

# Anlagenplanung und wirtschaftliche Aspekte

erschieden in:

*Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, Springer VDI  
Verlag, R. Marutzky, 9/1997*

*Vortrag: VDI Seminar 10/1996, Salzburg und 12/1997, Düsseldorf*



*Dipl.-Ing. Jens Kötting  
IGEU Cramer, Ganter, Kötting GbR mbH  
Fichtenstraße 2, 82061 Neuried  
Tel.: 0 89 / 7 59 83 34 Fax: 0 89 / 7 59 83 39*

1. Einführung .....	1
2. Rahmenbedingungen für ein Heizkraftwerk.....	2
3. Brennstoff .....	4
4. Genehmigungsverfahren nach BImSchG .....	8
5. Verfahrenstechnik .....	9
5.1 Feuerung / Dampferzeuger.....	9
5.2 Rauchgasreinigung .....	14
5.3 Energieauskopplung.....	16
5.4 Reststoffverwertung / -entsorgung.....	17
6. Förderung .....	18
7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	20
7.1 Vergleich zu fossilen Primärenergieträgern.....	20
7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am konkreten Beispiel .....	21
8. Zusammenfassung .....	23

## 1. Einführung

Der vorliegende Artikel soll Anforderungen an Biomassefeuerungsanlagen, Probleme, Schwierigkeiten, aber auch Möglichkeiten bei der Durchführung und Realisierung, vor die potentielle Investoren und Betreiber sowie Planer gestellt werden, exemplarisch erläutern. Als oberstes Gebot für alle Maßnahmen



steht nicht nur die technische, sondern vor allem die wirtschaftliche Realisierbarkeit. Grundvoraussetzung für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage ist aber immer die Zuverlässigkeit der installierten Technik.

Das Ziel der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, wenn es um die Thematik von Biomassefeuerungsanlagen und die Nutzung regenerativer Energien geht, schon oft genug und detailliert beschrieben worden. Nur dieser Zielsetzung ist es zu verdanken, daß mit der Bereitstellung von Fördergeldern die Errichtung von Heizwerken und Heizkraftwerken auf der Basis von biogenen Brennstoffen bei der derzeitigen Preissituation der konkurrierenden fossilen Brennstoffe realisiert werden konnte und kann.

In Deutschland erfolgt die Zuwendung von Zuschüssen durch die Staatsministerien für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Bundes und der Länder in Zusammenarbeit mit Fachverbänden wie z.B. FNR e.V. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) und C.A.R.M.E.N. e.V. Des weiteren gibt es EU-Förderprogramme. Im Programm CEET - umweltfreundliche und effiziente Energietechnologien - werden Fördermittel für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (JOULE) und Demonstrationsvorhaben (THERMIE) bereitgestellt.

Mit Hilfe des im Jahr 1990 eingeführten Stromeinspeisegesetzes, in dem die Tarife für eingespeisten Strom aus regenerativen Energieträgern festgelegt wurden, steht ein sehr gutes Hilfsmittel zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung zur Verfügung. Diese trägt, gerade bei dezentralen Anlagen, wesentlich zur Steigerung der Brennstoffausnutzungsgrade gegenüber reinen Kraftwerken bei. Die erforderlichen Investitionskosten, die für die zusätzliche Stromerzeugung gegenüber reinen Heizwerken notwendig sind, können damit ausgeglichen werden.

Bei der Realisierung bisheriger Projekte hat sich gezeigt, daß diese in nahezu allen Fällen von engagierten Investoren mit einem guten Schuß „Idealismus“ durchgeführt wurden. Die Bevölkerung ist, auch wenn sich dies im Zuge des gestiegenen Umweltbewußtseins bereits vielfach geändert hat, immer noch relativ skeptisch gegenüber Heiz- und Heizkraftwerken auf der Basis biogener Brennstoffe. Nur bei Berücksichtigung der nachfolgend genannten Punkte wird es gelingen, die Akzeptanz für diese Anlagen in der Bevölkerung zu erhöhen:

- Minimierung der Schadstoffemissionen
- Vermeidung von optischen Emissionen (Wasserdampffahne)
- Minimierung von Schallemissionen
- Rentabilität gegenüber der Nutzung fossiler Energieträger.

