub>th</sub> bis 30MW<sub>th</sub> erhältlich.

Die Beschickung erfolgt per Schleuderrad, dabei wird der Brennstoff über den Vorschubrost in die Brennkammer eingeworfen.

Durch das drehzahlgeregelte Schleuderrad wird der Brennstoff, wie bei der Wurfbeschickung, siehe Kapitel 3.1.7, gleichmäßig auf den Rost befördert und trocknet und verglüht zum Teil schon während der Flugzeit.

Die Brennstoffzuführung zum Schleuderrad erfolgt mittels einer geregelten Dosierschnecke und der Brennstoff, der nicht größer als 50 mm sein darf, kann auch staubförmig vorliegen.

Die Brennstoffbeschickung kann dabei kontinuierlich geregelt werden und der Kessel somit bis zu Teillasten von 20% hinuntergeregelt werden.

Neben einer  $\lambda$ - Sonde, zur Messung des Sauerstoffgehalts, befindet sich im Kessel noch eine Oxysonde, die die noch oxidierbaren Rauchgaskomponenten, wie CO, misst.

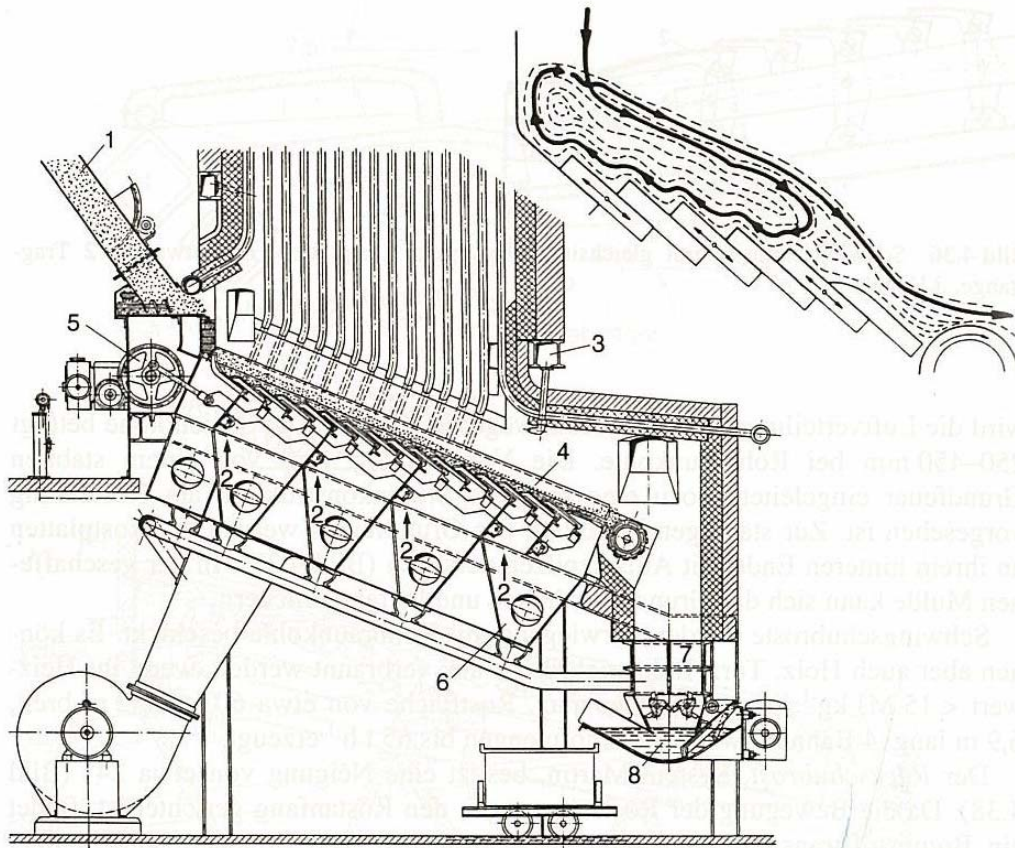
Durch diese Messungen wird die Sekundärluftzuführung geregelt, sodass CO- Emissionen bis unter die Messbarkeitsschwelle gesenkt werden können.

Der Luftüberschuss ist mit Luftzahlen von 1,6 bis 2,3 im Vergleich zu anderen Rostfeuerungsarten hoch.

#### **b) Rückschubrost**

Der Rückschubrost hat eine Neigung von ungefähr  $24^\circ$ , wodurch sich der Brennstoff in Richtung Rostende bewegt. Die Roststäbe bewegen sich jedoch zum Rostanfang, wodurch sich, in Kombination mit der Neigung des Rostes eine Walzbewegung, des Brennstoffs ergibt.

Da der Brennstoff auf diese Weise einen langen Weg zurücklegen muss, ergeben sich durch die Walzbewegung neben der guten Durchmischung, auch lange Verweilzeiten, was wiederum zu einem guten Abbrand führt. [1]



**Bild 4.38** Rückschubrost und Darstellung der Brennstoffbewegung. 1 Brennstoffaufgabe, 2 Unterwind (Primärluft), 3 Sekundärluft, 4 Rost mit Brennstoffschicht, 5 Rostantrieb, 6 Aschetrichter, 7 Schlacketrichter, 8 Naßentschlacker

Abbildung 7: Rückschubrost, mit Darstellung der Brennstoffbewegung am Rost [9]

#### 3.1.3 Unterschubfeuerung mit rotierendem Rost

Der Brennstoff wird mittels einer Förderschnecke in die Mitte eines runden und kegelförmigen Rostes eingebracht, dort quillt er in den Feuerraum, siehe Abbildung 8.

Der Rost besteht aus mehreren Rostringen, von denen jeder zweite rotiert.

Die rotierenden Rostringe bewegen sich außerdem in entgegengesetzter Richtung.

Somit wird der Brennstoff durchmischert und durch die Neigung des Rostes zum Rand des Rostes transportiert, wo die Asche in den mit Wasser gefüllten Aschenraum fällt, der sich unterhalb des Rostes befindet. Die Asche wird dort mittels eines rotierenden radialen Rechens zum Ascheförderer gezogen.

Durch Luftöffnungen in den Rostringen strömt die zur Kühlung des Rostes und zur Verbrennung notwendige Primärluft. Die Brennkammer, die aus Schamotteauskleidung besteht, verläuft konisch, wodurch die abgestrahlte Wärme sich in der Mitte des Rostes konzentriert, wo der Brennstoff bereits trocknen sollte. [7]

### 3 Übersicht über die Biomassefeuerungstechnologien

Die Sekundärluft wird in die Brennkammer über den Rost und in den Ascheraum eingeblasen, sodass sich Rauchgas und Verbrennungsluft miteinander vermischen, [25].

Durch die gute Durchmischung des Brennstoffs, ist der Rotationsrost besonders gut für nasse Brennstoffe mit einem Wassergehalt von 40 bis zu 65% geeignet, [9]. Aufgrund der Brennstoffzuführung mittels Schnecke sollten die Brennstofffraktionen nicht größer als 50 mm sein, [7].

Drehrostfeuerungsanlagen sind erhältlich im Leistungsbereich von 8,6 MW<sub>th</sub> bis 23 MW<sub>th</sub>. [25]

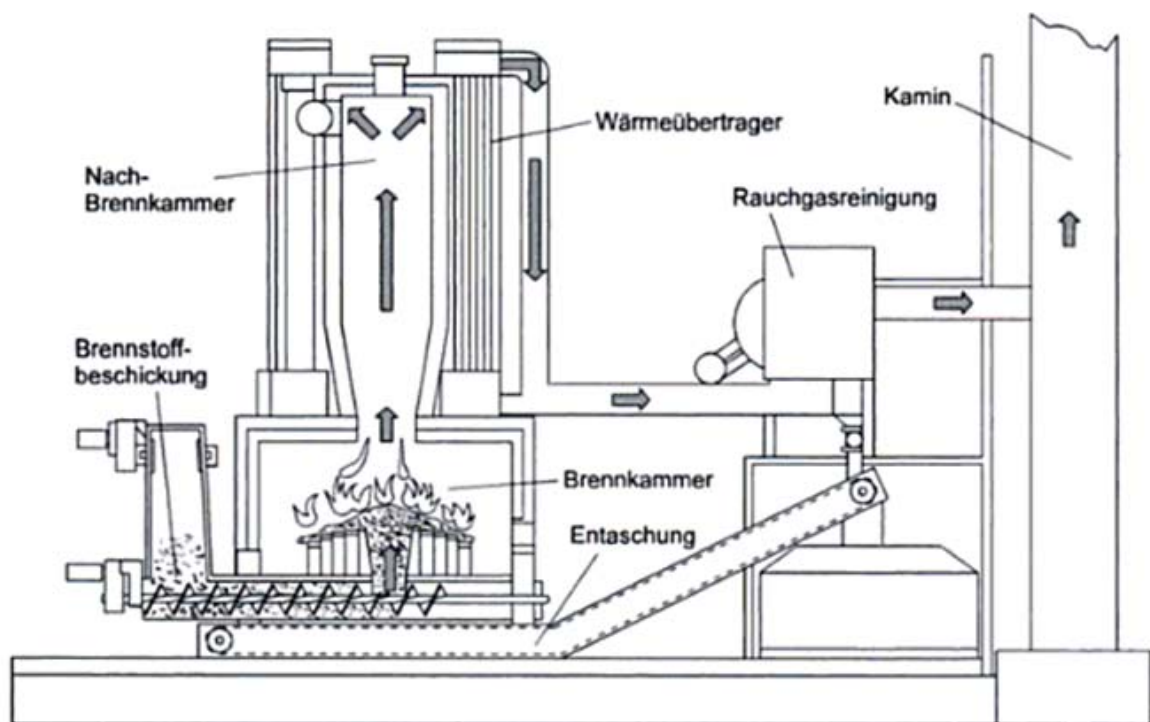


Abbildung 8: Unterschubfeuerung mit rotierendem Rost [7]



#### 3.1.4 Vibrationsrost

Der Vibrationsrost, siehe Abbildung 9, der eine leichte Neigung aufweist, besteht aus mehreren Rostplatten, die auf Federn gelagert sind und periodisch kurzzeitig zum Vibrieren gebracht werden. Die Platten sind durchlöchert, sodass die Primärluft durch sie hindurchströmen kann.

Die Brennstoffbeschickung erfolgt per Wurfbeschickung. [2]

Über dem Rost wird Sekundärluft eingeblasen.

Durch die Vibration wird der Brennstoff in Richtung Rostende, wo sich der Aschebehälter befindet, befördert und gleichmäßig über den Rost verteilt, wodurch Verschlackungen verhindert werden. Er ist somit besonders für Brennstoffe mit niedrigem Ascheschmelzpunkt geeignet, die zu Verschlackungen neigen. [7]

Da der Vibrationsrost weniger bewegliche Teile hat, als die bereits vorgestellten Roste, ist er weniger wartungsintensiv, [2].

Während der Rost vibriert kommt es jedoch zu erhöhten CO- Werten, deshalb wird die Vibrationsdauer so kurz als möglich gehalten. [26]

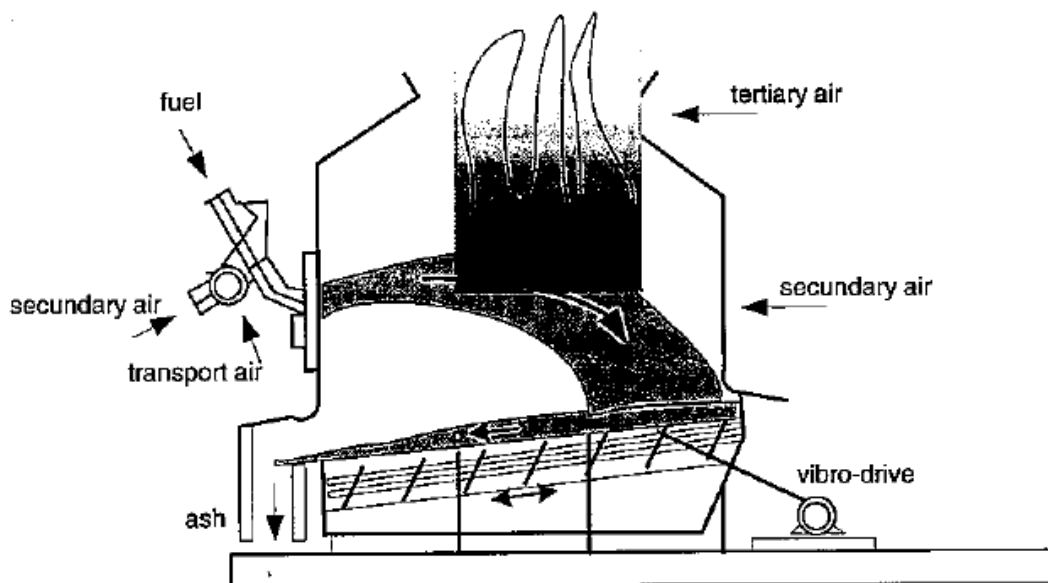


Abbildung 9: Schema des Vibrationsrosts[7]

#### 3.1.5 Schoppe-Brennkammer

Die Schoppe-Brennkammer, siehe Abbildung 10, besteht aus einem schiefgelegten kegelförmigen Rost, der langsam um seine Achse rotiert, wodurch eine gute Durchmischung des Brennstoffs erfolgt.

Die Primärluft wird durch die Achse des Rostes in das Brennstoffbett eingeblasen.

Die Sekundärluft wird tangential in die zylinderförmige Ausbrandzone eingeblasen, durch die dadurch entstehenden Wirbel wird das Rauchgas gut mit der Luft vermischt.

Die Verbrennungskammerwände sind wassergekühlt um eine Temperatur von 800°C zu erhalten und Ablagerungen an den Wänden zu verhindern.

Diese Verringerung der Verbrennungstemperatur ist mitunter ein Grund dafür, dass der totale Luftüberschuss der Schoppe-Brennkammer zwischen  $\lambda=1,2$  und 1,4 liegt, der für Rostfeuerungstechnologien sehr niedrig ist.

Ein Nachteil der wassergekühlten Brennkammerwände liegt in der Notwendigkeit eines Hilfsbrenners.

Weitere Nachteile sind die notwendigen periodischen Stillstandzeiten, die für die Entfernung von großen Aschefraktionen, die sich in der Mitte des Verbrennungskegels ansammeln, und die große Abnutzung des Rostes und der Brennkammer. [7]

Für die Schoppe- Brennkammer konnten jedoch keine Anbieter ausfindig gemacht werden.

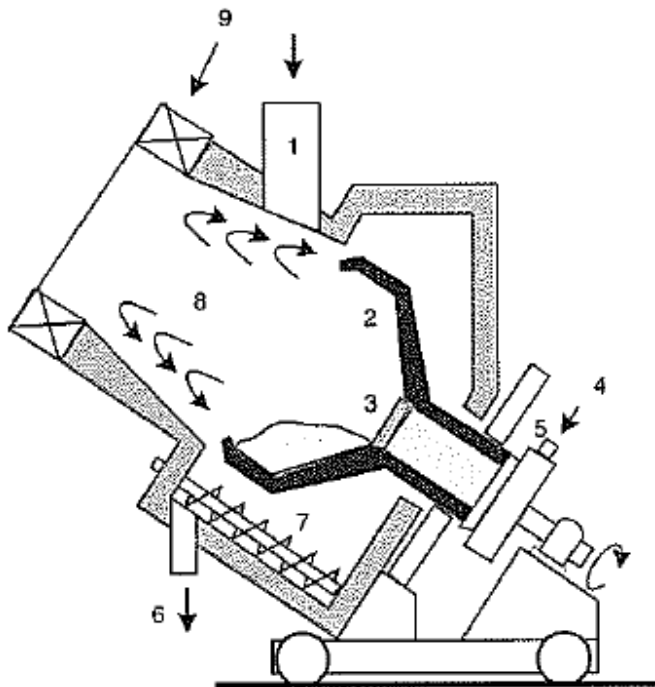


Abbildung 10: Konzept der Schoppebrennkammer Beschreibung: 1...Brennstoffzugabe, 2...Rost, 3... Boden des Kegels, 4... Primärluft, 5...Primärluftregler,6...Entaschung, 7...Schneckenförderer, 8...Ausbrandzone, 9...Sekundärluft [7]

### 3.1.6 Rostkühlung

Durch die hohen thermischen Belastungen, mit denen der Rost konfrontiert wird ist eine Rostkühlung erforderlich, sie kann bei den meisten Rostausführungen entweder als Luftkühlung oder Wasserkühlung erfolgen, [7].

#### a) Luftkühlung

Luftkühlung ist eher für feuchte Brennstoffe, bei der keine hohen Verbrennungstemperaturen erreicht werden geeignet, [7].

Bei Luftkühlung wird der Rost mittels Primärluft, die den Rost durchströmt, gekühlt.

Daher muss die Primärluft, im Fall von Wanderrosten, mindestens 80-90% der Verbrennungsluft ausmachen und sie darf nicht wärmer als 140°C sein, wodurch die obere Grenze der Luftvorwärmung bestimmt wird. [4]

#### b) Wasserkühlung

Die Wasserkühlung des Rostes kann entweder durch Durchströmen des Rostes mit Wasser erfolgen, oder durch Kühlbalken, die sich unterhalb der Roststäbe befinden.

Der Vorteil ist, dass der Rost unabhängig von der Verbrennungsluft gekühlt werden und somit die Luftregelung nur auf die Verbrennung optimiert ablaufen kann. [23]

Die Wasserkühlung ist vor allem für trockene Brennstoffe und Brennstoffe mit niedrigen Ascheschmelztemperaturen geeignet, [7].

Im Falle des Vibrationsrosts mit Wasserkühlung kann die Primärluft auf bis zu 300°C vorgewärmt werden. Das Kühlwasser kann zur Speisewasservorwärmung benutzt werden, [27].

### 3.1.7 Brennstoffaufgabe

Durch die Brennstoffaufgabe kann der Abbrand, vor allem von Brennstoff mit unterschiedlichen Stückgrößen, positiv beeinflusst werden.

Übliche Beschickungsformen sind Kolbenbeschickung, Rutschkanal oder Förderschnecke.

Wobei die Kolbenbeschickung, siehe Abbildung 11, für ungleichmäßig große Brennstoffe von den vorher genannten Möglichkeiten am besten geeignet ist.

Die Förderschnecke ist kostengünstig, beschränkt die Partikelgröße der Biomasse jedoch auf 50 mm und sie reagiert sensibel auf Metall oder andere Verunreinigungen. [7]

Eine stufenlos regelbare Brennstoffbeschickung ist mittels eines Beschickungsrostes, siehe Abbildung 6, möglich. Dieser Beschickungsrost ist als Wanderrost ausgeführt und die

Brennstoffaufgabe kann so optimal auf die feuerungstechnischen Anforderungen eingestellt werden. [4]

Als spezielle Brennstoffaufgabe sei hier noch die Wurfbeschickung, siehe Abbildung 5, erwähnt, bei der der Brennstoff, mittels eines pneumatischen Werfers, in den Kessel eingeblasen wird, wobei die Brennstoffförderung des Rosts von hinten nach vorne erfolgt.

Während Feinfraktionen bereits während der Flugzeit verbrennen, haben größere Fraktionen eine größere Wurfparabel und landen weiter hinten am Rost, wodurch sich für größere Partikel eine längere Verweilzeit im Kessel ergibt und der Rost vom Feinkorn entlastet wird, [1].

Ein Nachteil der Wurfbeschickung ist jedoch der höhere Flugaschenanteil, [23].

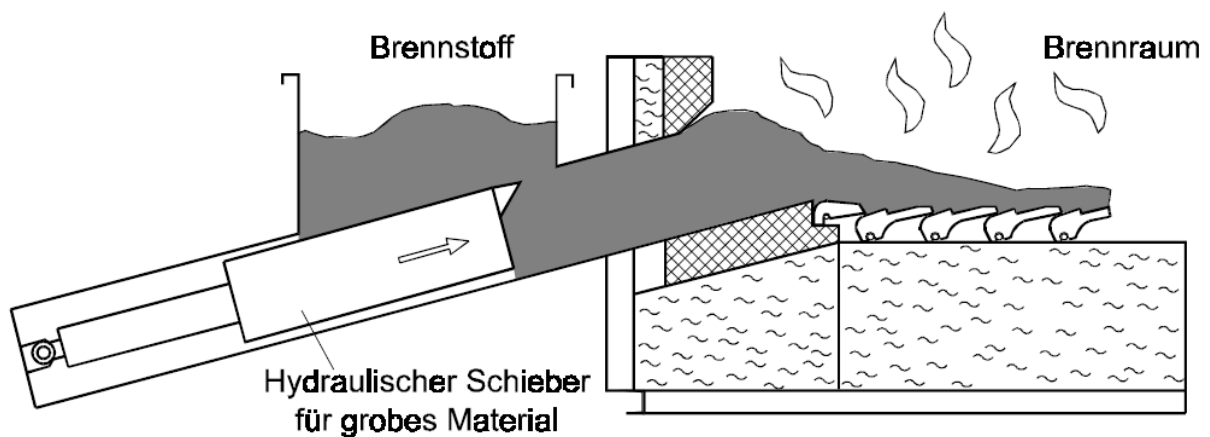


Abbildung 11: Funktionsweise der Kolbenbeschickung [8]

### 3.2 Wirbelschichtfeuerung

Bei der Wirbelschichtfeuerung wird der Brennstoff in einem Wirbelbett gemeinsam mit Inertmaterial, welches oftmals aus Quarzsand vermischt mit Asche besteht, verbrannt. Das Inertmaterial macht ungefähr 95 bis 98% des gesamten Wirbelbettmaterials aus. [1]

In den Kessel wird von unten, durch einen Düsenboden Primärluft eingeblasen, sodass die Brennstoff-Inertmaterialschiicht aufgelockert wird. Wenn die Gasgeschwindigkeit die Lockerungsgeschwindigkeit der Schicht ( $w=w_L$ ) erreicht, bildet sich eine Wirbelschicht, die auch fluidisierende Schicht genannt wird.

Diese fluidisierende Schicht verhält sich wie eine Gas-Feststoffsuspension und führt eine starke selbst- durchmischende Bewegung durch. Bei der fluidisierenden Schicht ist der Druckabfall der Gasströmung proportional zum Gewicht der Wirbelschicht, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. [4]

Durch den hohen Stoff- und Wärmeaustausch in der Wirbelschicht, herrscht im Kessel eine relativ homogene Temperaturverteilung vor. Es kommt zu einem nahezu vollständigen Ausbrand und es wird ein hoher Feuerungswirkungsgrad erreicht. [9]

Die Wirbelschichtfeuerung ermöglicht den Einsatz eines breiten Brennstoffbands mit einem Wassergehalt von 5 bis 60%, [8].

Des weiteren entstehen wenig CO und NO<sub>x</sub>- Emissionen, [4].

Auch ist positiv anzumerken, dass sich im Wirbelschichtkessel keine beweglichen Teile befinden, [7].

Der größte Teil der Asche in der Wirbelschicht wird als Flugasche in der Entstaubungseinrichtung abgeschieden.

Wirbelschichtfeuerungen benötigen für die Luftförderung relativ viel Energie und weisen somit neben hohen Investitionskosten auch hohe Betriebskosten auf.

Ein weiterer Nachteil der Wirbelschichtfeuerung ist, dass es durch das abrasive Inertmaterial leichter zu Erosionen an der Feuerraumumwandung kommen kann. [9]

Je nach Fluidgeschwindigkeit lässt sich die Wirbelschicht in stationäre oder zirkulierende Wirbelschicht einteilen.

#### 3.2.1 Stationäre Wirbelschichtfeuerung

In der stationären Wirbelschicht ist die Fluidgeschwindigkeit gerade so groß, dass kein Feststoff aus der Schicht ausgetragen und sie somit eine definierte Schichtoberfläche hat, [1].

Dieser Zustand liegt bei Fluidgeschwindigkeiten, die zwischen 1 und 2 m/s liegen vor, und wird dadurch erreicht, dass Primärluft von unten in das Wirbelbett eingeblasen wird.

Zusätzlich wird noch Sekundärluft an verschiedenen Stellen eingeblasen um eine gestufte Verbrennung zu erreichen, mit der NO<sub>x</sub>- Emissionen verringert werden können.

Der Partikeldurchmesser des Brennstoffs sollte unter 80 mm liegen, ansonsten ist die Wirbelschicht flexibel gegenüber verschiedenen Partikelgrößen und variierender Feuchte des Brennstoffs. [7]

Die Temperatur in der Wirbelschicht kann durch integrierte Wärmetauscher, so genannte Tauchheizflächen, geregelt werden, [9].