## **2. Rahmenbedingungen für ein Heizkraftwerk**

Die folgenden Darstellungen sollen an Hand eines fiktiven Projektes verdeutlicht werden. Als erster Schritt erfolgt die Festlegung der möglichen Anlagenleistung. Um eine Kraft-Wärme-Kopplung mit einer Dampfturbine realisieren zu können, muß die minimale Feuerungswärmeleistung je nach gewählten Dampfparametern bei ca. 5...7 MW liegen. Nach oben hin begrenzt wird die mögliche Feuerungswärmeleistung zum einen durch auftretende Logistikprobleme bei der Brennstoffversorgung. Die Lieferung von naturbelassenen Hölzern sollte aus einem Umkreis von max. 50...100 km vom Standort der geplanten Anlage aus erfolgen. Größere Entfernungen sind nicht zu empfehlen, da die Transportkosten auf Grund

geringer Schüttdichten und hoher Volumina zu groß werden. Zum anderen erfolgt eine Begrenzung durch das Stromeinspeisungsgesetz. Die dort festgeschriebene Vergütung für eingespeisten Strom aus Biomasse, die im Jahr 1998 bei 14,92 Pf/kWh liegt, gilt nicht für Anlagen mit einer installierten Generatorleistung über 5 MVA (lt. Gesetzestext: „... über 5 MW“<sup>1</sup>). Die Möglichkeit und die Höhe der Einspeisung ist im Vorfeld der Planung auf jeden Fall mit dem zuständigen EVU zu klären. Somit ergibt sich eine maximale Feuerungswärmeleistung, die je nach Höhe der Wärmeauskopplung, bei ca. 30 MW liegt. Bei diesen Feuerungswärmeleistungen kommen allerdings nur noch wenige Standorte für die Anlage in Betracht.

Die Feuerungswärmeleistung der betrachteten, fiktiven Anlage wird somit auf 10 MW festgelegt.

Die dargestellte Anlage soll „auf der grünen Wiese“ errichtet werden. Es wird kein holzverarbeitender Industriebetrieb betrachtet, der sich bei der Brennstoffbeschaffung die eingesparten Entsorgungskosten als Erlös gutschreiben könnte oder evtl. schon über die entsprechende Peripherie für die Anbindung der Feuerungsanlage verfügt. Da das Brennstoffband bei Industriebetrieben bereits eingegrenzt und eine gesicherte Energieabnahme vorhanden ist, können eine allzu große „Variantenvielfalt“ bei der Auslegung der Anlage und Planungsunsicherheiten weitgehend ausgeschlossen werden. Unter diesen Randbedingungen ist eine Realisierung in den meisten Fällen wirtschaftlich sinnvoll.

Auf Grund der relativ hohen Brennstoffdurchsatzleistungen bei der gewählten Feuerungswärmeleistung (je nach Betriebsstunden ca. 20.000 Mg/a atro) reicht, im Vergleich zu kleinen Heizwerken, die Verfeuerung von Hackschnitzeln aus der näheren Umgebung meist nicht mehr aus. Es müssen daher i.d.R. Resthölzer aus der holzverarbeitenden Industrie in die Brennstoffpalette aufgenommen werden. Dies ist meist nicht nur aus Logistikgründen erforderlich, sondern auch um die Wirtschaftlichkeit des Biomasse-Heizkraftwerkes sicherzustellen.

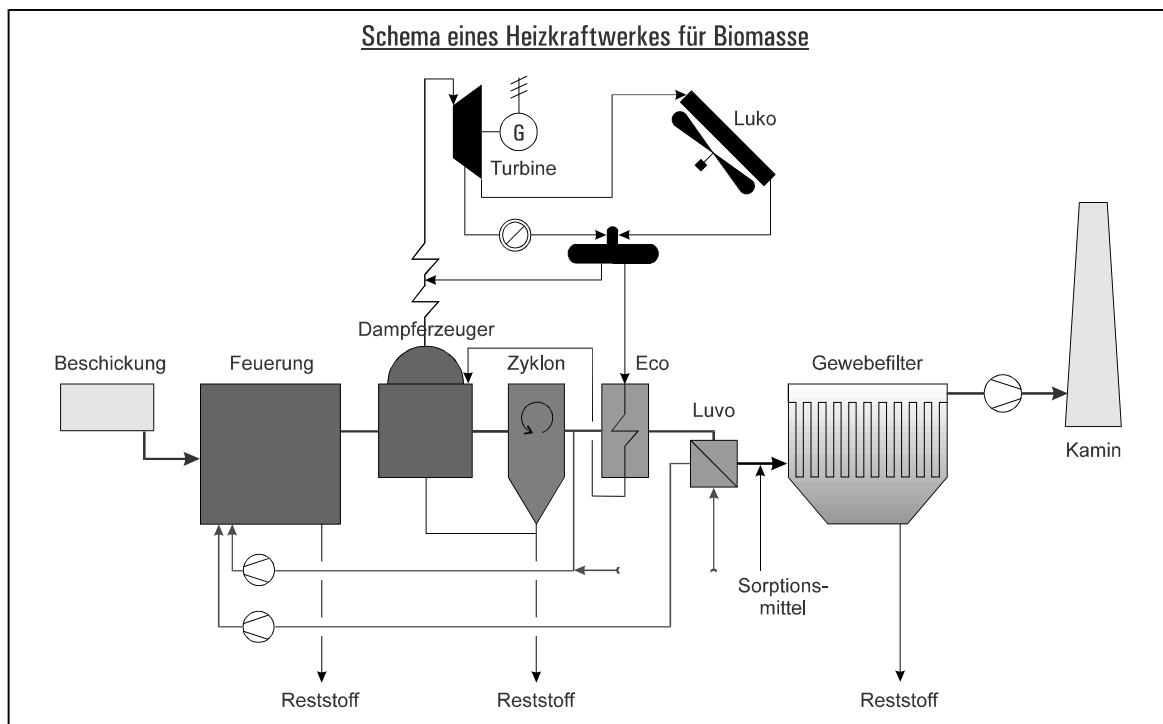
Aus Gründen der Flexibilität und der Wirtschaftlichkeit sollte die Feuerung inkl. der Rauchgasreinigung so ausgelegt werden, daß es ohne größeren Aufwand möglich ist, die Anlage zu einem späteren Zeitpunkt für die Verbrennung von Altholz nachzurüsten. Die Auslegung der Anlage hat dabei für Brennstoffe nach Nr. 1.3 des Anhangs der 4. BImSchV unter Berücksichtigung der Emissionsgrenzwerte und der feuerungstechnischen Anforderungen der 17. BImSchV zu erfolgen.

Dies betrifft vor allem die Komponenten Feuerung / Dampferzeuger und Rauchgasreinigung. Als Stichworte seien nur „2 Sekunden Verweilzeit bei > 850 °C“ und „NO<sub>x</sub>-Reduzierung der Rauchgase“ genannt.

Der Standort der Anlage ist so zu wählen, daß eine günstige Infrastruktur für die Brennstoffbeschaffung, für die Wärmelieferung in Form von Heißwasser und / oder Prozeßdampf und für die elektrische Anbindung gegeben ist.

Die jährliche Betriebszeit der Anlage soll ca. 8.000 h/a betragen, die Wärmeversorgung hat gesichert über das ganze Jahr (> 8.600 h/a) zu erfolgen. Betriebsstunden in dieser Größenordnung sind erforderlich, wenn industrielle Abnehmer mit Prozeß- und Heizwärme versorgt werden müssen. Damit muß gerade bei den Kernkomponenten eine hohe Verfügbarkeit gewährleistet sein. Die Wärmeversorgung wird über einen Reservekessel, der mit Heizöl EL oder Erdgas betrieben wird, sichergestellt.

Das nachfolgende Schema stellt exemplarisch das Gesamtkonzept eines Biomasse-Heizkraftwerkes dar.



Das Biomasse-Heizkraftwerk soll Hochdruckdampf, der über eine Kraft-Wärme-Kopplung zur Erzeugung von Strom und Versorgung mit Wärme genutzt wird, produzieren. Der erzeugte Strom dient zum einen zur Deckung des Eigenbedarfes, der ca. 10 % der gesamten Stromerzeugung ausmacht, zum anderen zur Einspeisung in das öffentliche Netz.

### 3. Brennstoff

Der Brennstoff stellt einen der wichtigsten Aspekte für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage dar und ist gleichzeitig auch derjenige, der sich im Vorfeld nur relativ ungenau kalkulieren läßt.