Im Falle eines offenen Düsenbodens können während des Betriebs kontinuierlich Grobteile, wie Steine, Metalle und Bettmaterial abgezogen werden. Somit findet in diesem Fall der Ascheabzug unter der Wirbelschicht statt. Das Bettmaterial kann dann nach einer Bettmaterialwiederaufbereitung wieder in die Wirbelschicht zurückgeführt werden. [13]

Durch die gute Durchmischung des Brennstoffs liegt die optimale Luftzahl zwischen 1,2 und 1,3. Ab einer Nutzleistung von 20 MW<sub>th</sub> sind stationäre Wirbelschichten, durch den höheren Kesselwirkungsgrad, von wirtschaftlichem Interesse. [7]

In modernen stationären Wirbelschichtfeuerungsanlagen kann eine Teillast im Bereich von 60 bis 100% der Nennlast erreicht werden und die Verbrennungstemperaturen auf den Bereich von 650 bis 850°C eingeschränkt werden, [7].

Die Brennstoffzuführung kann mittels Wurfbeschickung auf das Wirbelbett oder mit Förderschnecken direkt in das Wirbelbett erfolgen, [8].

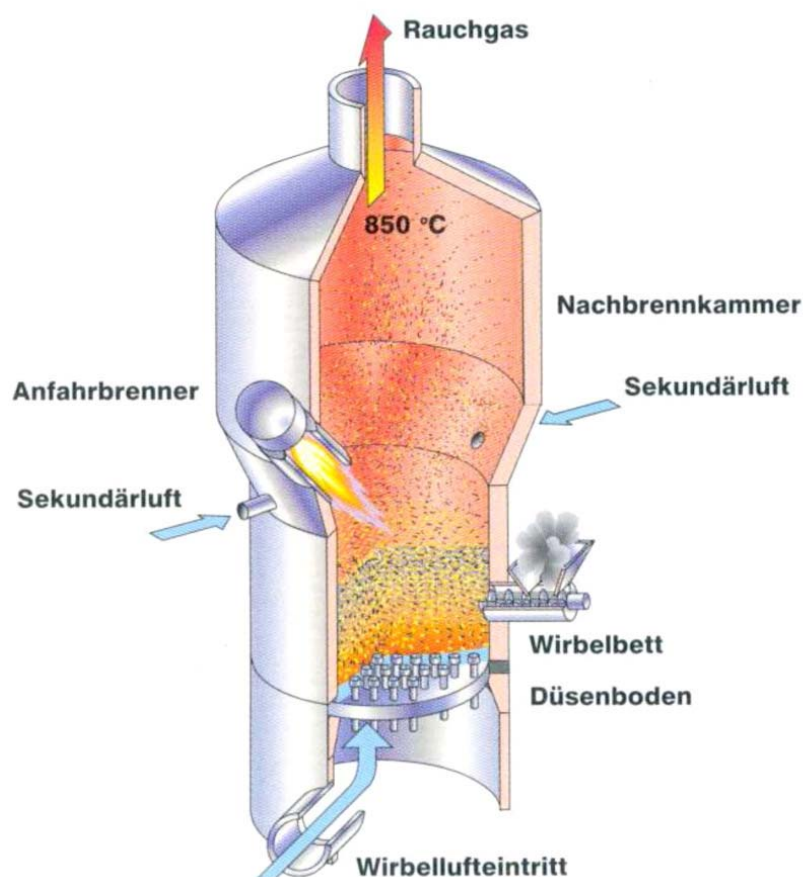


Abbildung 12: Schema der stationären Wirbelschicht [23]

### 3.2.2 Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung

Bei der zirkulierenden Wirbelschicht, siehe Abbildung 13, werden Gasgeschwindigkeiten von 5 bis 10 m/s erreicht, die über der Sinkgeschwindigkeit der Partikel liegen, daher werden Brennstoff und Inertmaterial aus der Schicht ausgetragen.

Der aus der Schicht ausgetragene Feststoff wird mittels eines Zyklons abgetrennt und wieder in die Wirbelschicht zurückgeführt.

Mit der zirkulierenden Wirbelschicht können höhere Feuerungsleistungen als mit der stationären Wirbelschicht erreicht werden, und der Brennstoff kann in Bezug auf Feuchte und Zusammensetzung inhomogener sein als in der stationären Wirbelschicht. [1] Jedoch sollte der Partikeldurchmesser des Brennstoffs bei der zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung nicht größer als 40 mm sein. Außerdem muss vor der Verbrennung in der zirkulierenden Wirbelschicht Metall abgeschieden werden.

Die Betttemperatur von 750- 900 °C wird entweder durch wassergekühlte Kesselwände oder durch Wärmetauscher im Bettmaterial, das von dem Zyklon abgeschieden wurde, so genannte Fließbettkühler, geregelt.

Durch das Eindüsen von Sekundärluft, oberhalb der Rückführung des Brennstoffs, wird der vollständige Ausbrand gewährleistet und es kann eine gestufte Verbrennung erfolgen, wodurch im Idealfall keine Sekundärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ - Reduktion mehr nötig sind. [7]

Der Luftüberschuss in der zirkulierenden Wirbelschicht liegt zwischen 1,1 und 1,2.

Ab einer Nutzwärmeleistung von 30  $\text{MW}_{\text{th}}$  wird die zirkulierende Wirbelschicht, durch ihre hohen Feuerungswirkungsgrad und ihren geringeren Abgasmassenstrom, wirtschaftlich interessant. [7]

Die Zuführung des Brennstoffs erfolgt meist mittels Förderschnecken in das vom Zyklon abgeschiedene Bettmaterial. [8]

Die zirkulierende Wirbelschicht weist ein gutes Teillastverhalten auf und kann auf bis zu 40% hinuntergeregelt werden. [17]

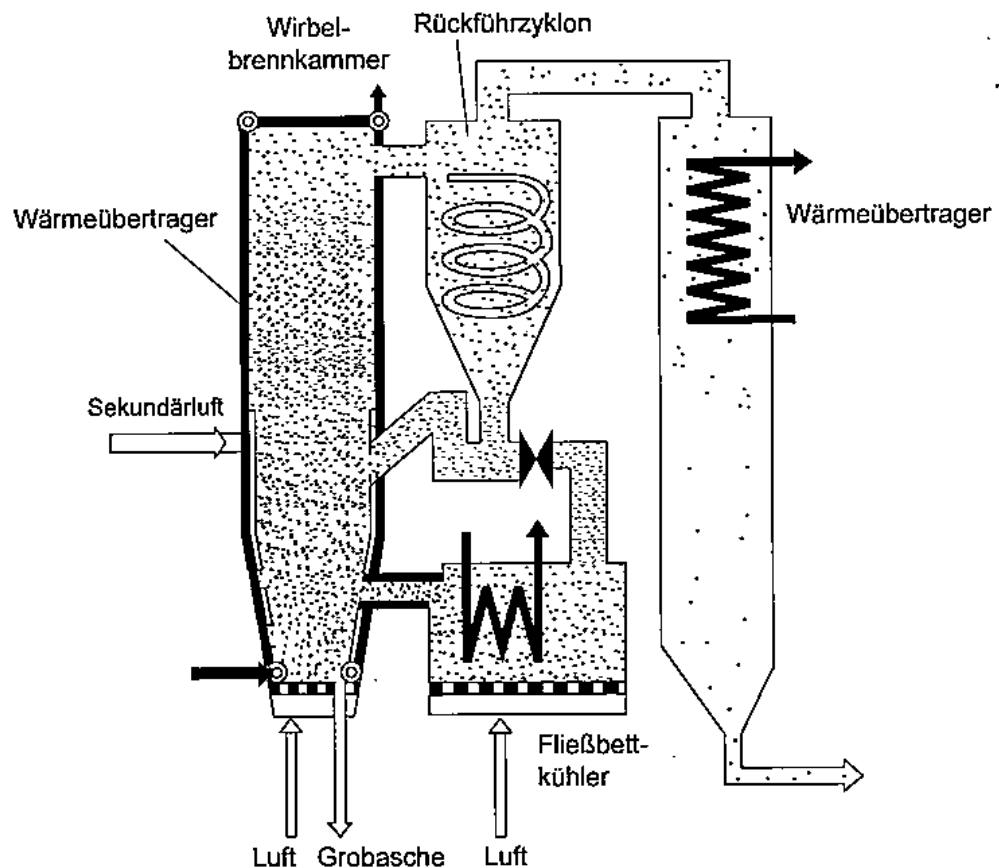


Abbildung 13: Schematische Darstellung der zirkulierenden Wirbelschicht mit Fließbettkühler [8]

#### a) Zirkulierende Wirbelschicht mit Fließbettkühler

Die zirkulierende Wirbelschicht mit Fließbettkühler, siehe Abbildung 13, wird in letzter Zeit auch für die Biomassefeuerung verwendet.

Ihren Ursprung hat dieses Verfahren in der Kohlefeuerung, dem so genannten Lurgi-Verfahren. Beim Lurgi-Verfahren wird das Bettmaterial nach dem es durch die Bettmaterialrückführung, also den Zyklon, abgetrennt wurde in einen externen Fließbettkühler geführt, bevor das Bettmaterial wieder in die Brennkammer zurückgeführt wird.

Die externen Fließbettkühler besitzen eine stationäre Wirbelschicht und in ihnen befindet sich der Endüberhitzer. [1]

Durch den externen Fließbettkühler wird die Brennkammertemperatur reduziert und geregelt. Außerdem kann sich durch die in ihm vorherrschenden stark erosiven Bedingungen keine Verschlackung der Heizflächen ausbilden, wodurch auch der Effekt der Hochtemperaturchlorkorrosion minimiert wird.



### 3.2.3 Düsenboden [23]

Der Düsenboden bildet den unteren Abschluss der Wirbelschicht. Über die Düsen wird die Fluidisierungsluft eingeblasen.

Dabei wird zwischen zwei Ausführungen unterschieden, dem geschlossenen und dem offenen Düsenboden.

Der geschlossene Düsenboden besteht aus mehreren tragenden Flächen, die mit Düsen versehen sind. Im Falle eines geschlossenen Düsenbodens erfolgt der Bettmaterialabzug über Öffnungen im Randbereich oder zwischen den Flächen.

Der offene Düsenboden besteht meist aus parallel verlaufenden Rohren, zwischen denen sich Öffnungen befinden, die groß genug sind, um zu ermöglichen, dass grobes Bettmaterial abgezogen werden kann.

### 3.2.4 Bettmaterial

Das Bettmaterial der Wirbelschicht besteht zum größten Teil aus Inertmaterial.

Dieses Inertmaterial ist meistens Silikatsand, aber es finden auch andere Inertmaterialien, wie Olivin, Dolomit, Hämatit oder Korund Verwendung.[12]

Die Inertmaterialien beeinflussen das Agglomerationsverhalten der Wirbelschicht, siehe Kapitel 3.5.3.

Bei der zirkulierenden Wirbelschicht fällt, durch den größeren Austrag, ein höherer Bettmaterialverbrauch an als bei der stationären Wirbelschicht. [7]

#### a) Bettmaterialaufbereitung [23]

Bei Wirbelschichten wird kontinuierlich ein geringer Teil des Bettmaterials abgezogen um Störstoffe oder agglomerierte Partikel zu entfernen, dies erfolgt meist mittels gekühlter Förderschnecken.

Dabei wird auch Inertmaterial aus der Wirbelschicht entfernt. Um den Bettmaterialverbrauch einzuschränken kann das Bettmaterial recycelt werden.

Dazu wird das Bettmaterial gesiebt, sodass das Grobgut von dem Feinanteil getrennt wird.

Die feinen Partikel werden dann, meist pneumatisch, wieder in das Wirbelbett zurück geleitet.

### 3.3 Einblasfeuerung

Bei der Einblasfeuerung wird mittels eines Hilfsbrenners die Brennkammer auf eine Temperatur von 450 bis 500°C aufgeheizt und dann der Brennstoff mit Luft eingeblasen, [9].

Der Brennstoff darf nicht größer als 10 bis 20 mm sein und sein Wassergehalt darf nicht über 20% liegen.

Die Brennstoffbeschickung muss genau kontrolliert werden, da die Vergasung in den kleinen Brennstoffpartikeln explosionsartig vor sich geht. Durch die hohen Temperaturen mit denen die Kesselwände konfrontiert werden, sollten sie wassergekühlt sein.

Bei der Einblasfeuerung kann aufgrund des schnellen Verbrennungsvorgangs die Laständerung sehr schnell erfolgen. Da bei der Einblasfeuerung die Luftstufung sehr gut erfolgen kann, können geringe NO<sub>x</sub>-Emissionen und ein Luftüberschuss zwischen  $\lambda = 1,3$  und  $1,5$  erreicht werden. [7]

Der Brennstoff wird entweder direkt in die Brennkammer eingeblasen oder er wird zuvor in eine Vorbrennkammer (Muffel) eingeblasen, [9].

Einblasfeuerungen für Biomasse sind bis zu einer Leistung von 50 MW<sub>th</sub> erhältlich, [8].

Bei Muffelbrennern wird mit der Primärluft der Brennstoff tangential eingeblasen, wodurch eine Rotation entlang der Kesselwand entsteht. Es folgt eine Einschnürung des Muffels an der Sekundärluft eingeblasen wird. Durch diese Einschnürung kommt es zu einer guten Durchmischung der Sekundärluft mit dem Rauchgas. [9]

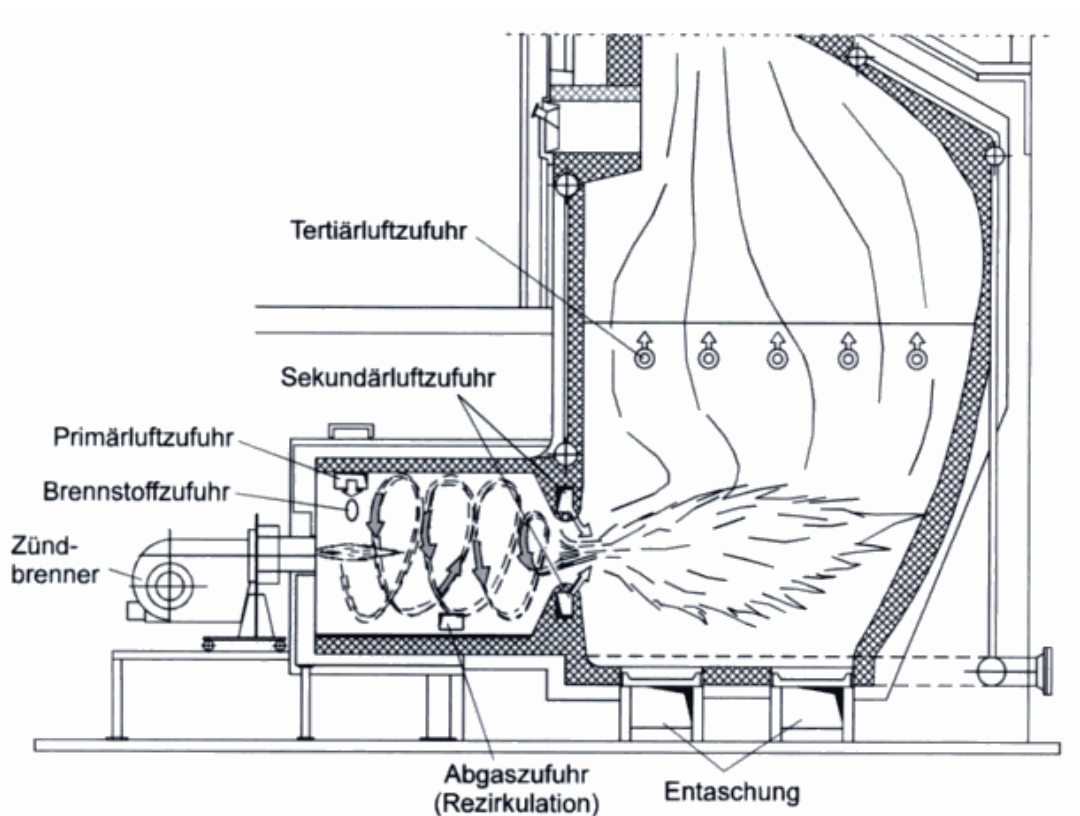


Abbildung 14: Darstellung der Muffelbrennkammer [9]

Außerdem gibt es noch die Möglichkeit des Zyklonbrenners, hier wird der Brennstoff direkt in die Brennkammer eingeblasen

Ein Vorteil des Zyklonbrenners ist, dass er sich kontinuierlich regeln lässt. [7]

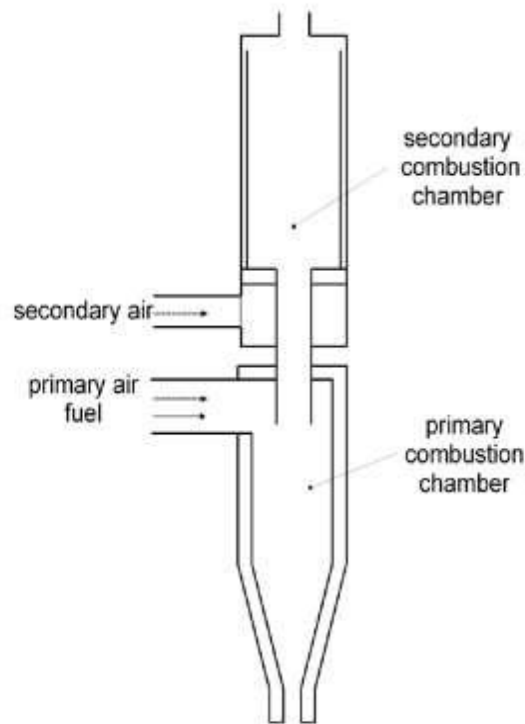


Abbildung 15: Zweistufiger Zyklonbrenner [7]

Eine Sonderform der Einblasfeuerung ist der Staubbrenner, er wurde direkt aus der Kohlenverbrennung übernommen und kann nur für Staub mit der Größe von höchstens 1 mm eingesetzt werden.

Einblasfeuerungsanlagen können bis zu einer Teillast von 25% der Nennleistung betrieben werden. [16]

Die Kesselwände unterliegen bei Einblasfeuerungen aufgrund der thermischen Beanspruchung und der erosiven Bedingungen hohen Abnutzungserscheinungen. [7]

Einblasfeuerungen weisen hohe Staubfrachten auf und benötigen daher in der Abgasbehandlung einen Gewebefilter.

Es besteht auch die Möglichkeit der Kombination der Einblasfeuerung mit der Rostfeuerung.

Dabei wird stückiger Brennstoff mechanisch auf den Rost befördert während feiner Brennstoff in die Brennkammer eingeblasen wird. [9]

### 3.4 Asche

Bei der Rostfeuerung setzt sich die anfallende Asche aus Grob- oder Rostasche, die im Kessel abgeschieden wird, und Flugasche zusammen.

Flugasche, fällt im Entstauber, also im Zyklon, als Zyklonflugasche, und in den Elektro- bzw. Gewebefiltern, als Filterasche an. [1]

Bei der Wirbelschichtfeuerung fällt der Ascheaustrag als Flugasche und Bettasche an.

Normalerweise wird der Großteil des Brennmaterials als Flugasche ausgetragen, es bleiben jedoch unverbrennbare Materialien in der Wirbelschicht, außerdem kann es durch Agglomeration zur Bildung von groben Intertmaterial kommen. Diese Grobpartikel müssen nach Bedarf als Bettasche aus dem Wirbelbett abgeführt werden. [28]

Bei der zirkulierenden Wirbelschicht werden durch den Zyklon ungefähr 99% des Bettmaterials in den Kessel zurückgeführt, der Rest wird am Entstauber als Flugasche abgeschieden.

Die Aschen unterscheiden sich stark nach der Anfallsstelle und sollten zur möglichen Weiterverwendung auch danach getrennt werden. [1]

#### 3.4.1 Ascheabzug [23]

Auf dem Rost verbleibt als Rückstand die Rostasche, die sich aus unbrennbaren und unverbrannten Brennstoffbestandteilen, sowie nicht brennbaren Störstoffen zusammensetzt.

Diese Asche wird durch Rostdurchfall und zum größten Teil durch Ascheabwurf, der am Ende des Rosts erfolgt, dem Ascheabzug zugeführt, der die Asche aus dem Feuerraum in das Entaschungssilo transportiert.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten des Ascheabzugs, die Nassentaschung und die Trockenentaschung.

##### a) Nassentaschung

Im Falle einer Nassentaschung befindet sich die Aschefördereinrichtung in einem Wasserbad.

Die Fallschächte der Aschetrichter, in die die Asche fällt, münden unterhalb des Wasserspiegels, sodass keine Luftleckage zwischen Feuerraum und Außenumgebung stattfindet. Durch das Wasser wird die Asche abgelöscht und Staub gebunden.

Der Nachteil der Nassentaschung liegt an dem hohen Wassergehalt und daher höheren Masse der zu entsorgenden Asche.

Der dauerhafte Wassereinfluss führt außerdem zu einer höheren Belastung der Fördereinrichtung und somit zu höherem Verschleiß als bei der Trockenentaschung.

Als Fördereinrichtung kommen hierbei Kratzkettenförderer oder Plattenbandförderer in Frage.

### **b) Trockenentaschung**

An der Trockenentaschung ist kein Wasser beteiligt, wodurch sowohl die Vor- als auch die Nachteile der Nassentaschung wegfallen.

Somit entfällt auch die Abdichtung des Feuerraums durch das Wasser, deshalb sind technische Einrichtungen, wie z. B. Klappen, notwendig, um eine Luftleckage zu unterbinden. Durch diese Einrichtungen kann jedoch nicht dieselbe Dichtheit wie im Falle eines Flüssigkeitsabschlusses erzielt werden.

### **3.4.2 Aschenausbringung**

Wegen des hohen Anteils von Ca und Mg in Pflanzenaschen kommt es bei der Ausbringung zu einer basischen Wirkung auf den Boden.

Die Asche sollte daher nur dort aufgebracht werden, wo diese Wirkung erwünscht ist, oder zumindest keine nachteiligen Folgen hat. Außerdem gibt es Flächen, wie z.B. Wasserschutzgebiete oder Naturschutzgebiete, in denen das Ausbringen von Holzaschen verboten ist. [14]

Filteraschen dürfen nicht ausgebracht werden, sondern müssen deponiert werden. [8]

Zyklonasche und Rostasche hingegen dürfen in Österreich auf Waldböden ausgebracht werden, solange bei einer Untersuchung des Aschegehalts, die je nach Leistung der Verbrennungsanlage in unterschiedlichen Abständen durchgeführt werden muss, der Schadstoffgehalt die dafür zulässigen Grenzwerte nicht überschreitet.

Dabei sollte nicht mehr als 2 t/ha verteilt über 30 Jahre ausgebracht werden. [14]

Bei Ausbringung auf Ackerland oder Grünland soll hingegen auf eine Beschränkung der Emissionseinbringung pro Jahr geachtet werden. [15]

### 3.5 Spezielle Herausforderungen der Biomassefeuerung

Der Brennstoff Biomasse führt durch seine speziellen Eigenschaften zu technischen Herausforderungen.

Bei der Verbrennung kann es dabei durch die chemische Zusammensetzung der Biomasse und ihre Inhomogenität zu Problemen kommen. [7]

#### 3.5.1 Hochtemperaturchlorkorrosion

Da Biomasse zu einem gewissen Anteil Chlor, Alkali- bzw. Erdalkalimetalle und Schwefel enthält kann es zum Auftreten der Hochtemperaturchlorkorrosion kommen.

Der Chlorgehalt der Biomasse hängt, neben der Art der Biomasse, auch von ihrer Herkunft und Lagerung ab.

Bei einem Verhältnis von Schwefel zu Chlor im Abgas, das kleiner als 2 ist, muss man mit Hochtemperaturchlorkorrosion rechnen.[11]

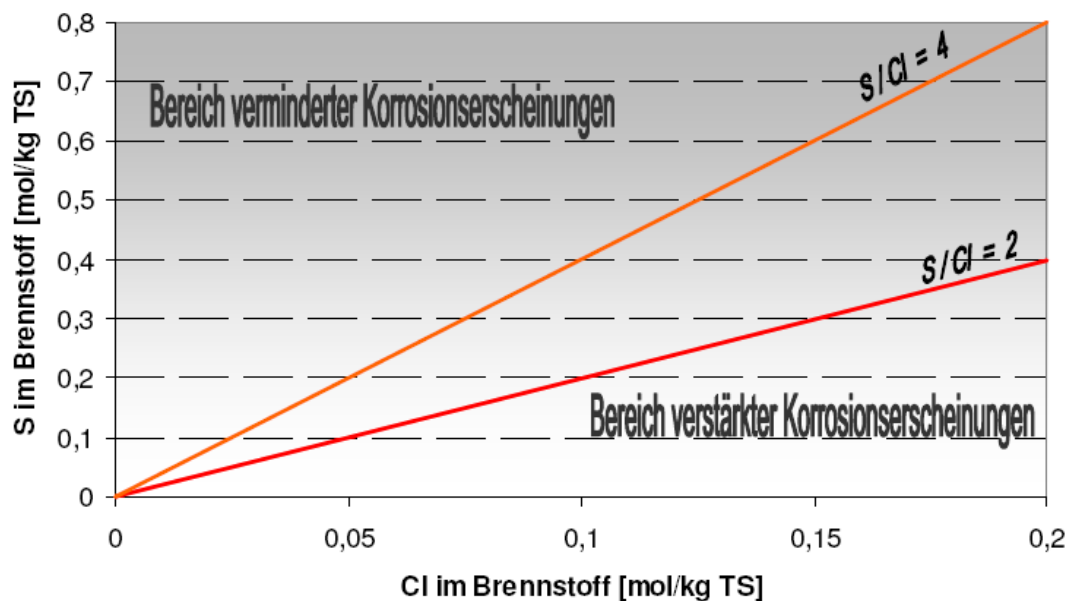


Abbildung 16: Zusammenhang des Schwefel- und Chlorgehalts des Brennstoffs mit Korrosionserscheinungen [23]

Außerdem ist die Hochtemperaturchlorkorrosion sowohl von der Rohrwandtemperatur als auch von der Rauchgastemperatur abhängig.