Bereits in der Anfangsphase des Projektes sollten die Investoren Gespräche mit möglichen Brennstofflieferanten führen, um deren Bereitschaft zur Lieferung zu testen und die Preise in einem gewissen Rahmen abzustecken. Gleichzeitig läßt sich das Brennstoffaufkommen in der Region feststellen. Je mehr die Auslegung der Feuerungsanlage speziell auf einen bestimmten Brennstoff erfolgt, desto wichtiger ist es für den Betreiber, die Liefermenge und deren Preis im Vorfeld festzulegen. Gerade in der Planungsphase ist es jedoch nur in wenigen Fällen möglich, verbindliche Aussagen des Lieferanten über mögliche Mengen, geschweige denn Qualitäten, des Brennstoffes zu erhalten.

Änderungen im Preisgefüge, die durch starke Schwankungen auf dem Papier- und Schwachholzmarkt hervorgerufen werden, treten zwangsläufig auf. Bei einem Brennstoffbedarf von 20.000 Mg/a bedeutet

bereits eine Erhöhung des Brennstoffpreises um 5 DM/Mg, das entspricht je nach Ausgangsbasis einer Erhöhung von ca. 4...10 %, einen nicht rentablen Betrieb der Anlage.

Aus diesem Grund sollte eine Feuerungsanlage in dieser Größenordnung so ausgelegt werden, daß sie in gewissen Grenzen flexibel auf Änderungen des Brennstoffes reagieren kann.

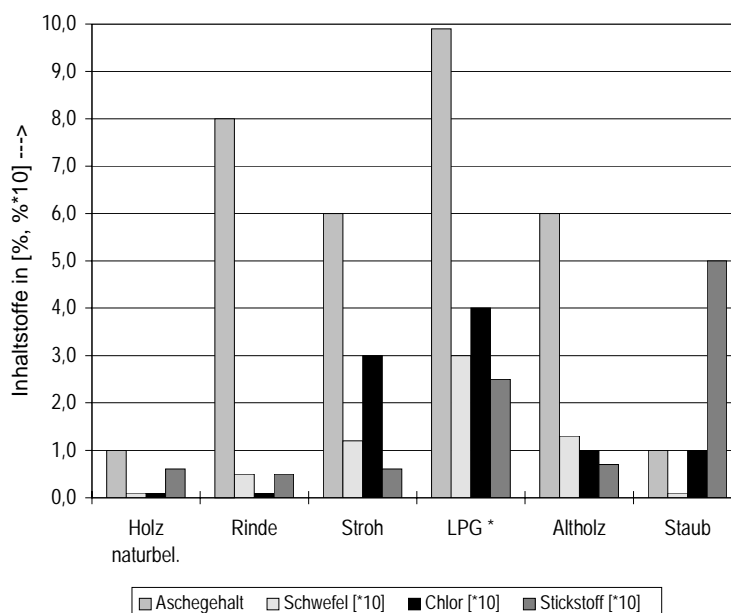
Um aber die Investitionskosten der Feuerungsanlage nicht zu sehr in die Höhe zu treiben, sollte ein Kompromiß bezüglich der gewählten Brennstoffpalette gebildet werden. Dieser Kompromiß bezieht sich hauptsächlich auf den Wassergehalt und die Stückigkeit des Brennstoffes. Diese beiden Größen beeinflussen maßgeblich die erforderliche Rostlänge und die erwünschte bzw. erforderliche Ausbrandqualität am meisten.

Die Wahl der Brennstoffpalette hat natürlich auch Auswirkungen auf die zu wählende Rauchgasreinigung: Selbst beim Einsatz von naturbelassenen Brennstoffen kann auf eine Trockensorption zur Abscheidung von Halogenen im Rauchgas in den meisten Fällen nicht verzichtet werden, wenn Landschaftspflegegut, Stroh und Heu im Brennstoffband enthalten sind.

Folgende Tabellen zeigen exemplarisch die Schwankungen der chemischen Zusammensetzung biogener Brennstoffe:<sup>2/3/4/5/6/7/8</sup>

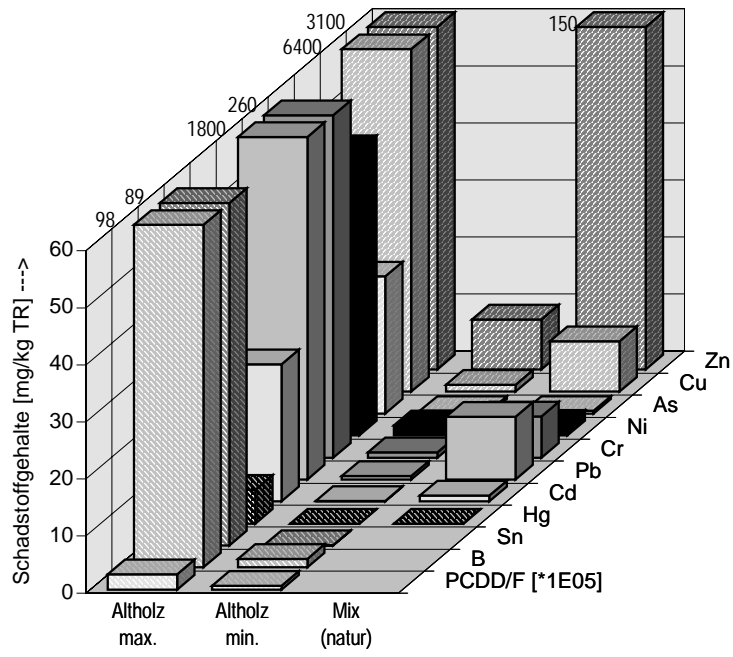
### **Zusammensetzung biogener Brennstoffe**

(Nur emissions- bzw. reststoffrelevante Inhaltstoffe)

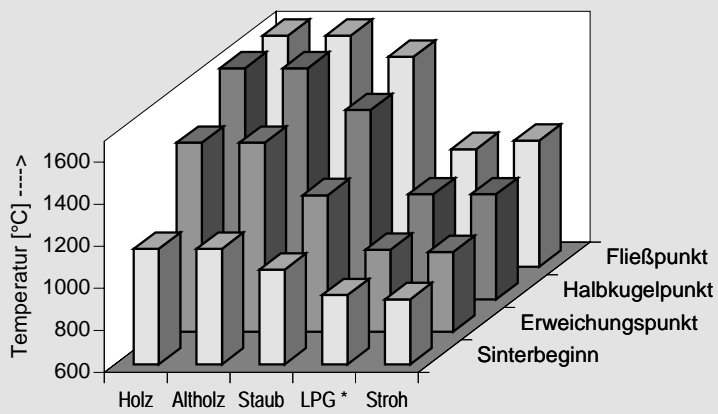


\* LPG = Landschaftspflegegut

### Schadstoff- und Schwermetallgehalte biogener Brennstoffe



### Ascheschmelzverhalten biogener Brennstoffe im Vergleich



\* LPG = Landschaftspflegegut

Wie aus den relativ großen Schwankungen der Brennstoffzusammensetzung entnommen werden kann, muß für die Auslegung von Feuerungs- und Rauchgasreinigungsanlage der Grundsatz lauten: Es muß ein vernünftiger Kompromiß gefunden werden, der gleichzeitig einen flexiblen Betrieb ermöglicht und moderate Investitionskosten gewährleistet.

Ein möglicher Brennstoffmix kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Dieser Mix ergibt sich aus dem maximal möglichen Brennstoffpreis, der zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit angesetzt werden kann. Bei der Zusammenstellung des Brennstoffmixes ist auf die Auflagen des jeweiligen Förderbescheides Rücksicht zu nehmen (s. Ziffer 6).

Maximaler Brennstoffpreis	75 DM/Mg atro			
Anteil aus Land- und Forstwirtschaft	50 %			
Brennstoffart	Preisspanne DM/Mg atro	Mittlerer Preis DM/Mg atro	Anteil %	Kosten DM/Anteil atro
1. Waldhackschnitzel	90...140,--	110,--	30	33,--
2. Rinde	ca. 10,--	10,--	10	1,--
3. Stroh / Landschaftspflegegut	110...130,--	120,--	max. 10	12,--
4. Sägerestholz	ca. 80,--	80,--	20	16,--
5. Sägespäne	75...110,--	90,--	Verzicht	0,--
6. Restholz nach Ziffer 1.2 a) aa, bb der 4. BImSchV	ca. 25,--	25,--	30	7,50
			Summe	69,50 DM/Mg

Für die Lagerung der Brennstoffe sollten große Flächen zur Verfügung gestellt werden können. Das ermöglicht einen arbeitsexensiven Betrieb bei der Beschickung der Feuerung und höhere