Dieser Zusammenhang wird im Flinger'schen Korrosionsdiagramm, siehe Abbildung 17, dargestellt. Dass die Korrosion auch von der Rauchgasgeschwindigkeit  $v$  abhängt, wird durch die Erweiterung nach Warnecke berücksichtigt. [23]

Jedoch kann es in der Praxis auch in Bereichen außerhalb der Korrosionsgebiete zu Korrosionserscheinungen kommen.

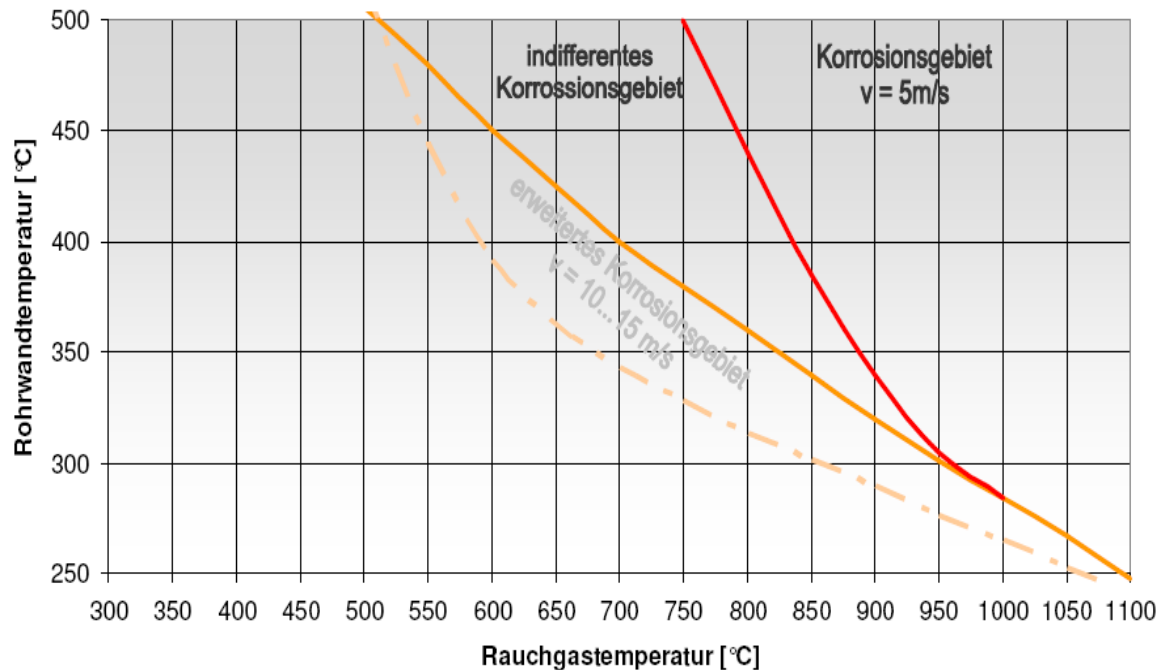


Abbildung 17: Flinger'sches Korrosionsdiagramm mit Erweiterung nach Warnecke [6]

Die Hochtemperaturchlorkorrosion greift vor allem Überhitzerflächen an, an denen es zu Ablagerungen gekommen ist. Dabei kommt es zu einer Abtragung der Rohrwand.

Der Mechanismus läuft dabei in mehreren Phasen ab.

Während der Verbrennung bilden sich Alkalichloride, wie z.B. KCl oder NaCl, diese verdampfen und werden mit dem Abgas weiter transportiert. Durch Abkühlung kondensieren diese an Wärmetauschern oder an Staubteilchen, die ihrerseits Anbackungen an Wärmetauschern bilden können. Durch die Reaktion mit im Abgas enthaltenem Schwefeldioxid können diese Alkalimetalle sulfatieren, wodurch sich elementares Chlor bildet, das die Rohrwände angreift.

Es entsteht  $\text{FeCl}_2$ , das bei Temperaturen über  $500^\circ\text{C}$  verdampft und oxidiert wodurch wiederum elementares Chlor frei wird, siehe Abbildung 18.

Es kommt also zu einer kontinuierlichen Regeneration des elementaren Chlors, wodurch sich keine Schutzschicht ausbilden kann. Der Rohrwandabtrag kann dadurch erheblich sein und nur mehr durch Abtragen der angelagerten Schichten gestoppt werden. [11]

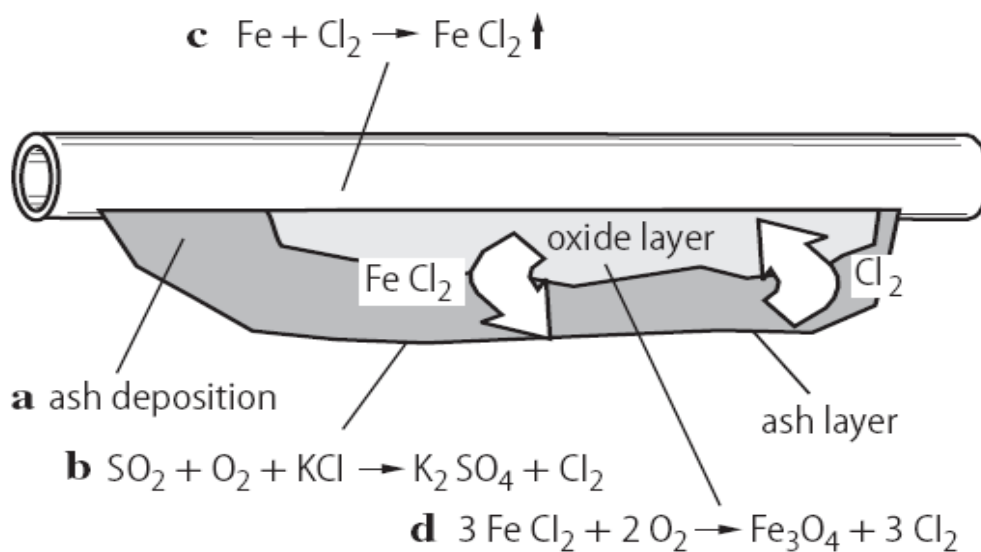


Abbildung 18: Ablauf der Hochtemperaturchlorkorrosion [10]

#### a) Maßnahmen gegen die Hochtemperaturchlorkorrosion

Bei einer Begrenzung der Frischdampf Temperatur unter 450°C kann die Hochtemperaturchlorkorrosion verhindert werden.

Als Sekundärmaßnahme gilt die Verwendung von korrosionsbeständigem Stahl. [12]

Andere Sekundärmaßnahmen stellen verschiedene Schutzschichten dar, wie Schweißplattierungen (Cladding), thermische Spritzschichten, Dickschichtvernickelung oder nanokeramische Schutzschichten. [23]

Als Primärmaßnahme scheint die Zugabe von meist schwefelhaltigen Additiven Erfolg zu erzielen.

Ist nämlich genügend Schwefel im Rauchgas enthalten, werden die Alkalichloride sulfatiert bevor sie sich an den Wärmetauschern anlagern können. [12]

Als Additiv kann dabei Ammoniumsulfat ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) eingesetzt werden, das unter dem Namen „Chlor-out“® (Vattenfall) vertrieben wird.

Das Ammoniumsulfat kann hierzu in wässriger Lösung in den Feuerraum eingespritzt werden.

Auch durch gemahlene Kalk, der dem Brennstoff beigemischt wird und neben Schwefel Chlor bindet, vermutet man einen Rückgang der Korrosionserscheinungen. [23]

Als weitere Gegenmaßnahme gegen Hochtemperaturchlorkorrosion an Überhitzerflächen in zirkulierenden Wirbelschichten können Fließbettkühler, siehe Kapitel 3.2.2a), betrachtet werden. An diesen, in der Wirbelschicht angebrachten Überhitzern, entstehen keine Ascheanpackungen, wodurch chlorhaltige Beläge nicht am Überhitzer haften bleiben können und die Korrosion unterbunden wird. [20]



### 3.5.2 Ascheschmelzverhalten

Die Temperatur der Ascheschmelzung und die Zusammensetzung der Asche sind von Brennstoff zu Brennstoff verschieden.

Für halmgutartige Biomasse, liegt die Schmelztemperatur zwischen 700 und 800°C, während sie für holzartige Biomasse über 1200°C liegt.

Bestandteile der Asche, die die Schmelztemperatur senken, sind vor allem Alkalimetalle, wobei besonders Kalium hervorsticht aber auch Chloride.

Erdalkalimetalle hingegen, wie Calcium oder Magnesium, erhöhen den Ascheschmelzpunkt.

Liegt die Ascheschmelztemperatur unter der Verbrennungstemperatur kann es zu Verschlackungen kommen.

Dieses Problem tritt vor allem bei der Rostfeuerung und der Unterschubfeuerung auf, da sich durch mangelhafte Durchmischung und schlechte Brennstoffverteilung bei diesen Feuerungsarten heiße Zonen im Brennstoffbett ausbilden können.

In diesen so genannten „Hot Spots“, werden Temperaturen über 1000°C erreicht.

Als Folge davon kann es zu Ascheschmelzung kommen, wenn sich die Schlacke wieder verhärtet können Roststäbe zusammenkleben, was im schlimmsten Fall zu einem Stillstand des Rostes und zu teuren Reparaturen führen kann. [11]

Ein weiteres Problem bei der Ascheschmelzung ist, dass es zu Anbackungen auf Wärmetauschern und Kesselwänden kommen kann, die regelmäßig abgereinigt werden müssen.

Zur Verminderung von Verschlackungen ist Rauchgasrezirkulation sinnvoll. Durch das Rückführen von Rauchgas in die Brennkammer wird, durch den geringen Sauerstoffgehalt des Rauchgases, die Verbrennungstemperatur gesenkt und es können hohe lokale Verbrennungstemperaturen vermieden werden. [12]

Aber auch durch wassergekühlte Roste oder Wände, gleichmäßige Brennstoffverteilung und geringe Schichtdicke des Brennstoffbetts, kann die Verschlackungsproblematik beschränkt werden, [8].

### 3.5.3 Agglomeration in Wirbelschichten

In Wirbelschichtfeuerungen, deren Betttemperaturen zwischen 650 bis 900°C liegen und bei denen es zu keinen lokalen Temperaturerhöhungen kommt, kann zwar keine Verschlackung auftreten, jedoch gibt es hier das Problem der Agglomeration.

Aschen mit hohem Alkalianteil, die z.B. bei der Strohverbrennung auftreten, können mit Inertmaterial niedrig schmelzende Verbindungen bilden, so genannte Eutektika.

Dazu neigen vor allem Silikatsand(z.B.:nSiO<sub>2</sub>) und KCl, deren Eutektika bereits bei Temperaturen unter 800°C schmelzen.

Diese aufgeschmolzene Asche legt sich um das Inertmaterial, wodurch es zusammenklebt und große Agglomerate bildet.

Dieser Vorgang kann so weit gehen, dass die Fluidisierung der Wirbelschicht zum Stillstand gebracht wird und eine hohe Austauschrate des Inertmaterials notwendig wird.

Eine wirksame Maßnahme gegen Agglomeration in der Wirbelschicht ist das Verwenden eines Bettmaterials, das keine Eutektika mit der Asche bildet, wie z.B. Olivin, Dolomit, Hämatit oder Korund. [11]

Ein weiteres Mittel um dieses Phänomen zu verhindern ist das Absenken der Betttemperatur auf bis zu 650°C, wobei der Brennstoff im Bett vergast wird und die eigentliche Verbrennung in der Nachbrennkammer erfolgt, [20].

#### **3.5.4 Primärmaßnahmen zur Schadstoffreduktion**

Durch gezielte Maßnahmen bei der Feuerführung können schon während der Verbrennung Schadstoffe wie CO oder NO<sub>x</sub> reduziert werden.

##### **a) Gestufte Verbrennung**

Bei der gestuften Verbrennung erfolgt eine Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft, gegebenenfalls auch noch in Tertiärluft.

In der Primärverbrennungszone findet nun eine Verbrennung unter Luftmangel, mit einer Luftzahl zwischen 0,6 und 0,8, statt.

Dabei wird NO<sub>x</sub> zu N<sub>2</sub> reduziert und es entstehen verstärkt CO und Kohlenwasserstoffe.

In einer weiteren Verbrennungszone herrscht nun Luftüberschuss, mit einer Luftzahl zwischen 1,2 und 1,8, wodurch die Kohlenwasserstoffe und das CO oxidiert werden und ein vollständiger Ausbrand erreicht wird. [12]

Je geringer der gesamte Luftüberschuss gehalten wird, desto niedriger sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen. Um jedoch einen vollständigen Ausbrand zu erreichen und die CO-Emissionen einzuschränken, muss der Luftüberschuss ausreichend hoch sein, siehe Abbildung 19.

Die gestufte Verbrennung ist eine Primärmaßnahme gegen NO<sub>x</sub>-Emissionen. [8]

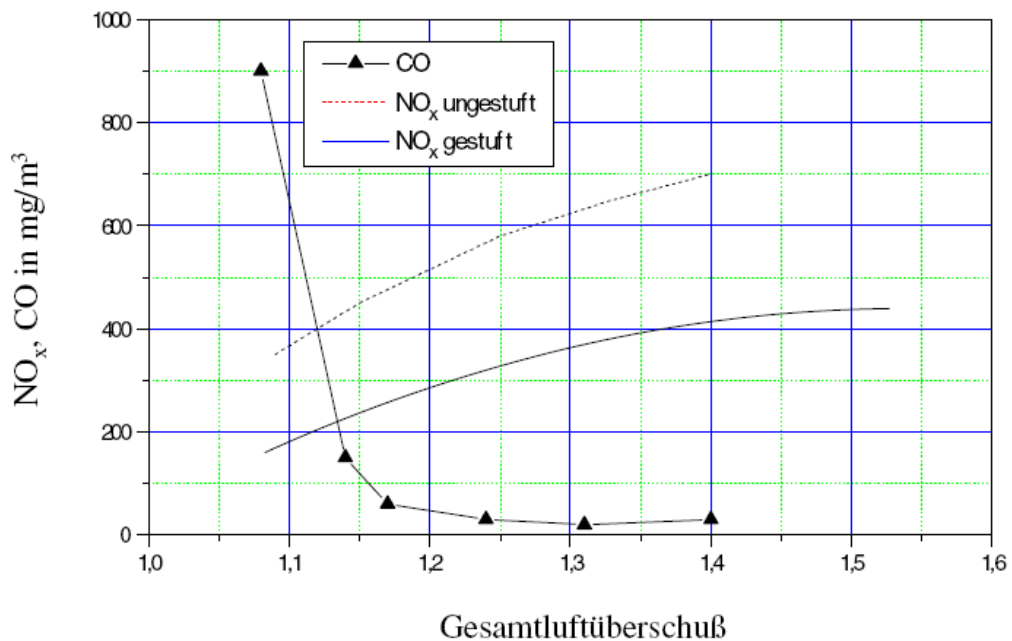


Abbildung 19: Einfluss des Gesamtluftüberschusses auf die NO<sub>x</sub>- und CO- Emissionen [8]

#### b) Rauchgasrezirkulation

Bei der Rauchgasrezirkulation wird ein Teil des Rauchgases wieder zurück in die Brennkammer geführt und so mit der Verbrennungsluft vermischt.

Da das Rauchgas eine geringe Sauerstoffkonzentration aufweist, führt dies zu einem Absenken der Verbrennungstemperatur und verhindert somit die Bildung von thermischen NO<sub>x</sub>. Außerdem führt die Rauchgasrezirkulation, wie bereits erwähnt, zu einer verminderten Aschenschmelzneigung.

Außerdem kommt es durch die Rauchgasrezirkulation zu einer Minderung des Luftüberschusses und somit zu geringeren Abgasverlusten. [9]

### 3.6 Herstellerbefragung

Die typischen Parameter der Technologien konnten durch Literaturrecherchen nur sehr beschränkt bestimmt werden. Der Fragebogen an die Hersteller soll somit zu einer Bestandsaufnahme der Werte der bezeichnenden Parameter der verschiedenen Feuerungstechnologien beitragen.

Dabei wurden 25 Kesselhersteller bzw. Kessellieferanten telefonisch kontaktiert und per Email befragt, wobei 8 den Fragebogen ausfüllten. Da die Kessellieferanten teilweise Kessel mit verschiedenen Feuerungstechnologien liefern wurden insgesamt 11 Fragebögen ausgefüllt retourniert, siehe Abbildung 20.

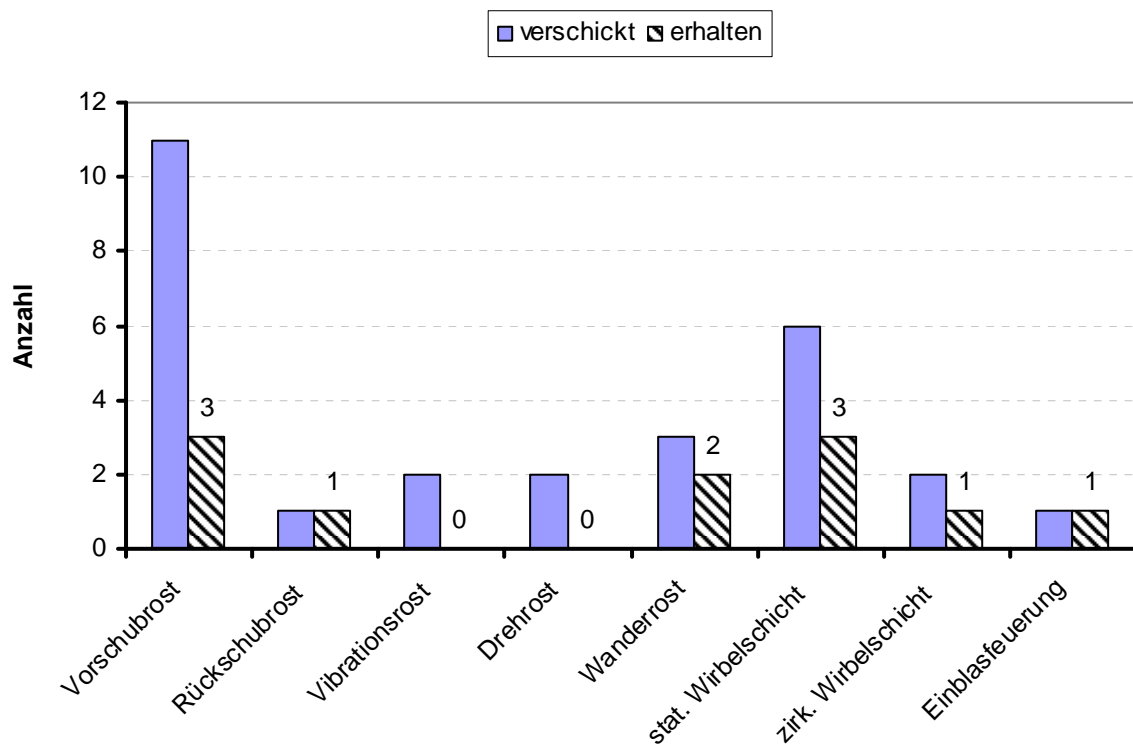


Abbildung 20: Verschickte und erhaltene Herstellerfragebögen pro Technologie

Ausgewählt wurden Hersteller, die in der Datenbank des Projektteams der Energie Steiermark enthalten waren und die über Internetrecherche auffindig gemacht werden konnten.

Als Hauptgründe, nicht an der Befragung teilzunehmen, wurden zu wenig Ressourcen und die Befürchtung zu viel der firmenspezifischen Feuerungstechnologie preiszugeben, genannt.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Befragung dargestellt.

### 3 Übersicht über die Biomassefeuerungstechnologien

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Feuerungstechnologien

	Einheit	Vorschub - rost	Wander- rost	Staubfeuerung	stationäre Wirbel- schicht	zirkulierende Wirbel- schicht
Brennstoffwärmeleistung (Spanne)	MW <sub>BWL</sub>	20 - 80	10 - 160	2 - 50(pro Brenner)	20 - 350	40 - 300
Anteil an Unverbranntem in der Asche	%	2 - 5	3 - 5	<18	1 - 5	1
Kesselwirkungsgrad	%	80 - 89	83 - 92	k.A.	89 - 90	> 90 %
Luftüberschuss (Spanne)		1,4 - 1,7	1,1 - 1,5	1,3 - 1,4	1,2 - 1,3	1,1 - 1,2
Anteil des rezirkulierten Rauchgases zum Rauchgasmassenstroms	%	30	35	20	15	30
Druckverlust- Primärluft	mbar	8 - 25	10 - 40	50 - 70	k.A.	30
Druckverlust- Sekundärluft	mbar	20 - 85	30 - 85	25 - 50	45	-
Temperatur in Brennkammer (Rost) bzw. in Nachbrennkammer (Wirbelschicht)	°C	950 - 1450	1000 - 1500	< 1200	850 - 1300	850 - 950
Wirbelbetttemperatur/Roststabtemperatu r	°C	max. 650	X	k.A.	750 - 850	850
Rostbelastung	MW/m <sup>2</sup>	0,8 - 1	2 - 3	k.A.	k.A.	k.A.
Volumsbelastung	MW/m <sup>3</sup>	k.A.	k.A.	0,25-0,5	90 - 410	k.A.
Querschnittsbelastung	MW/m <sup>2</sup>	k.A.	k.A.	k.A.	2	2,9
Teillast	%	40 - 70	50 - 70	k.A.	30 - 60	40 - 60
Spezifischer Bettmaterialverbrauch	t/(d+BWL[M W])	0	0	0	0,07	k.A.
Kaltstartzeit	h	12 - 48	2 - 48	k.A.	8 - 15	8 - 15
Primärlufttemperaturbereich (Spanne)	°C	20 - 250	20 - 350	25-50	130 - 300	40 - 240
Kantenlänge des Brennstoffs (Spanne)	mm	max. 500- 800	max. 150	0- 3	6 - 50	2- 50
Wassergehalt des Brennstoffs (Spanne)	%	5 - 65	8 - 55	8 - 25	30 - 60	
Frischdampf Temperatur	°C	450 - 480	480 - 540	k.A.	530- 540	560
Frischdampfdruck	bar(a)	66 - 90	90 - 180	k.A.	130 - 150	145
<b>Emissionen ohne Sekundärmaßnahmen</b> [Bezug der Emissionswerte auf 11% Volumenkonzentration Sauerstoff im trockenen Rauchgas]						
Staub	mg/Nm <sup>3</sup>	800 - 3000	1000 - 5000	1000,5- 1334	<6800	k.A.
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	100 - 800	165 - 800	133,4	<200	k.A.
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	10 - 150	50 - 135	66,7	<200	k.A.

### 3.7 Gegenüberstellung der Feuerungstechnologien

In Tabelle 2 erfolgt eine Zusammenfassung der Charakteristika der verschiedenen Biomassefeuerungstechnologien.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Biomassefeuerungstechnologien

	Vorteile	Nachteile
<b>Rostfeuerungen</b>	Geringe Investitionskosten	Höherer Luftüberschuss: $\lambda=1,1-2$ (abhängig von Beschickung und Rost)
	Geringe Betriebskosten	Sekundärmaßnahmen sind zur $\text{NO}_x$ -Reduktion notwendig
	Partikelgröße nur durch Beschickungssystem begrenzt	Holzartige und halmgutartige Biomasse können im Normalfall nicht miteinander verfeuert werden
<b>Stat. Wirbelschicht</b>	Hohe Flexibilität bezüglich Art der Biomasse und Wassergehalt	Partikelgröße auf unter 80 mm beschränkt
	Keine bewegten Teile im Feuerraum	Hohe Betriebskosten
	Geringer Luftüberschuss $\lambda=1,2- 1,3$	Hohe Investitionskosten- interessant ab $20 \text{ MW}_{\text{NWL}}$
	Gestufte Verbrennung kann gut zur $\text{NO}_x$ - Reduktion eingesetzt werden	Hohe Staubbelastung im Rauchgas
		Verlust von Bettmaterial mit der Asche
<b>Zirk. Wirbelschicht</b>	Keine bewegten Teile im Feuerraum	Hohe Investitionskosten- interessant ab $30 \text{ MW}_{\text{NWL}}$
	Hohe Flexibilität bezüglich Art der Biomasse und Wassergehalt	Partikelgröße auf unter 40 mm beschränkt
	Additive können leicht eingesetzt werden	Hohe Betriebskosten
	Gestufte Verbrennung kann gut zur $\text{NO}_x$ - Reduktion eingesetzt werden	Hohe Staubbelastung im Rauchgas
	Sehr geringer Luftüberschuss $\lambda=1,1- 1,2$	Verlust von Bettmaterial mit der Asche
	Sehr homogene Temperaturverteilung und hohe Wärmeübertragungsrate	
<b>Einblasfeuerung</b>	Gute Durchmischung bei Zyklonbrennern	Hohe Erosionsneigung der Ausmauerung bei Zyklonbrennern
	Hohe $\text{NO}_x$ - Reduktion durch effiziente gestufte Verbrennung möglich	Hilfsbrenner wird benötigt
	Hohe Laständerungsgeschwindigkeit	Partikelgröße auf kleiner 20mm beschränkt, Wassergehalt auf 25%

# 4 NUTZWERTANALYSE

Ziel der Nutzwertanalyse ist die Bewertung von verschiedenen Alternativen. Der theoretische Hintergrund der Nutzwertanalyse, sowie die Vorgehensweise zur Nutzwertbestimmung, vor allem für Biomassefeuerungs-systeme, werden in diesem Kapitel erläutert.

## 4.1 Theorie der Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist eine Planungsmethode zur systematischen Entscheidungsvorbereitung zur Auswahl von Projektalternativen, entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers, [20].

Ziel ist es, herauszufinden, wie groß der Wert einer bestimmten Maßnahme oder eines Projekts ist, der so genannte Nutzwert. Der Nutzwert ist ein relativer Wert, der nicht monetär angegeben wird, [21].

Die Nutzwertanalyse zeichnet sich dadurch aus, dass technische sowie ökonomische Aspekte gleichrangig behandelt werden, [22].

### 4.1.1 Module der Nutzwertanalyse [22]

Das **Zielprogramm** stellt die hierarchische Gliederung der Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse dar. Wobei am unteren Ende der Hierarchie die Zielkriterien stehen, die Teilzielen untergeordnet sind. Diese Teilziele können dann wiederum anderen Teilzielen untergeordnet sein.

Die **Gewichtungsmatrix** zeigt die Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien des Zielprogramms.

Der **Lösungskatalog** umfasst die quantitative oder qualitative Beurteilung der Zugriffskriterien für jede Alternative. Für die Zugriffskriterien kann man hierbei aus Recherchen einen Datensatz erhalten, der sich über einen Wertebereich erstreckt. Die Minimal- und Maximalwerte können für die Sensitivitätsanalyse benutzt werden und durch Bildung der jeweiligen Mittelwerte kann der Nutzwert bestimmt werden.

Die **Zuordnungsmatrix** ordnet Punkte des Lösungskatalogs dem Zielprogramm zu.

### 4.1.2 Vorgehensweise bei der Nutzwertanalyse [22]

Um die Nutzwertanalyse durchführen zu können, muss zuerst die **Problemdefinition** festgelegt werden. Daraufhin werden die verschiedenen **Alternativen** zur Problemlösung ausgewählt.

Nach der Auswahl der **Alternativen**  $V_j$  werden die Eigenschaften der Alternativen ermittelt aus denen sich die Bewertungskriterien des Zielprogramms ableiten. Das Zielprogramm wird soweit konkretisiert, dass es in messbaren oder abschätzbaren Indikatoren, den Zielkriterien, endet. Als Grundlage für die Auswahl und Gliederung der Zielkriterien dient der Lösungskatalog.

Nun ist die Bedeutung der Zielkriterien durch **Gewichtungsfaktoren**  $g_i$  einzuschätzen. Dabei wird  $g_i$  zwischen 0 und 1, je nach der entscheidungsträgerspezifischen Wichtigkeit, gewählt. Es werden die Gewichtungen für jedes Bewertungskriterium, auf jeder Hierarchiestufe, erfasst. Die Quersumme der Gewichtungen bezüglich des nächst höheren Ziels muss stets 1 betragen. Der Gewichtungsfaktor der Zielkriterien ergibt sich dabei durch die Multiplikation der Stufengewichtungen, also der Gewichtungen von allen übergeordneten Teilzielen, sowie der Gewichtung des Zielkriteriums.

In einem nächsten Schritt wird durch den **Zielertrag**  $e_{ij}$  beurteilt in welchem Ausmaß die Bewertungskriterien durch die Varianten erfüllt werden. Die Grundlage für die Ermittlung des Zielertrags stellt der Lösungskatalog dar. Der Zielertrag kann entweder durch die **ordinale Methode** bestimmt werden, hierbei erfolgt eine Reihung nach dem Erfüllungsgrad des Zielkriteriums für jede Alternative, oder durch die kardinale Methode. Bei der ordinalen Methode wird der besten Alternative der Zielertrag 1 zugewiesen, der zweitbesten der Zielertrag 2 bis zur schlechtesten Alternative. Eine aufwendigere Methode stellt die **kardinale Methode** dar, bei der die Bewertung durch Zahlen zwischen 0 und 10 erfolgt. Wobei 10 für die bestmögliche Bewertung und 0 für die schlechteste Bewertung steht. Es kann eine theoretische Bestlösung, der der Zielertrag 10 zugeordnet wird, und eine theoretische Minimallösung, der der Zielertrag 0 zugeordnet wird, ermittelt werden. Somit können die Zielerträge für jede Alternative beispielsweise mit einer linearen Funktion, der so genannten **Nutzenfunktion**, interpoliert werden. Vorteil der kardinalen Methode ist, dass eine genauere Bestimmung des Nutzwerts erfolgt und bei hinzufügen einer neuen Alternative zur Nutzwertanalyse, die Nutzwerte der anderen Alternativen nicht neu berechnet werden müssen.

Beim **verkürzten Verfahren** entsprechen die Zugriffskriterien des Lösungskatalogs den Zielkriterien.

Die Ermittlung des **Gesamtnutzungsgrad**, also des Nutzwertes  $N_j$ , erfolgt nun durch das Aufsummieren der Zielwerte  $n_{ij}$ , die sich wiederum durch Multiplikation der Gewichtung  $g_i$  mit dem Zielertrag  $e_{ij}$  ergeben, siehe Formel (8).

$$N_j = \sum_{i=1}^m g_i \times e_{ij} \quad (8)$$

Als spezifischer Nutzwert wird in Folge der Quotient des Nutzwerts zum theoretisch maximalen Nutzwert bezeichnet. Der spezifische Nutzwert eines Teilziels ergibt sich dabei als Quotient des Nutzwerts des Teilziels zum theoretisch maximal möglichen Nutzwert des Teilziels.



## 4.2 Nutzwertanalyse der Angebote

Zur Bewertung der Angebote für Biomassefeuerungs-systeme wurde eine Nutzwertanalyse mit verkürzter Methode angewandt.

Die Zugriffskriterien wurden aus Angaben von Herstellern bzw. Lieferanten von Biomassefeuerungs-systemen ermittelt.

### 4.2.1 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen für die Betrachtung des Biomassefeuerungs-systems sind dem Lieferumfang der vorliegenden Angebote angepasst und in Rücksprache mit Mitarbeitern der Energie Steiermark AG angeglichen worden. Sie werden in Tabelle 3 kurz umrissen.

*Tabelle 3: Systemgrenzen des in der Nutzwertanalyse betrachteten Biomassefeuerungs-systems*

	<b>Systemgrenzen</b>
Brennstoff und Asche	Einlass Brennstoffbeschickung
	Austritt Aschesilo
Wasser/Dampfsystem	Eintritt ECO
	Austritt Überhitzer
Luft- und Rauchgassystem	Gebälseeintritt
	Saugzugaustritt

### 4.2.2 Zugriffskriterien und Zielsystem

Die Zugriffskriterien wurden hierbei aus den Angeboten für Biomassefeuerungs-systeme von verschiedenen Herstellern bzw. Lieferanten ermittelt. Bei Kriterien, die nicht aus den Angeboten erheben werden konnten, wurden die Hersteller nochmals kontaktiert und befragt. Für die Zugriffskriterien, für die die Hersteller keinen Wert bekannt gaben, wurde der theoretische Minimalwert angenommen.

Die Erstellung des Zielsystems, siehe Abbildung 21, erfolgte in Rücksprache mit Mitarbeitern der Energie Steiermark AG. Es werden nun sowohl die Zielkriterien als auch und das gesamte Zielsystem erläutert.

Das Zielsystem der Nutzwertanalyse, siehe Kapitel 4.1.1, spaltet sich in die Teilziele der Wirtschaftlichkeit und Technik auf.

## 4 Nutzwertanalyse

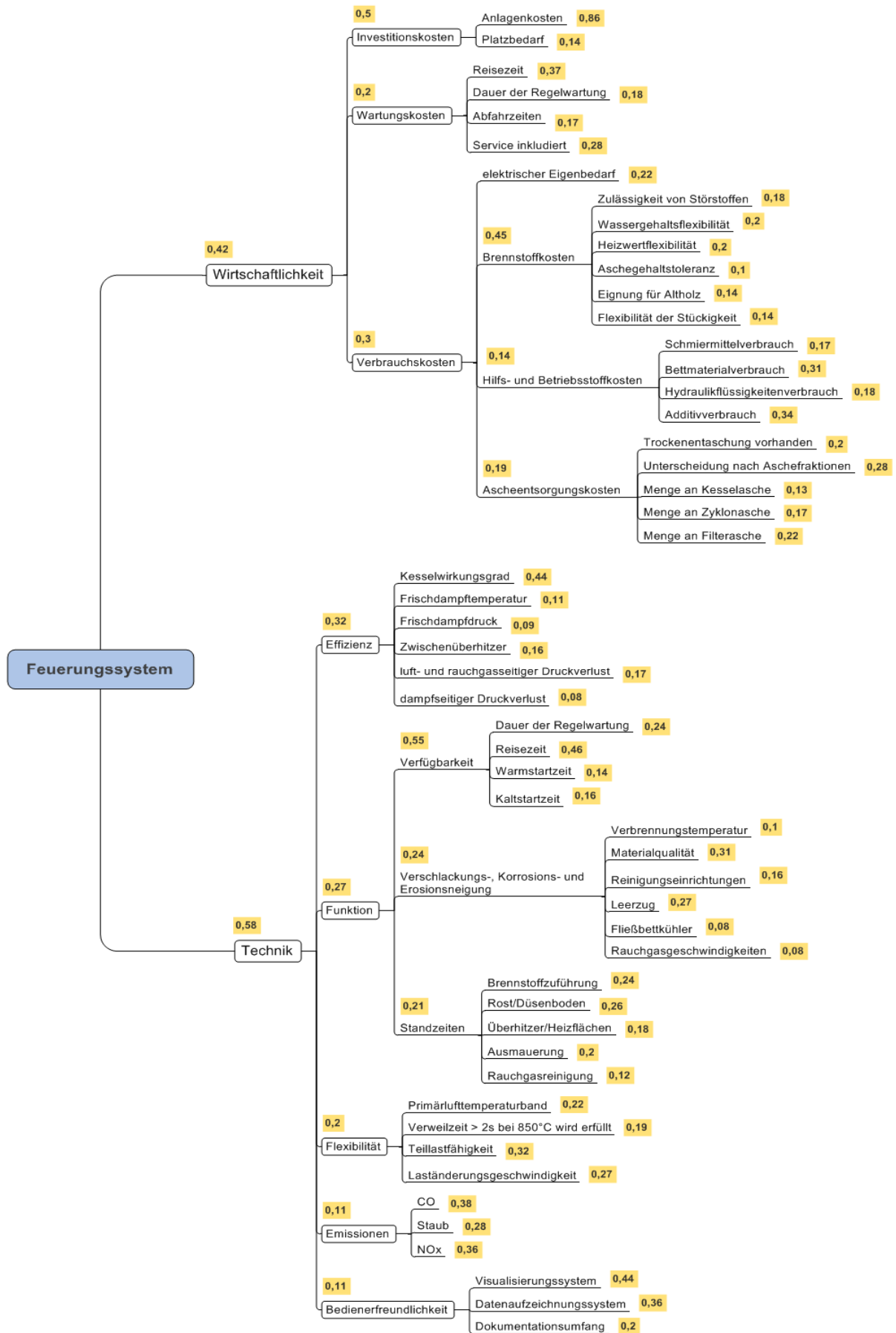


Abbildung 21: Zielsystem der Nutzwertanalyse der Angebote für Biomassefeuerungs-systeme- die Zahlen entsprechen den Stufengewichtungen des jeweiligen Bewertungskriteriums

### a) Teilziel der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wird wiederum durch die Teilziele Investitions-, Wartungs-, und Verbrauchskosten bestimmt.

Die Investitionskosten spalten sich hierbei in die Teilziele Anlagenkosten und Platzbedarf auf. Die Anlagenkosten in Euro pro MW<sub>BWL</sub> beschreiben die Kosten der Biomassefeuerungsanlage inklusive Kessel und Rauchgasreinigung sowie Transport, Montage und Inbetriebnahme.

Wenn eines der Elemente bzw. Dienstleistungen nicht im Lieferumfang enthalten war, wurden die Kosten, wenn möglich, aus einem Angebot übernommen, in dem sie für das geforderte Element bzw. die Dienstleistung spezifisch ausgepreist waren. Die Kosten der Entstaubung mittels Gewebefilter wurden so aus dem Angebot 1 für Angebot 2 und Angebot 3 übernommen. Die Kosten für die Inbetriebnahme werden von Angebot 7 für Angebot 4 übernommen, in dem diese Kosten nicht im Lieferumfang enthalten sind. Die Transportkosten, frei Baustelle, wurden falls Sie nicht im Lieferumfang enthalten waren, über das Liefergewicht der Anlage und telefonische Nachfrage bei der Firma Panalpina bestimmt.

Der Platzbedarf gibt die spezifische Grundfläche des Kesselhauses pro MW Brennstoffwärmeleistung an.

Die Wartungskosten gliedern sich in die folgenden Teilziele auf: die Reisezeit, die Dauer der Regelwartung, die Abfahrzeit und das Service. Die Reisezeit wird in Volllaststunden angegeben und gibt die ununterbrochene Betriebszeit einer Anlage zwischen 2 Stillständen an, die für die notwendige Instandsetzung, also Regelwartung, erforderlich ist. Die Dauer der Regelwartung gibt in Arbeitsstunden die zeitliche Dauer der Regelwartung an. Die Abfahrzeit gibt an, wie lange es dauert bis eine Anlage von Volllast auf Stillstand heruntergefahren werden kann. Das Teilziel des Service beinhaltet, ob die Regelwartung inkludiert ist.

Die Verbrauchskosten werden bestimmt durch den elektrischen Eigenbedarf, den Betriebseigenverbrauch der Anlage, den Brennstoffkosten, den Hilfs- und Betriebsstoffkosten und den Ascheentsorgungskosten.

Zu den Brennstoffkosten zählen die nun aufgezählten Zielkriterien. Die Zulässigkeit von Störstoffen im Brennstoff, die beschreibt, welchen maximalen Anteil des Brennstoffes Störstoffe, wie z.B. Steine, ausmachen dürfen. Die Wassergehaltsflexibilität gibt an wie groß der Wassergehalt des Brennstoffs sein darf. Weitere auf die Brennstoffkosten bezogene Kriterien sind die Aschegehaltsakzeptanz, sowie die Flexibilität der Stückigkeit des Brennstoffs, die durch die mögliche Bandbreite der Stückigkeit bestimmt wird, des und die Eignung für Altholz der Anlage.

Die Hilfs- und Betriebsstoffkosten werden in Schmiermittel-, Hydraulikflüssigkeiten-, Bettmaterial- und Additivverbrauch aufgeschlüsselt. Der Zugriffsertrag für den Additivverbrauch wird hierbei aus den Kosten, für die pro Stunde und pro  $MW_{BWL}$ , für die Entstickung benötigten Additive berechnet. Die Kosten betragen für Harnstoff 120-130 €/t und für eine 25 prozentige Ammoniak-Wasserlösung ungefähr 110 €/t, [29].

Die Ascheentsorgungskosten sind neben dem Mengenanfall der Kessel-, Zyklon- und Filterasche davon abhängig ob nach allen der drei gerade genannten Aschefractionen unterschieden wird. Wenn keine getrennte Abscheidung und keine getrennten Aschesilos für Zyklon- und Filterasche vorgesehen sind wurde angenommen, dass die Entsorgungskosten dieser Mischaschefraktion denen der Filterasche entsprechen.

### **b) Teilziel der Technik**

Das Teilziel der Technik spaltet sich in folgende untergeordneten Teilziele auf: Effizienz, Funktion, Verfügbarkeit, Verschlackungs-, Korrosions- und Erosionsneigung, Standzeiten, Flexibilität, Emissionen und Bedienerfreundlichkeit.

Zur Ermittlung der Effizienz des Feuerungssystems wird der Kesselwirkungsgrad, die Frischdampf Temperatur und der Frischdampfdruck, sowie Druckverluste, sowohl rauchgasseitig und luftseitig, als auch dampfseitig herangezogen.

Das Teilziel der Funktion spaltet sich in Arbeitsverfügbarkeit, Verschlackungs-, Korrosions- und Erosionsneigung sowie Standzeiten auf.

Zur Einschätzung der Verfügbarkeit des Biomassefeuerungssystems, also der Funktionsfähigkeit während eines Betrachtungszeitraums, wurde die Arbeitsverfügbarkeit als entscheidender Faktor gewählt. Die Arbeitsverfügbarkeit ist ein Maß für die Arbeit, die eine Anlage innerhalb eines gewissen Betrachtungszeitraums erbringen kann und berücksichtigt alle Leistungsminderungen und Stillstände, [1]. Somit wurden dem Teilziel der Verfügbarkeit die folgenden Bewertungskriterien untergeordnet: die Dauer der Warmstart- und Kaltstartzeit, sowie die Dauer der Regelwartung und die Reisezeit.

Die Warmstartzeit ist als die Zeitspanne zwischen Herstellung der Zündbereitschaft und Erreichen der Nennparameter, wobei die Temperatur der Bauteile dem 0,2 bis 0,8 fachen der Nenntemperatur entspricht, definiert. Die Kaltstartzeit ist hingegen die Zeitspanne zwischen Herstellung der Zündbereitschaft und Erreichen der Nennparameter wohingegen die Bauteile Umgebungstemperatur aufweisen. [1].

Die Verschlackungs-, Korrosions- und Erosionsneigung wird durch die nun folgenden Zielkriterien bestimmt. Die adiabate Verbrennungstemperatur, die bei der Verschlackungsneigung eine Rolle spielt, ist in diesem Zusammenhang ein Zielkriterium. Die Materialqualität wurde als weiteres Zielkriterium festgelegt, wobei für die Nutzwertanalyse keine ausreichende Bewertung der Materialien erfolgen konnte und somit allen Angeboten für das Zielkriterium der Materialqualität ein Zielertrag von 5 zugeordnet wurde.

Die Anzahl und Art der vorhandenen Reinigungseinrichtungen zum Entfernen der Verschlackungen bzw. Verschmutzungen und die Größe der maximalen Rauchgasgeschwindigkeit, die die Erosionsneigung beeinflusst, sind weitere Zielkriterien. Das Vorhandensein eines Leerzugs, was bedeutet, dass der zweite Zug des Kessels frei von Einbauten ist, wodurch die Rauchgastemperatur abkühlt bevor das Rauchgas auf den Überhitzer trifft, senkt die Korrosionsneigung. Selbiges gilt für das Zielkriterium des Vorhandenseins eines Fließbettkühlers, (siehe 3.5.1a), was nur für zirkulierende Wirbelschichten erfüllt sein kann.

Die Standzeiten, also die Zeitspanne auf die ein Element ausgelegt ist, bzw. nach der es im Regelfall ausgetauscht werden muss, wurde für folgende Element bewertet: der Brennstoffzuführung, des Rostes bzw. des Düsenbodens, der Überhitzer bzw. der Heizflächen; der Ausmauerung und der Rauchgasreinigung.

Das Teilziel der Flexibilität wird durch mehrere Zielkriterien festgelegt. Durch die maximale Größe des Primärlufttemperaturbandes, bei der die Kühlung des Rostes noch gewährleistet ist. Aber auch durch gute Teillastfähigkeit, wobei in die Bewertung, zu gleichen Teilen, der untere Regelbereich, also die minimal mögliche Teillast auf die automatisch hinuntergeregelt werden kann, und die Teillastfähigkeit bei Einbehaltung der Frischdampf Temperatur auf die die Anlage ausgelegt worden ist, einfließt. Die Teillastfähigkeit wird dabei in Prozent der Nennlast angegeben. Außerdem wird die für Feuerung von Altholz gesetzlich notwendige Verweilzeit des Rauchgases, die mehr als zwei Sekunden bei mindestens 850°C betragen muss, als ein Bewertungskriterium für die Flexibilität angenommen. Ein weiteres Bewertungskriterium dieses Teilziels ist die Laständerungsgeschwindigkeit, die in Prozent Last pro Minute angibt, um wie viel Prozent die Nennlast pro Minute heruntergeregelt werden kann.

Die Emissionen der Feuerungsanlage fließen als weiteres Teilziel in die Nutzwertanalyse ein und werden für CO, Staub und NO<sub>x</sub> getrennt erfasst.

Dem Teilziel der Bedienerfreundlichkeit sind noch die Zielkriterien des Vorhandenseins eines Visualisierungssystems, eines Datenaufzeichnungssystems und eines großen Dokumentationsumfangs, also dem Umfang des Bedienerhandbuchs, untergeordnet.

### 4.2.3 Ermittlung des Zielertrags

Der Zielertrag der Teilziele errechnet sich mittels der Nutzenfunktion aus dem Zielwert.

Als Nutzenfunktion wurde eine lineare Funktion angenommen, deren Minimum bei 0 und deren Maximum bei 10 liegt. Für den theoretisch besten Zielwert liefert die Nutzenfunktion den Wert von 10 und dem theoretisch schlechtesten Zielwert ordnet die Nutzenfunktion einen Zielertrag von 0 zu.

Linear steigende Nutzenfunktion:

$$e_i = (x - x_u) \frac{(e_{i,o} - e_{i,u})}{(x_o - x_u)} \dots\dots\dots (9)$$

Linear fallende Nutzenfunktion:

$$e_i = x_o - (x - x_u) \frac{(e_{i,o} - e_{i,u})}{(x_o - x_u)} \dots\dots\dots (10)$$

- e<sub>i</sub>.....Zielertrag
- e<sub>i,o</sub>=10...maximaler Zielertrag
- e<sub>i,u</sub>=0.....minimaler Zielertrag
- x.....Zielwert
- x<sub>u</sub>.....theoretisch schlechtester Zielwert
- x<sub>o</sub>.....theoretisch bester Zielwert

Steigt der Zielerfüllungsgrad mit höherem Zielwert, wird eine linear steigende Nutzenfunktion gewählt, siehe Formel (9). Für diesen Fall liegt der theoretisch beste Zielwert eines Zielkriteriums 10% über dem besten, also dem maximalen, Zielwert der betrachteten Angebote, während der theoretisch schlechteste Zielwert 10% unter dem schlechtesten, also dem minimalen, Zielwert der Angebote liegt.

Bei Zielerfüllungsgrad mit steigendem Zielwert kleiner wird, so wird die linear fallende Nutzenfunktion gewählt, siehe Formel (4). In diesem Fall liegt der theoretisch beste Wert 10% unter dem besten, also dem minimalen, Wert der Angebote und der theoretisch schlechteste Wert 10% über dem schlechtesten, also dem maximalen, Wert der Angebote.

Zielkriterien, für die keine Angaben aus den Angeboten vorlagen und für die die Hersteller bzw. Lieferanten auch nach Nachfrage keine weiteren Angaben zur Verfügung stellten, wurden als nicht erfüllt angenommen. Ihnen wurde also ein Zielertrag von 0 zugewiesen.

### 4.2.4 Gewichtung

Zur Gewichtung,  $g$ , jedes Bewertungskriteriums, also jedes Teilziels und Zielkriteriums, wurden 6 Experten befragt. Ziel der Gewichtung ist es die relative Bedeutung der Zielkriterien einzuschätzen.

Die Gewichtung jedes Bewertungskriteriums erfolgt dabei mittels Zuordnung eines Gewichtungsfaktors zwischen 0 und 1, wobei 0 für überhaupt nicht bedeutend für das Bewertungskriterium steht und 1 für maximale Bedeutung für das Bewertungskriterium steht.

Die Gewichtung erfolgt hierbei stufenweise für jedes Teilziel. Dabei ist zu beachten, dass die Quersumme der Gewichtungsfaktoren stets 1 betragen muss.

Der Mittelwert der Befragung wurde für die Gewichtung in der Nutzwertanalyse übernommen.

Der Gewichtungsfaktor eines Zielkriteriums ergibt sich dabei als das Produkt der Stufengewichtung des Zielkriteriums mit den Stufengewichtungen aller übergeordneten Teilziele.

Die Stufengewichtungen jedes Bewertungskriteriums sind im Zielsystem, in Abbildung 21, zu sehen.

### 4.2.5 Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen beeinflussen die Gewichtungen der Zielkriterien und sollten daher wie bereits erwähnt für jedes neue Projekt neu bestimmt werden. Die Rahmenbedingungen für das untersuchte Projekt, mit denen von ihnen beeinflussten Bewertungskriterien, werden in folgender Tabelle, Tabelle 4, kurz umrissen.

Tabelle 4: Beeinflussung der Rahmenbedingung auf die Gewichtung der Bewertungskriterien

Rahmenbedingungen	beeinflusste Bewertungskriterien
Bau auf nicht aufgeschlossenem Gebiet	Platzbedarf
Stromeinspeisung nach Ökostromgesetz Eigenbedarf wird von Produktion abgezogen	elektrischer Eigenbedarf
Brennstoffzusammensetzung: 30% Rundholz, 30% Hackschnitzel, 5% Walhackgut, 15% Rinde, 10% unbelastete Industrieresthölzer [Altholz derzeit nicht vorgesehen]	Eignung für Altholz
unterer Heizwert: 9,8-16 MJ/kg bzw. 5,8-11,9 MJ/kg	Heizwertflexibilität
Wassergehalt: 30- 60% bzw. 8-40%	Wassergehaltsflexibilität
Stückigkeit: G 50 bzw. G 100	Flexibilität der Stückigkeit
Aufbringung von Kesselasche und Deponierung von Flugasche geplant	Aschentsorgungskosten
Zielsetzung: höchstmögliche Brennstoffausnutzung	Effizienz
Geplanter Einsatz >8000h	Verfügbarkeit
geplant: durchgängiger Betrieb der Anlage	Startzeiten
erwarteter Lastbereich: 70- 100%	Teillastfähigkeit
Kraftwerksstandort in Sanierungsgebiet nach § 2 Abs. 8 IG-L	Emissionen



### **4.3 Nutzwertanalyse der Biomassefeuerungstechnologien**

Der Nutzwert der Biomassefeuerungstechnologien wurde aus den Daten der Angebote von Lieferanten bzw. Herstellern von Biomassefeuerungsanlagen erstellt. Hierbei wurde für jede Feuerungstechnologie, für die mindestens ein Angebot vorlag, also Vorschubrostfeuerung, Wanderrostfeuerung und Feuerung in der stationären Wirbelschicht, der Nutzwert mittels Mittelwertbildung aus den Nutzwerten der Angebote einer Feuerungstechnologie ermittelt.

Der Zielertrag wurde jedoch, im Unterschied zur Nutzwertanalyse der Angebote, siehe Kapitel 4.2, für die die Zielkriterien für die keine Zielwerte ermittelt werden konnten, als nicht erfüllt angenommen wurden, auf die nun folgende Weise bestimmt. Der Zielwert eines Zielkriteriums wird für die Bewertung der Biomassefeuerungstechnologien, falls keine Daten zu seiner Bestimmung vorhanden sind, aus dem Mittelwert der Zielwerte des Zielkriteriums aus den Angeboten mit derselben Feuerungstechnologie gewonnen. Daraufhin wird aus diesem Zielwert mittels Nutzenfunktion der Zielertrag berechnet.

### **4.4 Betreibernutzwertanalyse und Betreiberfragebogen**

Um neben den Angaben von Herstellern auch einen Bezug zum Verhalten der Biomassefeuerungstechnologien in der Praxis zu bekommen, wurden Kraftwerksbetreiber von ausgewählten Anlagen mittels eines Fragebogens, siehe Anhang, nach Ihren Erfahrungen befragt.

Die Anlagen wurden dabei aus den Referenzlisten der ermittelten Anlagenhersteller ausgewählt. Es wurde versucht für jeden Anlagenhersteller zumindest einen Referenzanlage auszuwählen. Wenn möglich mehrere, die in verschiedenen Jahren in Betrieb gingen.

Außerdem wurden Anlagen, deren Brennstoff Waldholz darstellt, und die höhere Dampfparameter aufweisen, bevorzugt ausgewählt.

#### **4.4.1 Fragebogen über die Betriebserfahrungen**

Zur Kontaktaufnahme wurden die Betreiber zunächst telefonisch kontaktiert und nach einem klärenden Gespräch wurde Ihnen ein Fragebogen per Mail zugesandt.

Der Fragebogen über die Betriebserfahrungen teilt sich in folgende Themengebiete ein: allgemeine Spezifikationen, technische Aspekte, Wirtschaftlichkeit und Zufriedenheit mit Herstellern- bzw. Lieferanten.

Die allgemeinen Spezifikationen umfassen die wichtigsten Parameter des Kraftwerks.

Die technischen Aspekte umfassen die Standzeiten einiger Elemente, die Frage nach kritischen Elementen und Schadensfällen, Brennstoff, Brennstoffförderung, Brennstoffaufgabe und Asche bzw. Entaschungseinrichtung.

Für die Wirtschaftlichkeit wurden neben Investitions- und Betriebskosten, die Personalstärke und die Volllaststunden pro Jahr erfragt.

Außerdem wurde nach Zufriedenheit mit dem Hersteller bzw. Lieferanten der Feuerungsanlage in den verschiedenen Projektphasen, wie Projektierung/Vorphase, Fertigung/Lieferung, Inbetriebnahme und Betrieb/Wartung/Instandhaltung, gefragt.

#### **4.4.2 Erstellung der Betreibernutzwertanalyse**

Mit den Daten, die durch die Fragebögen über die Betriebserfahrungen erhalten wurden, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Das Zielprogramm ist in Abbildung 22 ersichtlich. Der Zielertrag wurde analog des Zielertrags der Nutzwertanalyse der Angebote, siehe Kapitel 4.2, ermittelt mit der Ausnahme, dass bei nicht vollständigen Daten der Mittelwert aus Anlagen mit derselben Feuerungstechnologie gewählt wurde.

Die Gewichtung der Bewertungskriterien erfolgte analog zu der Vorgehensweise für die Nutzwertanalyse der Angebote, siehe Kapitel 4.2.4. Die Stufengewichtungen der Bewertungskriterien sind in Abbildung 22 ersichtlich.

## 4 Nutzwertanalyse

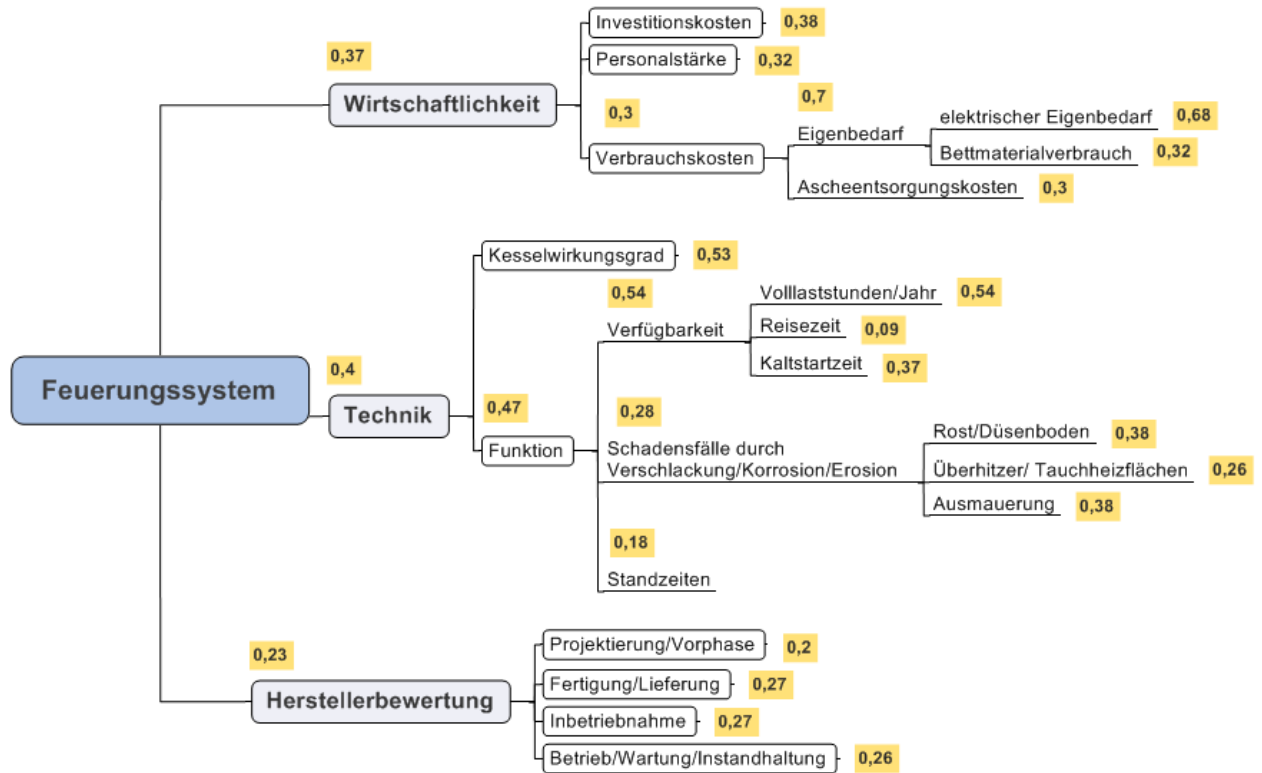


Abbildung 22: Zielsystem der Betreibernutzwertanalyse, wobei die Zahlen den Stufengewichtungen der Bewertungskriterien entsprechen

## 5 ERGEBNISSE

In Folge werden die Ergebnisse der Arbeit dargestellt.

### 5.1 Ergebnisse der Nutzwertanalyse der Angebote

Für die verschiedenen Angebote der Hersteller bzw. Lieferanten von Biomassefeuerungsanlagen wurden die Nutzwerte berechnet, die in folgender Abbildung, Abbildung 23, abgebildet sind.

Der theoretisch maximal erreichbare Nutzwert hat den Wert von 10. Er wird jedoch nicht erreicht, da zur maximalen Erfüllung eines Teilziels ein theoretisch idealer Zielwert angenommen wurde, der in den meisten Fällen 10% besser als der beste Zielwert ist. Außerdem variieren die Zielwerte der Angebote für verschiedene Bewertungskriterien stark, weshalb kein Angebot in allen Bewertungskriterien gut abschneidet. Als Folge dessen liegt der maximale Nutzwert von Angebot 10 bei nur 5,72.

Die Angebote 1 und 2 sind diejenigen, über die am wenigsten Informationen vorlagen. Durch die vorgenommene Ermittlung des Zielertrags, siehe Kapitel 4.2.3, steigt der Nutzwert mit größerer Vollständigkeit der Angaben zu den Zielkriterien. Daher sind Angebot 1 und 2 auch diejenigen mit dem geringsten Nutzwert.

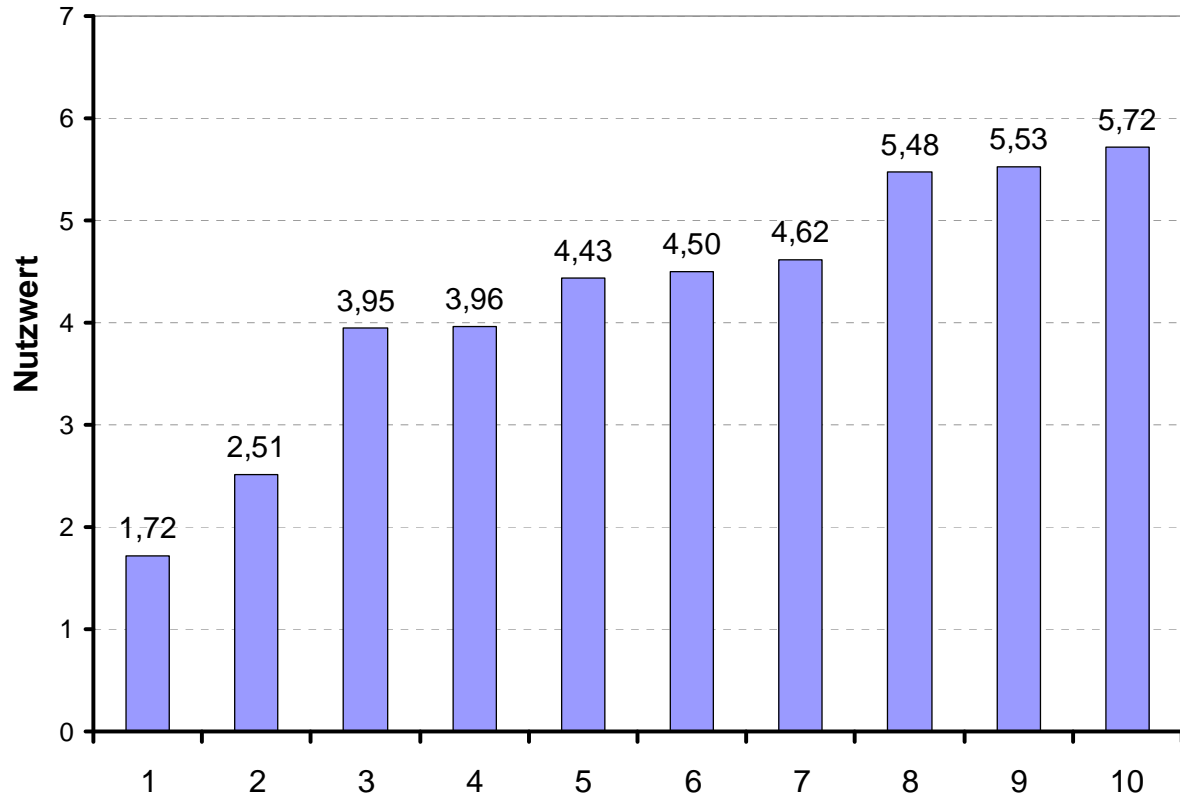


Abbildung 23: Nutzwerte der Angebote für das Biomassefeuerungsanlage

Um die Angebote besser beurteilen zu können, werden die Nutzwerte der Teilziele der Angebote einer näheren Betrachtung unterzogen.

### 5.1.1 Darstellung der Nutzwerte der Teilziele

In Tabelle 5 sind die Nutzwerte der Angebote der Teilziele zu sehen.

Tabelle 5: Darstellung der Nutzwerte der Teilziele der Angebote

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Gesamtnutzwert</b>	1,7	2,5	4,0	4,0	4,4	4,5	4,6	5,5	5,5	5,7
<b>Wirtschaftlichkeitsnutzwert</b>	1,0	1,3	1,5	2,3	1,5	2,0	1,5	2,1	2,5	2,3
<b>technischer Nutzwert</b>	0,7	1,2	2,5	1,7	2,9	2,5	3,1	3,4	3,1	3,4
<b>Investitionskosten</b>	0,5	0,9	0,7	1,9	0,5	1,0	0,7	1,1	1,6	1,2
<b>Wartungskosten</b>	0,3	0,3	0,4	0,0	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4
<b>Verbrauchskosten</b>	0,2	0,1	0,4	0,4	0,8	0,7	0,4	0,6	0,5	0,6
<b>Effizienz</b>	0,3	0,6	0,7	0,6	0,7	1,1	1,0	0,7	1,0	1,0
<b>Funktion</b>	0,3	0,6	0,8	0,1	0,6	0,5	1,0	0,9	0,7	0,8
<b>Flexibilität</b>	0,2	0,0	0,5	0,6	0,6	0,4	0,7	0,9	0,5	0,5
<b>Emissionen</b>	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,4	0,4	0,5	0,6
<b>Bedienerfreundlichkeit</b>	0,0	0,0	0,3	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,4	0,5

Um zu sehen, inwieweit ein Teilziel erfüllt wurde, sind die spezifischen Nutzwerte der Teilziele von Vorteil, die in Tabelle 6 abgebildet sind.

Tabelle 6: Spezifische Nutzwerte der Teilziele der Angebote

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Gesamtnutzwert</b>	17,2%	25,1%	39,5%	39,6%	44,3%	45,0%	46,2%	54,8%	55,3%	57,2%
<b>Wirtschaftlichkeitsnutzwert</b>	23,6%	30,4%	35,1%	55,1%	37,1%	47,2%	37,1%	50,2%	59,1%	54,9%
<b>technischer Nutzwert</b>	12,6%	21,2%	42,6%	28,5%	49,5%	43,5%	52,7%	58,0%	52,6%	58,9%
<b>Investitionskosten</b>	23,7%	46,4%	34,6%	94,1%	23,9%	49,1%	36,9%	53,3%	78,9%	61,5%
<b>Wartungskosten</b>	36,7%	28,1%	47,5%	0,0%	31,9%	28,1%	41,7%	51,8%	46,3%	47,6%
<b>Verbrauchskosten</b>	14,1%	7,6%	27,3%	33,6%	61,2%	57,6%	34,1%	44,4%	37,6%	49,9%
<b>Effizienz</b>	13,5%	33,4%	38,7%	34,0%	37,0%	60,4%	51,5%	39,2%	55,2%	56,0%
<b>Funktion</b>	16,9%	40,0%	50,9%	3,7%	37,5%	29,9%	67,5%	56,4%	46,1%	49,6%
<b>Flexibilität</b>	19,0%	0,0%	43,4%	47,4%	48,6%	33,7%	59,2%	75,4%	40,4%	44,8%
<b>Emissionen</b>	0,0%	0,0%	30,8%	66,9%	86,2%	89,5%	60,5%	62,7%	74,1%	95,1%
<b>Bedienerfreundlichkeit</b>	0,0%	0,0%	44,0%	0,0%	80,0%	0,0%	0,0%	80,0%	62,0%	80,0%

## 5 Ergebnisse

Im folgenden Diagramm, Abbildung 24, werden die spezifischen Nutzwerte der Wirtschaftlichkeit und Technik der Angebote gegenübergestellt. Angebot 4 sticht mit dem zweitgrößten Nutzwert der Wirtschaftlichkeit hervor, da es durch geringe Gesamtanlagenkosten den größten Nutzwert der Investitionskosten aufweist, siehe Abbildung 25. Die größten Nutzwerte der Technik sind unter den 4 Angeboten mit dem höchsten Gesamtnutzwert.

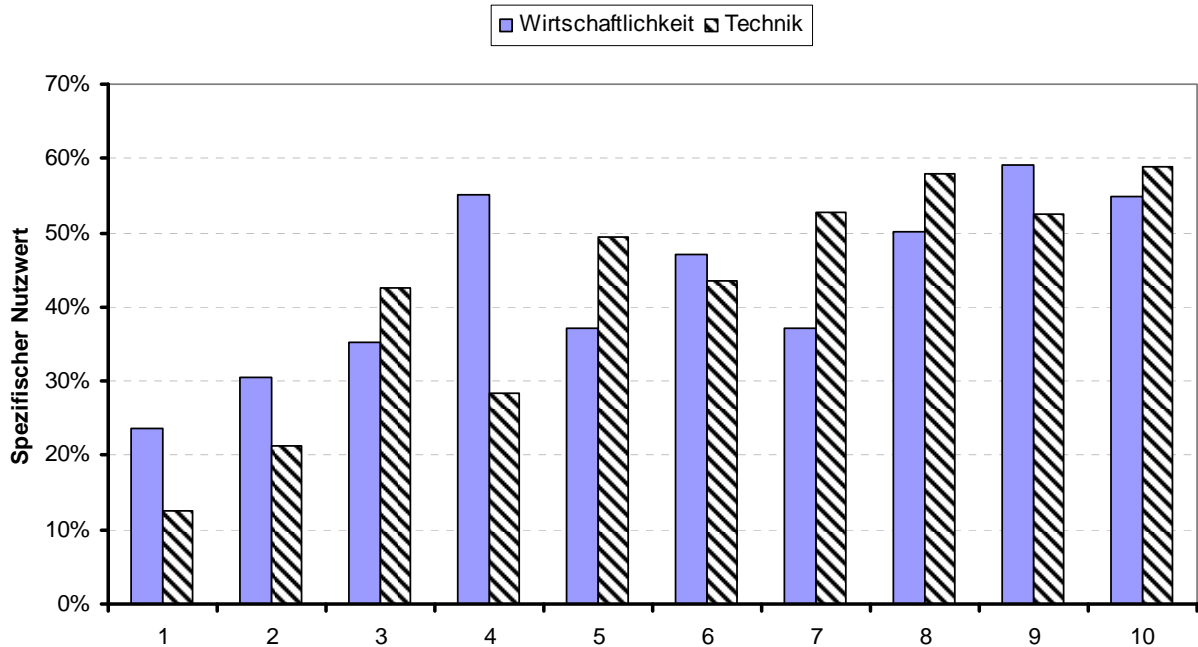


Abbildung 24: Spezifische Nutzwerte der Wirtschaftlichkeit und der Technik der Angebote

In Abbildung 25 sind die Nutzwerte der Teilziele dargestellt, die direkt der Wirtschaftlichkeit untergeordnet sind, also die Investitionskosten, sowie die Wartungs- und Verbrauchskosten.

Der Nutzwert der Wartungskosten des Angebots 4 ist 0, da zu diesem Teilziel keine Angaben vonseiten der Lieferanten erhältlich waren, was stark den Nutzwert der Wirtschaftlichkeit von Angebot 4 beeinflusst. Angebot 7 bis 10 weisen als weitere Angebote einen hohen Nutzwert der Investitionskosten auf.

Angebot 5 und 6 stechen durch die höchsten Nutzwerte in dem Teilziel der Verbrauchskosten heraus. Angebot 5 profitiert von den geringen Ascheentsorgungskosten und seinen geringen Hilfs- und Betriebsstoffkosten, wie in Abbildung 26 ersichtlich, in der die den Verbrauchskosten untergeordneten Teilziele der Brennstoffkosten, Hilfs- und Betriebsstoffkosten und Ascheentsorgungskosten abgebildet sind.

## 5 Ergebnisse

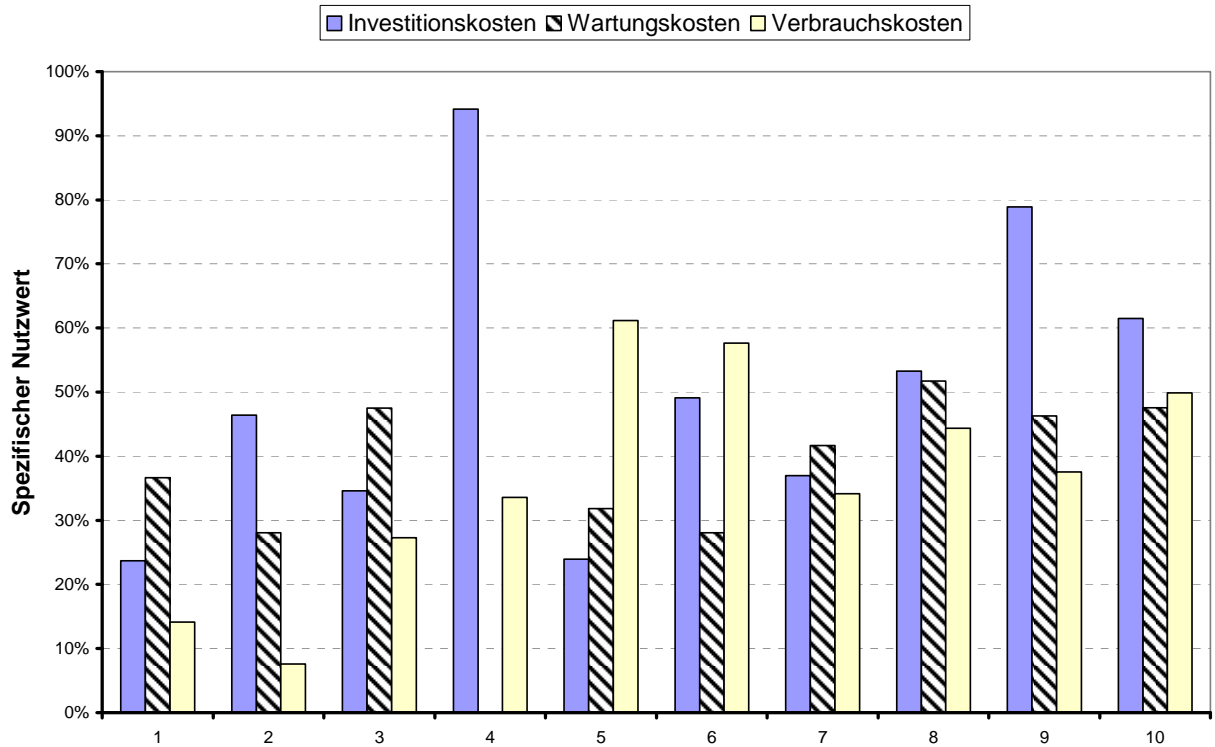


Abbildung 25: Spezifischer Nutzwert der Investitionskosten, der Wartungskosten und der Verbrauchskosten der Angebote

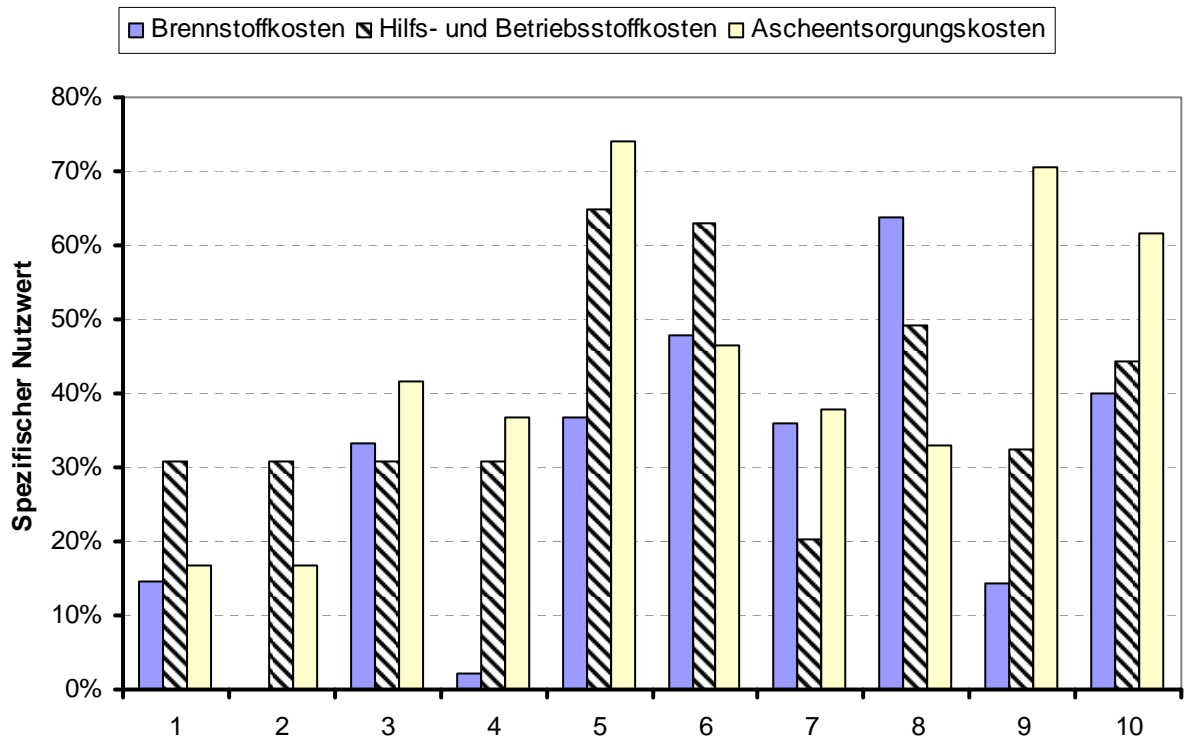


Abbildung 26: Spezifische Nutzwerte der Brennstoffkosten, der Hilfs- und Betriebsstoffkosten und der Ascheentsorgungskosten der Angebote

## 5 Ergebnisse

Das Teilziel der Technik spaltet sich in die Effizienz, Funktion und Flexibilität, deren spezifische Nutzwerte in der Abbildung 27 zu sehen sind, sowie in Emissionen und Bedienerfreundlichkeit auf, deren spezifische Nutzwerte in der Abbildung 28, dargestellt sind.

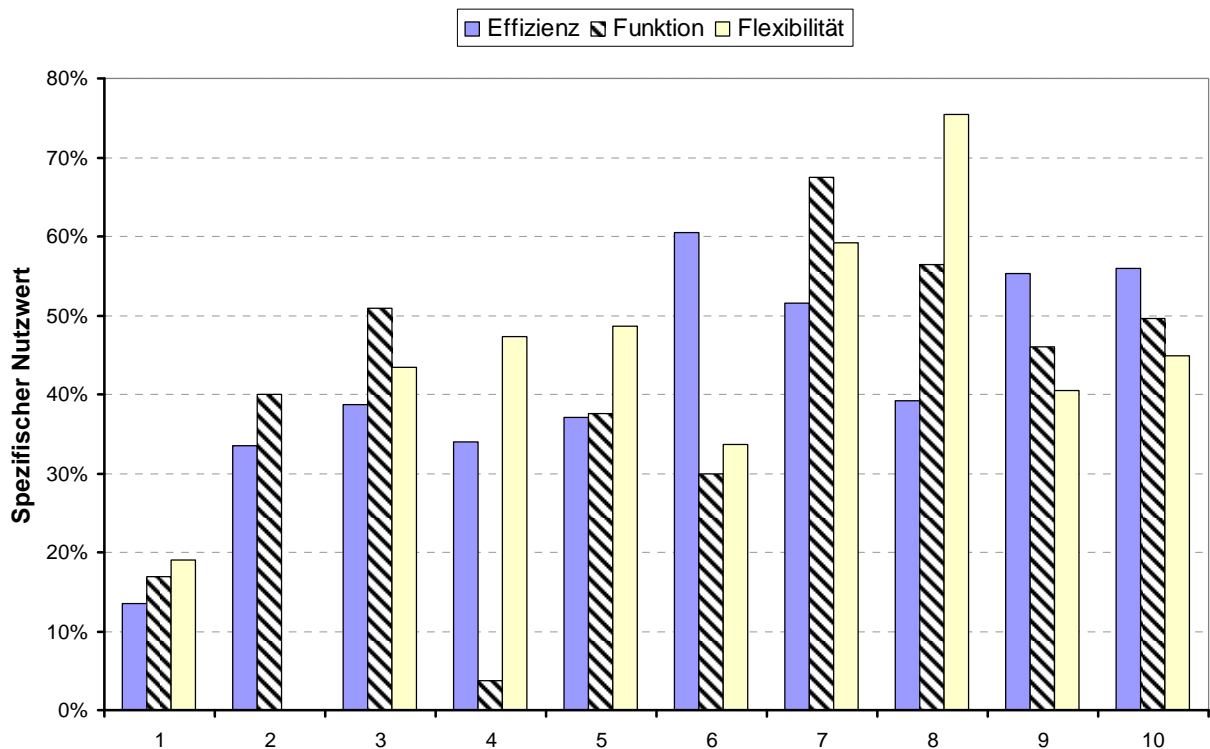


Abbildung 27: Spezifischer Nutzwert der Effizienz, der Funktion und der Flexibilität der Angebote

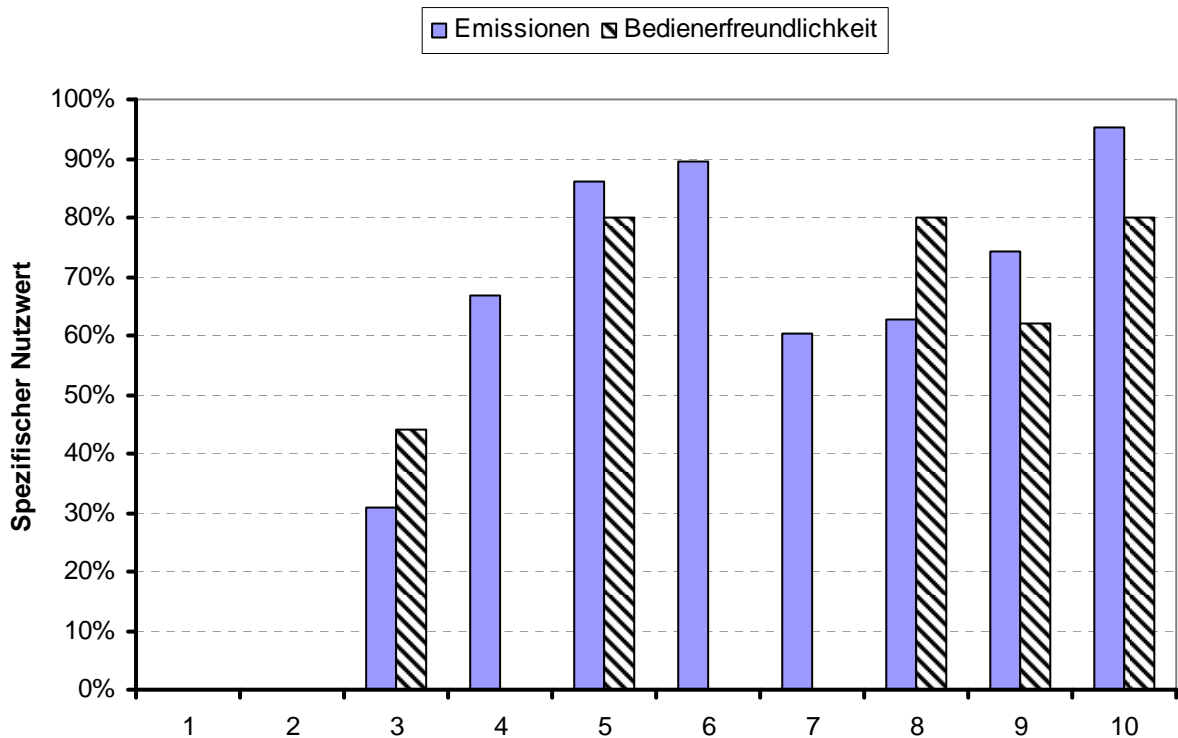


Abbildung 28: Spezifischer Nutzwert der Emissionen und der Bedienerfreundlichkeit der Angebote



### 5.1.2 Gegenüberstellung der Angebote mit dem höchsten Nutzwert

Die Angebote 8, 9 und 10 sind diejenigen mit dem höchsten Nutzwert. Ihre Teilergebnisse werden nun nochmals betrachtet, siehe Abbildung 29.

Angebot 10, mit dem höchsten Nutzwert von 5,72, hat mit 3,4 den größten technischen Nutzwert, da es im untergeordneten Teilziel der Emissionen führend ist und die weiteren untergeordneten Teilziele entweder gleich gut erfüllt wie Angebot 8 oder 9, oder bei der Zielerfüllung an zweiter Stelle ist. Angebot 10 sticht somit dadurch hervor, dass es im Vergleich zu den anderen Angeboten in keinem der Teilziele schlecht abschneidet.

Im Teilziel der Wirtschaftlichkeit ist hingegen Angebot 9, führend, da es in dem untergeordneten Teilziel der Investitionskosten den höchsten Nutzwert erreicht.

Angebot 8 hingegen erreicht nur in den untergeordneten Teilzielen der Wartungskosten, der Funktion und Effizienz, den höchsten Nutzwert.

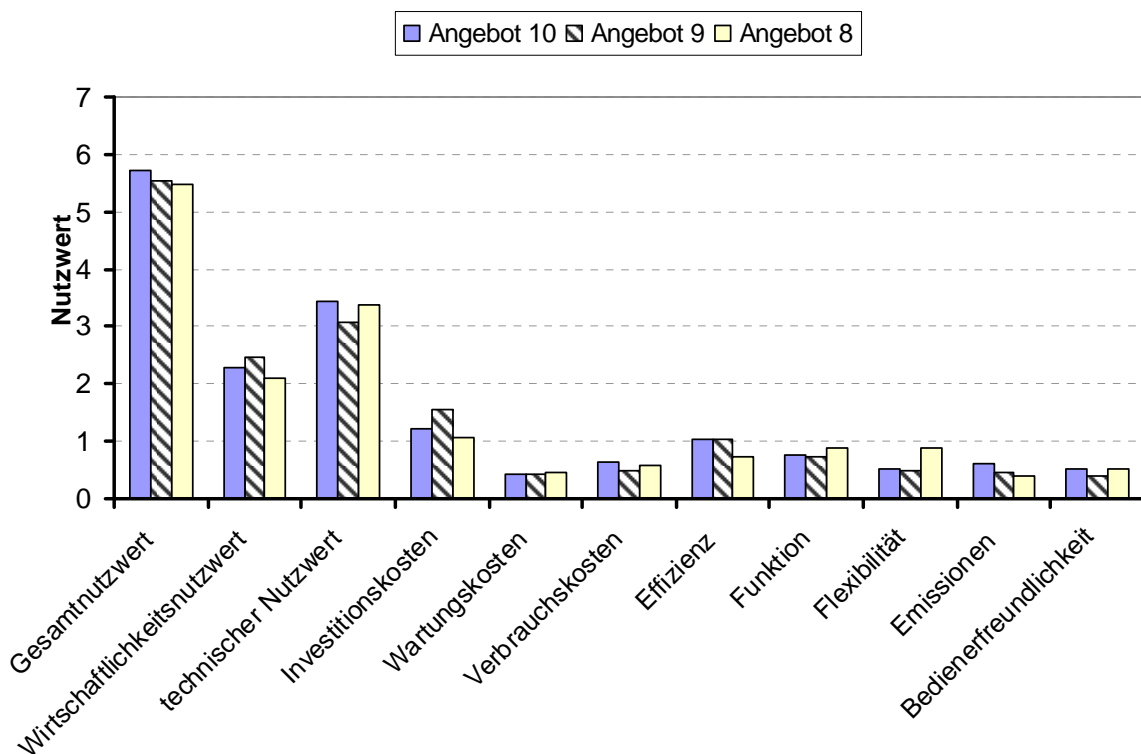


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Nutzwerte von Angebot 9 und 10

In Abbildung 29 sind die Nutzwerte abgebildet, die mit Gewichtungen berechnet wurden, die aus einer Befragung, siehe Kapitel 4.2.4, ermittelt wurden. Die Gewichtung für das Teilziel Wirtschaft beträgt hierbei 0,48 und für das Teilziel Technik 0,52. Diese Gewichtung wird für alle Berechnungen innerhalb der Masterarbeit, mit Ausnahme von Abbildung 30, herangezogen. Die Gewichtungen der Teilziele Technik und Wirtschaft wurden für diese Abbildung miteinander vertauscht.

## 5 Ergebnisse

Durch diese Änderung in der Gewichtung kommt es nun zu einer Verschiebung der Reihung der Angebote, siehe Abbildung 30. Angebot 9 erreicht nun den höchsten Nutzwert von 5,61, während Angebot 10 nur mehr einen etwas geringeren Nutzwert von 5,61 erreicht. Angebot 8 bleibt an dritter Stelle, hat jedoch nur mehr einen Nutzwert von 5,29.

Angebot 9 hat hierbei im Gegensatz zu Angebot 10 von der höheren Gewichtung des Teilziels der Wirtschaftlichkeit profitiert.

Wie erkenntlich, ist das Ergebnis der Nutzwertanalyse stark abhängig von Änderungen in der Gewichtung.

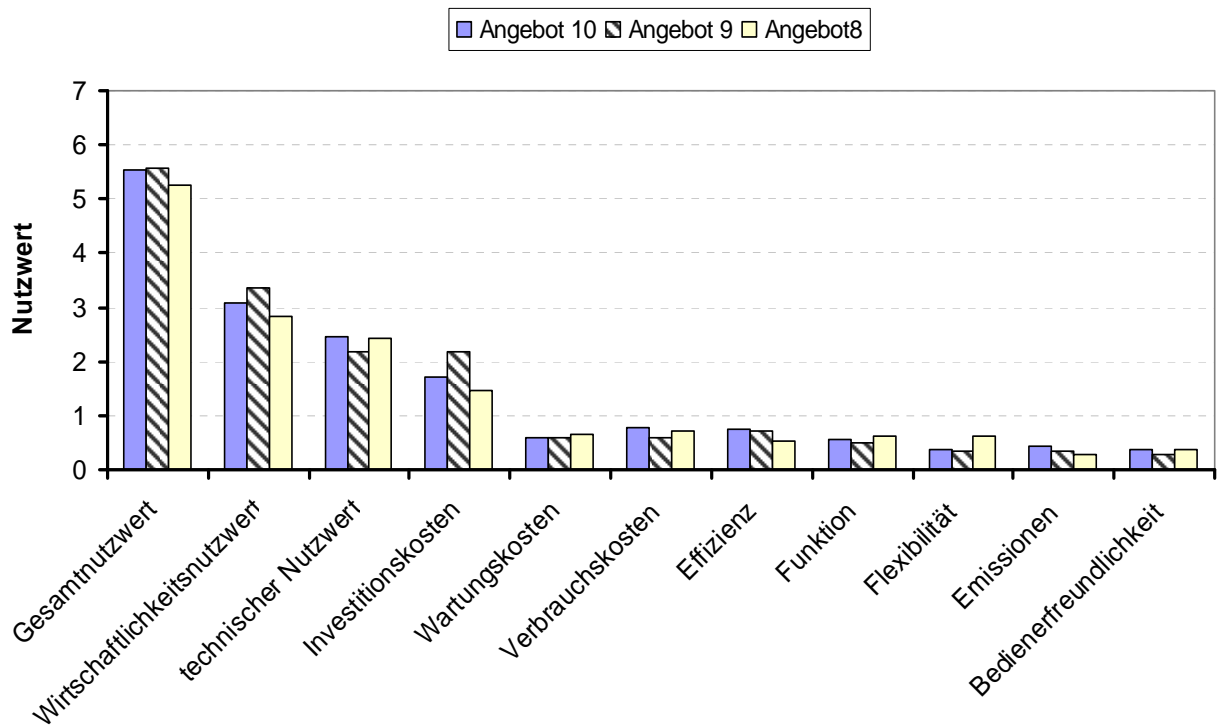


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Nutzwerte von Angebot 8, 9 und 10. Wobei die Gewichtung für die Teilziele Technik und Wirtschaftlichkeit auf folgende Gewichtungen verändert wurden:  $g_{tech}=0,48$   $g_{wir}=0,52$

### 5.1.3 Variation der Zielwerte

Zur weiteren Untersuchung der Ergebnisse werden nun die Nutzwerte dargestellt wenn die Zielwerte analog zu den Zielwerten zum Vergleich der Biomassefeuerungstechnologien, siehe Kapitel 0, gewonnen werden. Es wurde also der Mittelwert der Zielwerte von Angeboten mit derselben Feuerungstechnologie als Zielwert angenommen, wenn für ein Bewertungskriterium keine Information zur Verfügung stand.

Als Folge dessen ist der Nutzwert der Angebote nicht mehr so stark von der Vollständigkeit der Zielwerte eines Angebots abhängig. Wie aus Abbildung 31 ersichtlich verändert sich nun der Nutzwert der Angebote stark.

Obwohl Angebot 10 mit 5,71 noch immer den größten Nutzwert aufweist, hat sich die Reihung aller anderen Angebote verändert. So hat Angebot 4 mit 5,65 den zweithöchsten Nutzwert, da es mit Abstand die niedrigsten Investitionskosten aufweist und Angebot 6 ist mit einem Nutzwert von 5,57 auf die dritte Stelle vorgerückt.

Angebot 1 und 2, diejenigen über die am wenigsten Daten verfügbar waren, bewegen sich nun im Mittelfeld der Nutzwerte. Am schlechtesten schneidet nun Angebot 5 ab.

Man erkennt, dass durch die Annahme aus Kapitel 4.2.3 die Nutzwerte stark beeinflusst werden. Dies spricht jedoch für eine Empfehlung des Angebots 10, da es auch unter diesen neuen Annahmen noch den höchsten Nutzwert erreicht.

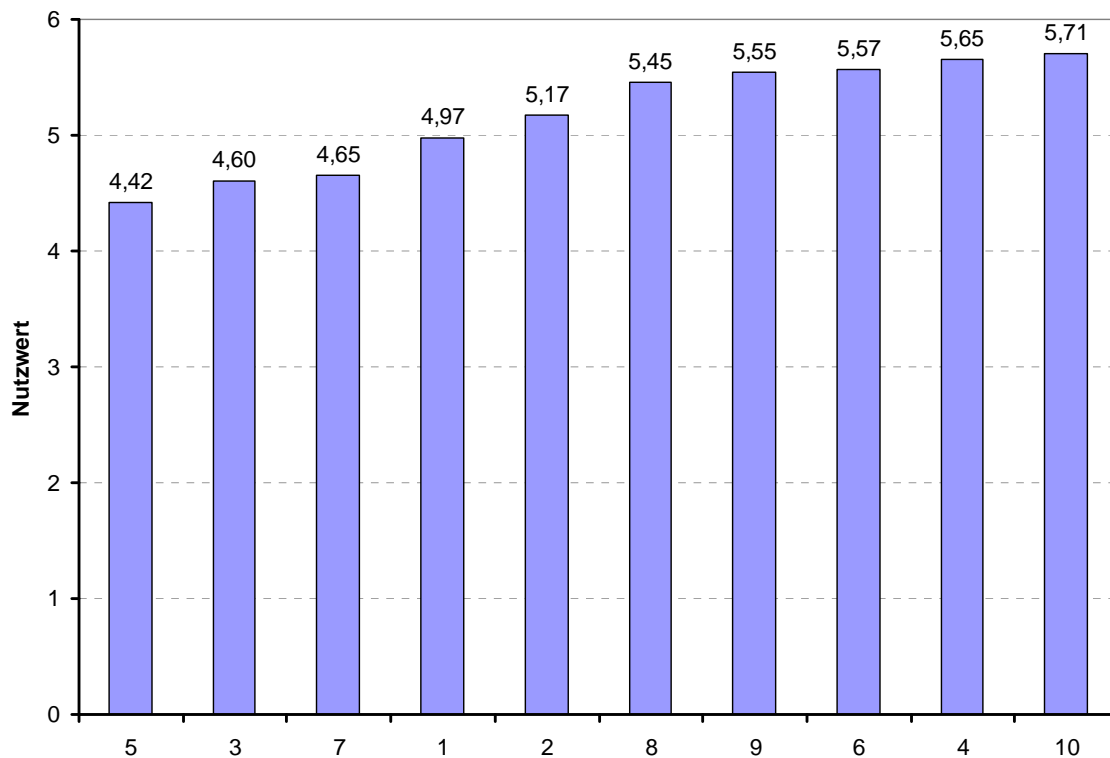


Abbildung 31: Nutzwerte der Angebote mit neuen Zielwerten für Zielkriterien die zuvor wegen Unvollständigkeit der Daten als nicht erfüllt angenommen wurden

Zur Veranschaulichung sind nun in Abbildung 32 die drei Angebote mit dem höchsten Nutzwert für die neuen Zielwerte abgebildet.

Am Angebot 4 kann man gut den Kompensationseffekt erkennen, der bei der Bildung des Nutzwertes auftritt, da er sich durch das Aufsummieren der Zielerträge ergibt. Angebot 4 hat zwar einen sehr hohen Nutzwert für das Teilziel der Wirtschaftlichkeit, jedoch hat er im Teilziel der Effizienz den niedrigsten Nutzwert aller Angebote. Durch die Summenbildung kompensiert sich jedoch dieser schlechte Teilnutzwert, weshalb zur Entscheidungstreffung immer auch die Teilnutzwerte betrachtet werden sollten.

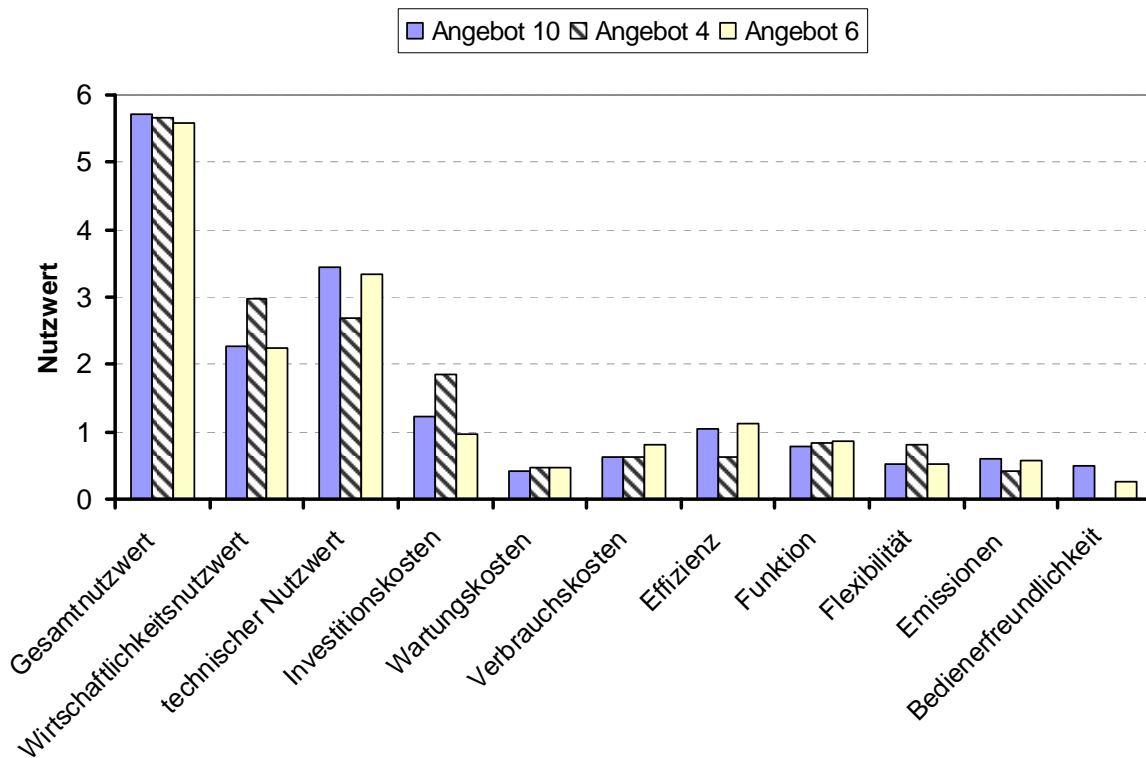


Abbildung 32: Gegenüberstellung der 3 Angebote mit dem höchsten Nutzwert mit neuen Zielwerten für Zielkriterien die zuvor wegen Unvollständigkeit der Daten als nicht erfüllt angenommen wurden

## **5.2 Ergebnisse der Nutzwertanalyse der Biomassefeuerungstechnologien**

In Abbildung 33 sind die ermittelten Nutzwerte der Feuerungstechnologien mit ihren Teilzielnutzwerten abgebildet. Die Wanderrostfeuerung mit Einblasbeschickung erreicht hierbei mit 5,48 den höchsten Nutzwert, gefolgt von der Feuerung mit stationärer Wirbelschicht, die den Nutzwert von 5,05 erreicht und der Vorschubrostfeuerung deren Nutzwert mit 4,96 knapp den letzten Rang belegt.

Die stationäre Wirbelschicht liegt im Teilziel der Technik, durch die höchsten Nutzwerte in der Funktion und der Flexibilität, auf Platz 1.

Der Wanderrost hingegen erreicht im Teilziel der Wirtschaftlichkeit, durch die beste Erfüllung der untergeordneten Teilziele der Investitionskosten, Wartungskosten und Verbrauchskosten, den höchsten Nutzwert.

Der Vorschubrost liegt durch den niedrigen Nutzwert des Teilziels der Technik an letzter Stelle, durch die niedrigen Nutzwerte der Funktion und Flexibilität.

Es muss nochmals erwähnt werden, dass sich diese Ergebnisse aus Daten von spezifischen Angeboten von Lieferanten ergeben und nur 5 Angebote für Vorschubroste, 3 für Wanderroste und 2 Angebote für stat. Wirbelschichtfeuerungen vorliegen. Außerdem sind einige Teilziele nur sekundär von der Feuerungstechnologie abhängig, wie z.B. die Emissionen oder auch die Effizienz, zu deren Zielkriterien unter anderem die kesselspezifischen Dampfparameter und Druckverluste zählen.

## 5 Ergebnisse

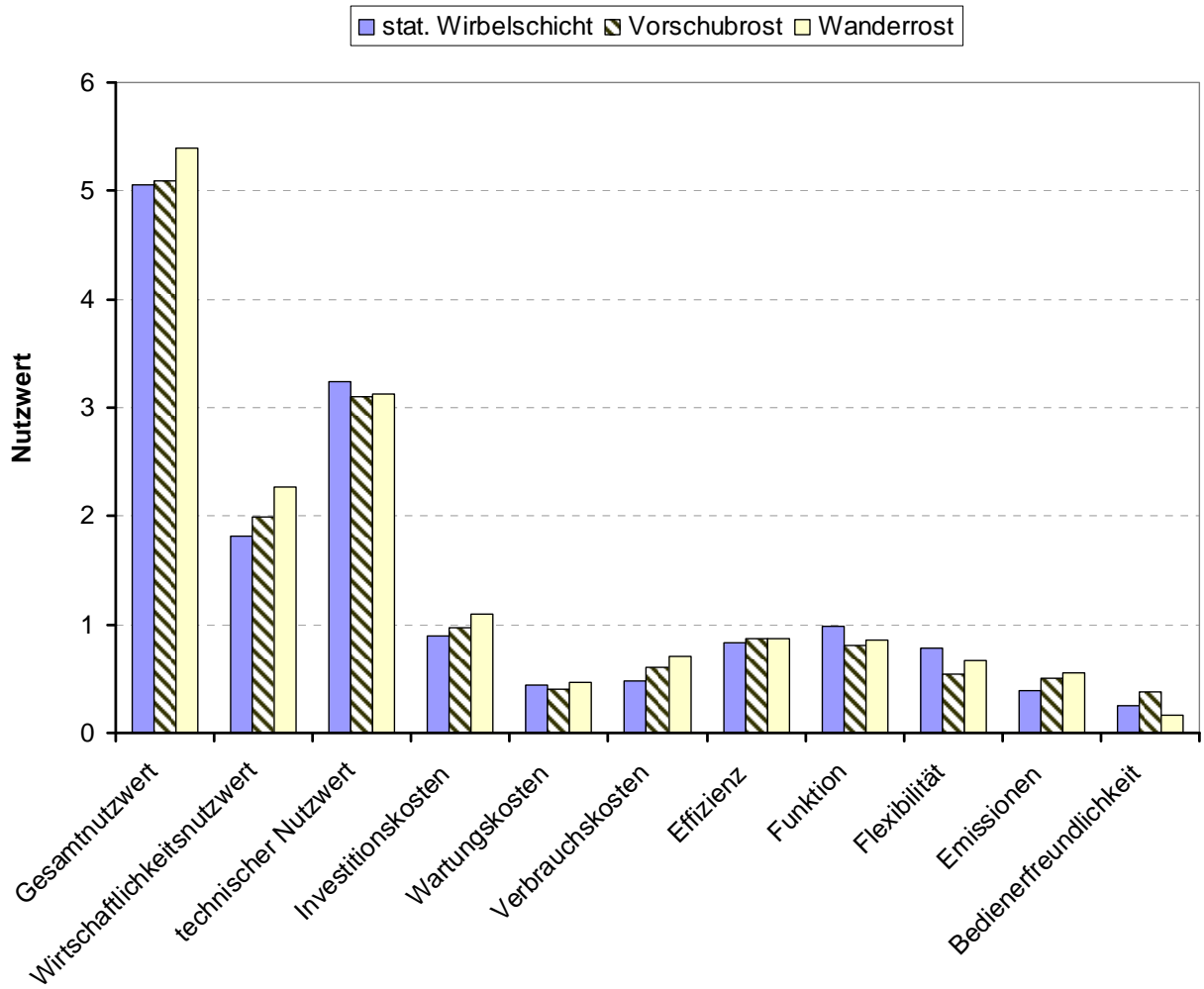


Abbildung 33: Nutzwerte der Biomassefeuerungstechnologien- erhalten aus den Herstellerangeboten

### 5.3 Ergebnisse aus der Betreibernutzwertanalyse und des Betreiberfragebogens

Die Daten aus dem Fragebogen an die Betreiber von Biomassefeuerungsanlagen sind statistisch ausgewertet worden und es wurde mittels dieser Daten eine Betreibernutzwertanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse werden nun erläutert.

#### 5.3.1 Auswertung des Betreiberfragebogens

Von den 41 Betreibern, an die ein Fragebogen verschickt wurde, füllten den Fragebogen 17 aus.

Zur Übersicht sind in der Abbildung 19 die Betreiber, die an der Befragung teilgenommen und die einen Fragebogen erhalten haben dargestellt.

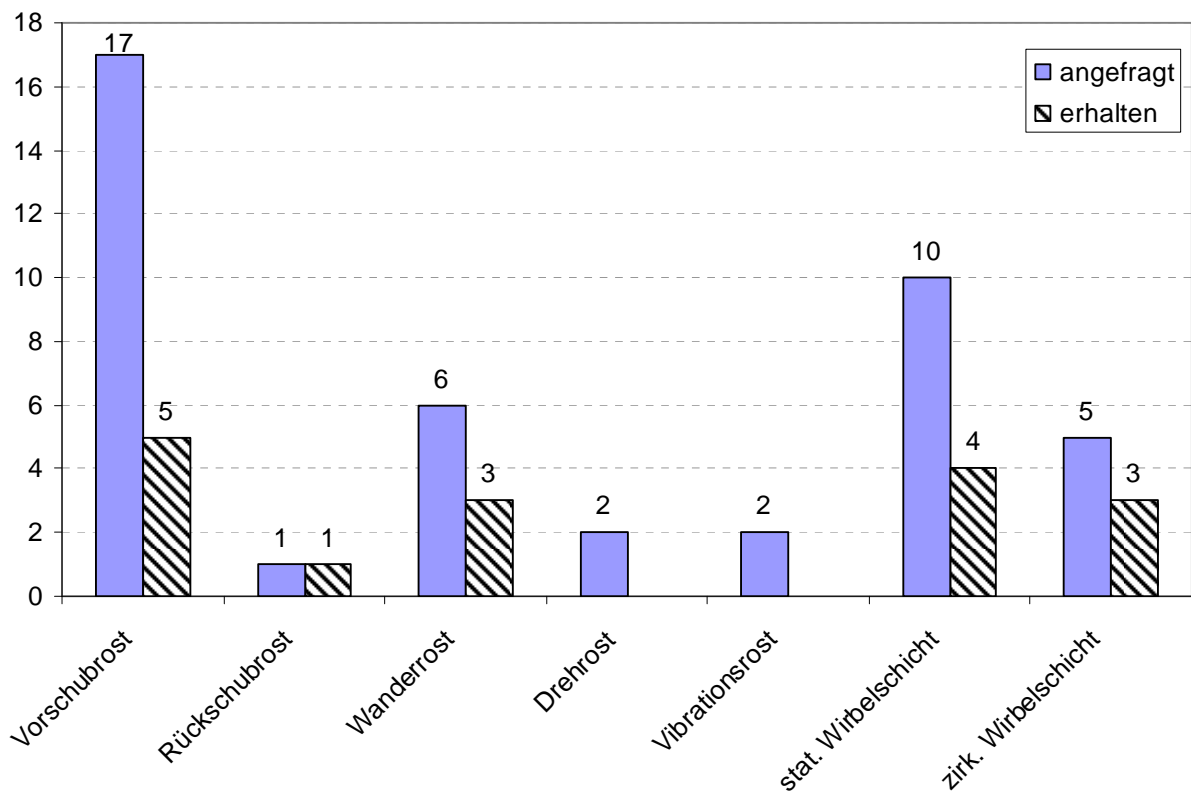


Abbildung 34: Anzahl der an Befragung teilgenommenen Betreiber pro Feuerungstechnologie und der Betreiber denen ein Fragebogen übermittelt wurde

Die Alterstruktur der Kraftwerke ist in Abbildung 35 zu sehen. Die ältesten Kraftwerke der teilnehmenden Betreiber wurden 2002 in Betrieb genommen, während die Inbetriebnahme des Großteils der Kraftwerke 2006 erfolgte.

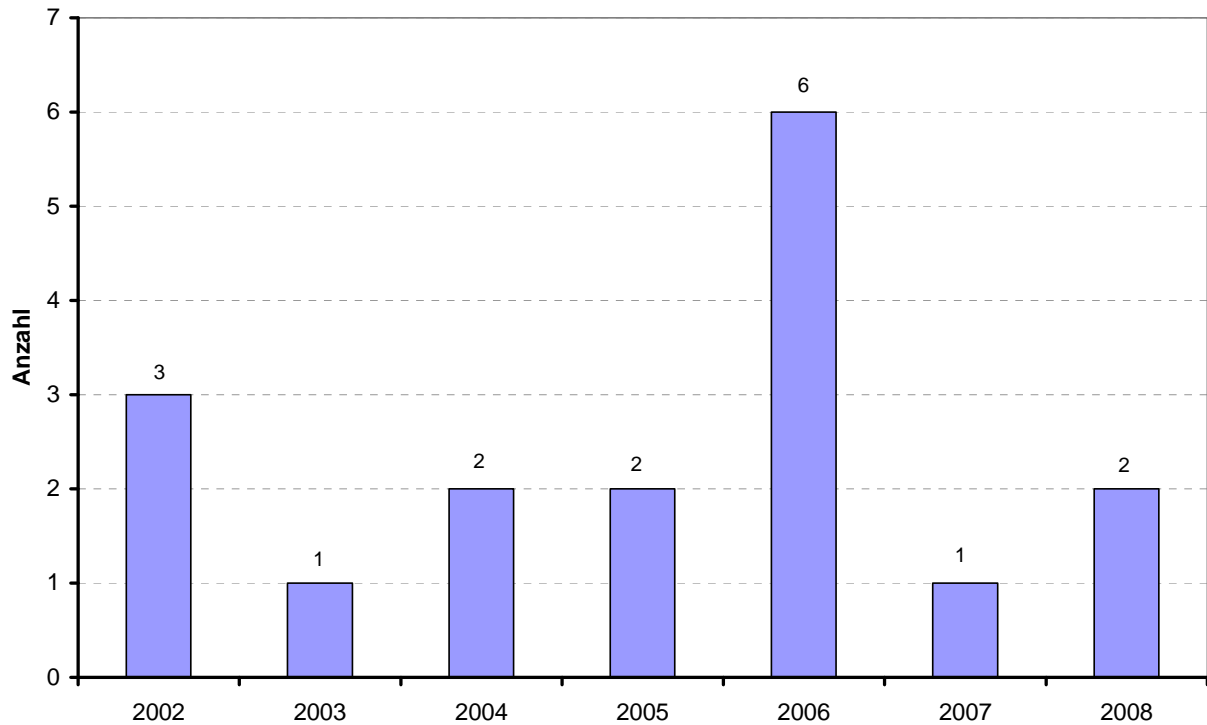


Abbildung 35: Alterstruktur der Kraftwerke, dessen Betreiber an der Befragung teilnahmen

Die tatsächlich erreichten Kesselwirkungsgrade der Kraftwerke sind in Abbildung 36 abgebildet. Wobei der Wirkungsgrad dem für die Feuerungstechnologien aus der Literatur erwarteten Wirkungsgrad folgt. Die zirkulierende Wirbelschicht weist gefolgt von stationärer Wirbelschicht und Staubfeuerung den größten Wirkungsgrad auf. Mit einem Kesselwirkungsgrad von 89,5 % folgen die Anlagen mit Wanderrost und im unteren Wirkungsgradbereich liegen Vorschubrostfeuerungen und die Rückschubrostfeuerung.



## 5 Ergebnisse

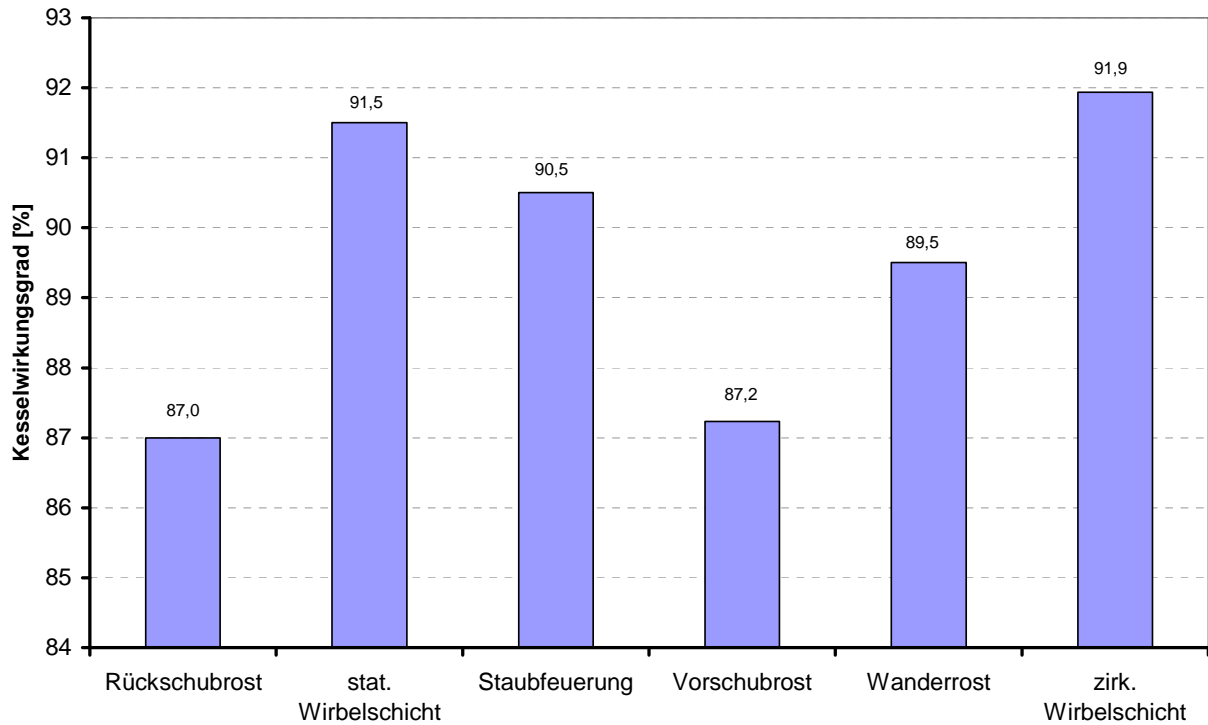


Abbildung 36: Kesselwirkungsgrade der befragten Anlagen nach Feuerungstechnologie

Die Volllaststunden, die die Kraftwerke pro Jahr durchschnittlich erreicht haben und die Verfügbarkeit der Anlagen angeben, sind in Abbildung 37 zu sehen.

Die Anlagen mit Vorschubroste sind hierbei diejenigen mit der größten Verfügbarkeit und die Anlagen mit zirkulierender Wirbelschicht diejenige mit der kleinsten Verfügbarkeit.

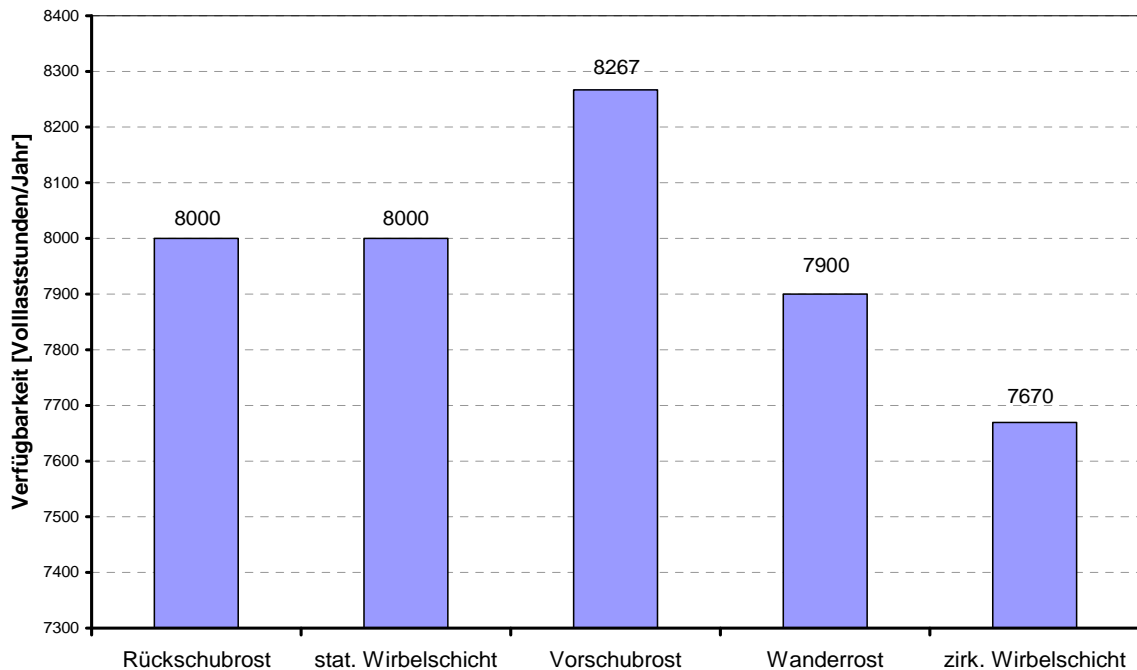


Abbildung 37: Verfügbarkeit der Anlagen nach Feuerungstechnologie

## 5 Ergebnisse

In Abbildung 38 sieht man, dass im Mittel die Betreiber relativ zufrieden mit den Herstellern bzw. Lieferanten der Biomassefeuerungs-systeme sind, wobei die Zufriedenheit mit der Inbetriebnahme abnimmt und im Bereich der Wartung und Instandhaltung am kleinsten ist.

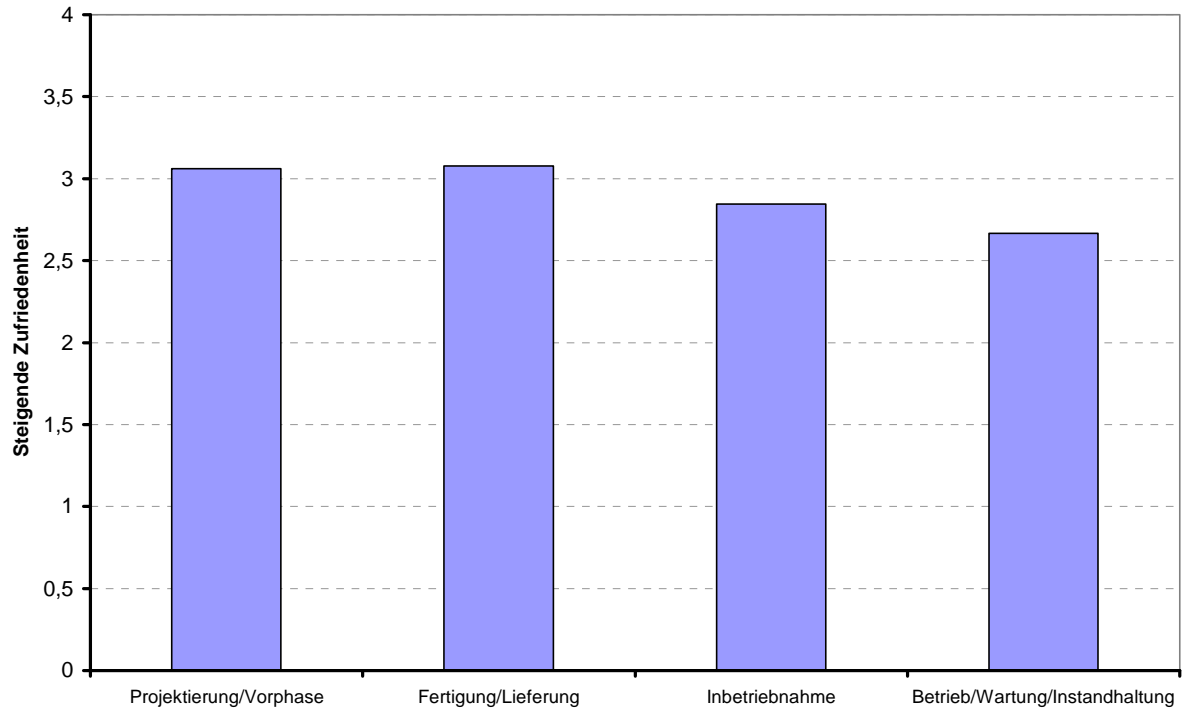


Abbildung 38: Mittelwerte der Zufriedenheit der Betreiber mit dem Lieferanten bzw. Hersteller zu verschiedenen Projektphasen, wobei 0 für sehr unzufrieden und 4 für sehr zufrieden steht.

Die Betreiber wurden auch nach den Ihrer Erfahrung nach kritischen Elementen des Feuerungssystems befragt, die in der folgenden Tabelle, Tabelle 7, abgebildet sind.

## 5 Ergebnisse

*Tabelle 7: Kritische Elemente der Biomassefeuerungs-systeme und ihre Probleme, sortiert nach den Feuerungstechnologien, die von den befragten Betreibern genannt wurden*

Feuerungstechnologie	Kritisches Element	Probleme
<b>Wanderrost</b>	Rost	Stabilität: herunterstürzende Aschebrocken Rostabbrand durch zu hohe Feuerraumtemperaturen
	Überhitzer	Verschlackung, Hochtemperaturchlorkorrosion
	Feuerraumberohrung	Hochtemperaturchlorkorrosion
<b>Vorschubrost</b>	Überhitzer	Hochtemperaturchlorkorrosion
	Brennstoffzuführung	Verstopfungen
	Nachbrennkammer	Anbackungen
	Ascherückführung	Verstopfungen, Verschleiß
	ECO, LUVO	Niedertemperaturkorrosion
<b>zirk. Wirbelschicht</b>	Tauchrohr zum Zyklon	Erosion
	Zellradschleusen	Verstopfungen
<b>stat. Wirbelschicht</b>	Düsenboden	Versinterung
	ECO	Niedertemperaturkorrosion
	Ausmauerung	Anbackungen
	Überhitzer	Korrosion, Erosion

Weiters wurden von den Betreibern, unabhängig von der Feuerungstechnologie, diverse Fördereinrichtungen als kritisch empfunden. Hierbei wurden Trogkettenförderer bzw. Kratzkettenförderer am häufigsten genannt, deren Mitnehmer als auch Ketten als sehr verschleißanfällig empfunden wurden. Desweiteren werden bewegte und rotierende Elemente, wie z.B. Förderschnecken, durch erhöhten Verschleiß und ihre Anfälligkeit für Verstopfungen von den Betreibern als kritisch angesehen.

Es werden nun einige Anmerkungen der Betreiber, die die Technik und die Auslegung der Anlage betreffen, genannt:

- Die meisten Betriebsstörungen können mit Brennstoffqualität in Verbindung gebracht werden.
- Speisewassertemperatur nicht zu tief ansetzen um Chlor- bzw. Schwefeltaupunktunterschreitungen am ECO zu vermeiden
- LUVO-Eintrittspaket sollte in geeigneter Qualität ausgeführt werden, da es zu Säuretaupunktunterschreitungen kommen kann.
- Wenn möglich keine Förderschnecken, sowohl bei Brennstoff wie auch bei Asche, einsetzen.
- Zugänglichkeit für die Instandhaltung in den Kessel sollte gewährleistet sein.

- Die Brennstoffaufbereitung sollte groß genug dimensioniert werden.

Weiters wurden von den Betreibern noch einige Anmerkungen, die die Vertragsgestaltung oder die Wirtschaftlichkeit der Anlage betreffen, abgegeben:

- Elektrischer Eigenbedarf der Anlage sollte vertraglich fixiert werden.
- Man sollte sich vom Gesamtunternehmer bzw. Anlagenherstellern Ersatzteilpaket mit anbieten lassen bzw. in die Verhandlungen mit einbeziehen.
- Man sollte darauf achten, dass keine utopische Designerbrennstoffqualität vom Anlagenhersteller vertraglich vereinbart wird.
- Die Wirtschaftlichkeit ist maßgeblich von der Wärmenutzung abhängig
- Ein zuverlässiger und erfahrener Anlagenbauer ist von großer Bedeutung

### 5.3.2 Ergebnisse der Betreiberbewertanalyse

Der spezifische Nutzwert der Feuerungstechnologien aus Daten des Betreiberfragebogens, bezeichnet als Betreiberbewert, und der spezifische Nutzwert des Teilziels der Zufriedenheit mit den Herstellern, bezeichnet als Herstellerbewertung, ist in Abbildung 39 zu sehen.

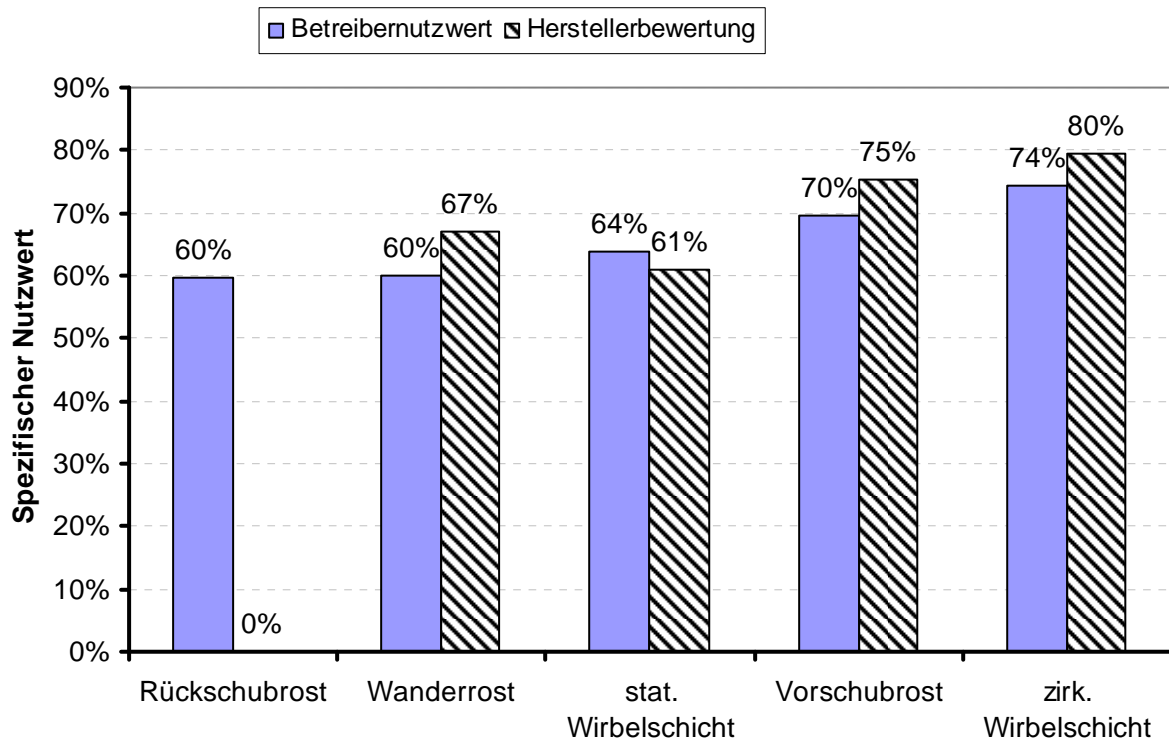


Abbildung 39: Betreiberbewert und Nutzwert der Herstellerzufriedenheit für verschiedene Feuerungstechnologie

Bei der Betreiberbewertanalyse schneidet die zirkulierende Wirbelschicht am besten ab, gefolgt vom Vorschubrost. Die stationäre Wirbelschicht liegt mit einem spezifischen Nutzwert von 64 Prozent an dritter Stelle. Rückschubrost und Wanderrost erreichen jeweils einen spezifischen Nutzwert von 60 Prozent. Der spezifische Nutzwert der Herstellerzufriedenheit ist für die zirkulierende Wirbelschicht am höchsten, gefolgt von Vorschubrost, Wanderrost und stationärer Wirbelschicht.

Der Betreiber des Rückschubrostes wollte keine Auskünfte über seine Herstellerzufriedenheit abgeben.

Es muss erwähnt werden, dass die Daten aus den Betreiberfragebögen oft sehr lückenhaft sind und dass die Verfügbarkeit der Anlagen, als auch die Standzeiten diverser Elemente sowie der Kesselwirkungsgrad, sowohl vom Brennstoff als auch von der Fahrweise des Biomassefeuerungsanlage abhängen. Unter Einbetracht dieser Faktoren ist es schwierig von den Ergebnissen der Betreiberbewertanalyse direkt auf das Betriebsverhalten der verschiedenen Feuerungstechnologien zurückzuschließen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Der Betrieb eines hocheffizienten Biomasseheizkraftwerks stellt, trotz mittlerweile langjähriger Erfahrung in der Feuerung von Biomasse vor allem durch die gewünschten hohen Dampfparameter und die dadurch höhere Hochtemperaturchlorkorrosionsneigung, eine Herausforderung dar.

Die für einen Standort ideale Biomassefeuerungstechnologie ist im wesentlichen vom Brennstoff und der Feuerungswärmeleistung abhängig.

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse ergibt als Favoriten mit dem höchsten Nutzwert das Angebot 10, eine Vorschubrostfeuerung, deren Lieferant die meisten Daten zur Verfügung stellte.

Um zu sehen inwieweit das Ergebnis von der Vollständigkeit der Daten beeinflusst wird, wurden die Zielerträge der Zielkriterien für die keine Daten vorlagen mittels Mittelwertbildung bestimmt. Das Angebot 10 erreicht auch in diesem Fall den höchsten Nutzwert.

Beeinflusst wird das Ergebnis jedoch auch durch die Gewichtung, deren Befragung ergeben hat, dass ein höherer Wert auf die Technik als auf die Wirtschaftlichkeit, gelegt wird.

Im Falle einer Gewichtung zugunsten des Teilziels der Wirtschaft würde das Angebot 9 den höchsten Nutzwert erreichen und das Angebot 10 auf den zweiten Platz zurückfallen, was daran liegt, dass das Angebot 9 einen höheren Nutzwert der Wirtschaftlichkeit aufweist.

Daran ist zu erkennen, dass der Gewichtung eine relativ große Bedeutung zukommt.

Die Nutzwertanalyse zur Bewertung der Feuerungstechnologien zeigt als beste Technologie die Wanderrostfeuerung mit Wurfbeschickung auf, wobei die Bewertung auf den Daten von nur 3 Wanderrostfeuerungssystemanbietern beruht, wodurch das Ergebnis stark von den Daten der Angebote abhängt und somit nicht ohne weiteres auf die Technologie umgelegt werden kann. Ein größerer Datenpool würde hierbei Abhilfe schaffen.

Die Betriebserfahrungen aus dem Fragebogen können unter den momentan vorliegenden Daten nicht zur Bewertung eines Herstellers bzw. Lieferanten miteinbezogen werden, da pro Hersteller größtenteils nur ein ausgefüllter Betreiberfragebogen vorliegt. Nichtsdestotrotz erreicht die zirkulierende Wirbelschicht, unter Einbeziehung der vorhandenen Daten, sowohl den höchsten Betreibernutzwert als auch die größte Zufriedenheit mit den Anlagenlieferanten bzw. Anlagenhersteller.

## 6.1 Schlussfolgerungen

Die Datenbeschaffung und eine klare Definition der Systemgrenzen der Nutzwertanalyse sollten bereits bei der Anfrage für Anlagen geschehen.

Mit der Vollständigkeit der Daten steigt die Aussagekräftigkeit der Ergebnisse.

Eine genaue Definition und Beschreibung der Zielkriterien ist notwendig um Missverständnisse bei der Datenbeschaffung zu vermeiden.

Da die Gewichtung das Ergebnis beeinflusst, sollte außerdem eine größere Anzahl von Personen zur Gewichtung befragt werden.

Eine weitere Verbesserung der Aussagekräftigkeit der Ergebnisse der Nutzwertanalyse kann durch die Bewertung der Materialqualität erfolgen. Der Dokumentationsumfang ist vor Lieferung der Anlage schwer bestimmbar und dieses Zielkriterium könnte aus der Nutzwertanalyse entfernt werden.

Zur Bewertung eines neuen Projekts mittels der Nutzwertanalyse sollte eine neuerliche Gewichtung unter Einbeziehung der geänderten projektspezifischen Rahmenbedingungen erfolgen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei Vollständigkeit der Daten durch die Nutzwertanalyse relativ leicht eine Hilfestellung zur Entscheidungsfindung, für die Auswahl von Biomassefeuerungsanlagen, gegeben werden kann.

## 7 LITERATUR UND QUELLVERZEICHNIS

[1] H. Effenberger: **Dampferzeugung**, Springer –Verlag, Berlin Heidelberg, 2000

[2] C. Yin, L. Rosendahl, S. Kær: **Grate-firing of biomass for heat and power production**, Progress in Energy and Combustion Science, 2008

[3] L. Gockner, N. Rechberger: **Biomassekraftwerke**, VGB PowerTech 01-02/2008

[4] K. Strauß: **Kraftwerkstechnik: Zur Nutzung Fossiler, Nuklearer Und Regenerativer Energiequellen**, Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

[5] R. Berger, S. Unterberger, K. R. G. Hein: **Heizkraftwerke auf Biomassebasis**, VGB PowerTech 08/2003

[6] A. Christ, R. Simon, M. Deutsch, R. Weiher: **Untersuchung von Biomasse- und Altholz(heiz)kraftwerken im Leistungsbereich 5 bis 20 MWel zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit**, Bingen, 2008

[7] Sjaak Van Loo, Jaap Koppejan: **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing** Earthscan, Enschede, 2008

[8] **Leitfaden der Bioenergie**, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V, 2005, Gülzow.

[9] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, **Energie aus Biomasse**, Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001

[10] D. Hein, J. Karl: **Conversion of Biomass to Heat and Power**; Landolt-Börnstein, Band VII/3, Subvolume C, Springer Verlag, Berlin, 2006

[11] M. Born: **Cause and Risk evaluation for high temperature chlorine corrosion**: VGB PowerTech 05/2005

[12] J. Karl: **Energetische Nutzung von Biomasse und Reststoffen**, Unterlagen zur Vorlesung, 2008



[13]M. Bolhár- Nordenkampf: **Biogene Brennstoffe in der Wirbelschicht verfeuern**, BWG 11/2007

[14]I. Obernberger, J. Schima, H. Holzner, E. Unteregger, **Der sachgerechte Einsatz von Pflanzenaschen im Wald**, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, Wien

[15]I. Holzner, J. Obernberger. **Der sachgerechte Einsatz von Pflanzenaschen im Acker- und Grünland**, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, Wien, 1998

[16]I. Obernberger, 2000\_ **Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe**  
VDI Schriftenreihe: Regenerative Energien in Ungarn und in Deutschland, VDI- Verlag GmbH Düsseldorf, 2000

[17] S. Rahmesol, K. Arnold : **Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse**, Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW, Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen, 2005

[18]W. Schneider, **Moderne Holzfeuerungsanlagen**, Holzabsatzfonds, Bonn, 2004

[19] *Persönliche Mitteilung, J. Karl, 15.12.2009*

[20]C. Zangemeister, **Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen**, München, 1971

[21] [http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/Ptm/Ptm\\_BewNwa.htm](http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/Ptm/Ptm_BewNwa.htm), 24.2.2009

[22] R. Schaidhof, **Die Nutzwertanalyse- ein sinnvoller Weg zur Lösungsfindung?**, München, 1995, S. 1ff

[23] R. Simon, A. Christ, M. Deutsch, R. Weiher, **Untersuchung von Biomasse- und Altholz(heiz)kraftwerken im Leistungsbereich 5 bis 20 MW<sub>el</sub> zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit**, , VGB- Nr. 302, Bingen

[24] <http://www.aldavia.com/index.php?id=12>, 2.12.2008

[25] [http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/power/media\\_publications/brochures/Biower/Biopower\\_2007\\_UK.pdf](http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/power/media_publications/brochures/Biower/Biopower_2007_UK.pdf), 24.11.2008]

[26] <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=2001042710&IA=DK2000000676&DISPLAY=DOCUMENTS>,

[27]

[http://www.volund.dk/technologies\\_products/biomass\\_energy\\_systems/combustion\\_grates/vibration\\_grate\\_hvb\\_water\\_cooled](http://www.volund.dk/technologies_products/biomass_energy_systems/combustion_grates/vibration_grate_hvb_water_cooled), 26.11.2008

[28] Budgetangebot Andritz OY, 22.02.2008

[29] Telefonat mit Karlheinz Huber(Emissions-Reduzierungs-Concepte GmbH), 06.07.2009

## 8 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BWL	...	Brennstoffwärmeleistung
bzw.	...	beziehungsweise
d		Tag
ECO	...	Economizer
FS	...	Frischsubstanz, Bezug auf feuchte Biomasse
Ho	...	Oberer Heizwert (Brennwert)
Hu	...	Unterer Heizwert
k.A.	...	keine Angabe
KWK	...	Kraft-Wärme-Kopplung
LUVO	...	Luftvorwärmer
mm		Millimeter
MW		Mega Watt
NWL	...	Nutzwärmeleistung
stat.	...	stationäre
t		Tonne
th		thermisch
z.B.	...	zum Beispiel
zirk.	...	zirkulierende

## 9 ANHANG

### 9.1 Fragebogen über die Betriebserfahrungen mit Biomassefeuerungsanlagen

**Name des Betreibers:**

Ansprechpartner:

Mailadresse:

Telefonnummer:

**1. Allgemeine Spezifikationen des Biomassekraftwerks:**

Jahr der Inbetriebnahme		
Brennstoffwärmeleistung	MW	
Elektrische Leistung: brutto/netto	MW	
Wärmeleistung	MW	
Frischdampf Temperatur	°C	
Frischdampfdruck	bar[a]	
Kesselwirkungsgrad	%	
Art des Brennstoffs inklusive Körngröße		
Wassergehalt[1] des Brennstoffs	%	
Zwischenüberhitzung vorhanden		

[1] Wassergehalt = Masse Wasser / (Masse Wasser + Masse Trockensubstanz)

**2. Technische Aspekte:**

**a. Standzeiten ausgewählter Elemente**

Rost	Betriebsstunden	
Überhitzer	Betriebsstunden	
Ausmauerung	Betriebsstunden	

Düsenboden	Betriebsstunden	
Tauchheizflächen	Betriebsstunden	
(Fließbettkühler)	Betriebsstunden	

**b. Kritische Elemente/ Schadensfälle:**

Was sind Ihrer Erfahrung nach die kritischen Elemente der Feuerungsanlage?

Kam es durch ein Element schon zu Schadensfällen oder verkürzter Reisezeit? Durch welche/s?

Welche Stillstandzeiten haben sich dadurch ergeben?

Wie lange dauert die Kaltstartzeit Ihrer Anlage?

Kam es zu Schadensfällen durch Korrosion/ Erosion? Wenn ja, an welchem Element?

Haben Sie Erfahrungen mit Additivzugaben(z.B.: Chlor- Out) oder Beschichtungen um Korrosionen zu vermindern?

Kam es zu Reisezeitbegrenzung oder Schadensfällen durch Ascheschmelzung bzw. Verschmutzungen?

Welche Erfahrungen haben Sie mit Reinigungseinrichtungen von Verschmutzungen gemacht?

**c. Brennstoff/ Brennstoffförderung/ Brennstoffaufgabe:**

Kam es zu Problemen durch Schwankungen in der Brennstoffqualität?

Über welche Art der Brennstoffaufgabe verfügt die Feuerungseinrichtung?

Kam es zu Komplikationen mit der Brennstoffaufgabe?

Welche Erfahrungen haben Sie mit den Brennstoffördereinrichtungen gemacht?

(z.B.: Probleme mit Ketten/Mitnehmern- Verschleiß, Lärmbelästigung)

Gab es Versuche mit anderen Brennstoffen(z.B.: Kurzumtriebsholz, Altholz)?

**d. Asche / Entaschungseinrichtung:**

Welchen Typ von Entaschungseinrichtungen verwenden Sie(Nassentaschung/Trockenentaschung)?

Welche Aschefraktionen(Rost-, Zyklon-, Filterasche) unterscheiden Sie?

Welche Erfahrungen haben Sie mit Entaschungseinrichtungen gemacht?

Wie hoch ist der Ascheanfall der Feuerungsanlage?

Welche Entsorgungskosten fallen an?

Gab es Versuche mit Ausbringung der Asche auf landwirtschaftlichen Flächen bzw. Forstflächen?

**e. Wirbelschicht:**

Wie hoch ist der Bettmaterialverbrauch?

Verfügt die Anlage über ein Bettmaterialaufbereitungssystem? Wenn ja, welche Erfahrungen haben Sie damit gemacht?

Haben Sie Erfahrung mit anderen Bettmaterialien als Silikatsand?

(Erfahrung mit Fließbettkühler)

**3. Wirtschaftlichkeit**

Investitionskosten	
Betriebskosten/Jahr	
Volllaststunden/Jahr	
Personalstärke inklusive Holzplatz	
Reisezeit in Volllaststunden	

**4. Zufriedenheit mit Herstellern/Lieferanten:**

Wie zufrieden waren Sie mit Herstellern/Lieferanten in verschiedenen Projektphasen?

Bitte Passendes ankreuzen:

1...unzufrieden, 2...eher unzufrieden, 3...eher zufrieden, 4...zufrieden

Projektphasen	1	2	3	4	Anmerkungen
Projektierung/Vorphase	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Fertigung/Lieferung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Inbetriebnahme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Betrieb/Wartung/Instandhaltung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

In welchen Punkten stimmen die Angaben der Hersteller nicht mit Ihren Betriebserfahrungen überein?

Wie sieht es im Langzeitkraftwerksbetrieb aus(z.B.: Verlauf der Volllaststunden/Jahr)?

## 9.2 Herstellerfragebogen

Name des Herstellers:			
Kennzahlen der Rostfeuerung			
Brennstoff		Holz[1]	Holz [2]
Brennstoffwärmeleistung (Spanne)	MW <sub>fuel</sub>		
Feuerungswirkungsgrad	%		
Anteil an Unverbranntem in der Asche	%		
Kesselwirkungsgrad	%		
Luftüberschuss (Spanne)			
Rauchgasrezirkulationsmenge/Rauchgasmenge	%		
Druckverlust- Primärluft	mbar		
Druckverlust- Sekundärluft	mbar		
Roststabtemperaturen (Spanne)	°C		
Brennkammertemperatur (Spanne)	°C		
Rostbelastung	MW/m <sup>2</sup>		
Teillastfähigkeit	%		
Kaltstartzeit	h		
Primärlufttemperaturbereich (Spanne)	°C		
Kantenlänge des Brennstoffs (Spanne)	mm		
Frischdampf Temperatur	°C		
Frischdampfdruck	bar(a)		
Emissionen ohne Sekundärmaßnahmen			
Staub [3]	mg/Nm <sup>3</sup>		
NO <sub>x</sub> [3]	mg/Nm <sup>3</sup>		
CO [3]	mg/Nm <sup>3</sup>		

[3] Bezug der Emissionswerte auf 11 [%] Volumenkonzentration Sauerstoff im trockenen Rauchgas

Reisezeit [Volllaststunden]	
-----------------------------	--

Wassergehalt [4] des Brennstoffs (Spanne)	
Variabilität/Flexibilität des Brennstoffs	
Ort der Beimischung des rezirkulierten Rauchgases	
Arten der Brennstoffaufgabe:	



## 9 Anhang

Erwartete Lebensdauer kritischer Elemente		
Roststäbe	Volllaststunden	
Überhitzer	Volllaststunden	
Ausmauerung	Volllaststunden	
Sonstige kritische Elemente mit verkürzter Lebensdauer:		
	Volllaststunden	
	Volllaststunden	

REFERENZANLAGEN für den Leistungsbereich von 15- 50 MW <sub>fuel</sub>			
Name der Referenzanlage	Wasser- gehalt[4] Brenn- stoff [%]	Art der Biomasse	Brennstoff- wärmeleistung
REFERENZANLAGE			
REFERENZANLAGE			
REFERENZANLAGE			
REFERENZANLAGE			
REFERENZANLAGE			
REFERENZANLAGE			
REFERENZANLAGE			

### [1] Brennstoffspezifikationen

Elementaranalyse des Referenzbrennstoffs		
Kohlenstoff	Gew-%	24,78%
Wasserstoff	Gew-%	2,86%
Stickstoff	Gew-%	0,15%
Sauerstoff	Gew-%	21,15%
Schwefel	Gew-%	0,04%
Asche	Gew-%	1,03%
Wassergehalt[4]	Gew-%	<b>50,00%</b>

Spurenelementanalyse des Referenzbrennstoffs		
Ca	mg/kg wf	7.424,80
Mg	mg/kg wf	869,9
K	mg/kg wf	1.546,70
Na	mg/kg wf	103,5
Cl	mg/kg waf	120,2

### [2] Brennstoffspezifikationen

Elementaranalyse des Referenzbrennstoffs		
Kohlenstoff	Gew-%	44,60%
Wasserstoff	Gew-%	5,15%

## 9 Anhang

Stickstoff	Gew-%	0,26%
Sauerstoff	Gew-%	38,06%
Schwefel	Gew-%	0,07%
Asche	Gew-%	1,85%
Wassergehalt [4]	Gew-%	<b>10,00%</b>

<b>Spurenelementanalyse des Referenzbrennstoffs</b>		
Ca	[mg/kg wf]	7.424,80
Mg	[mg/kg wf]	869,9
K	[mg/kg wf]	1.546,70
Na		103,5
<b>Cl</b>	[mg/kg waf]	120,2

[4] Wassergehalt =  $\frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse Wasser} + \text{Masse Trockensubstanz}}$

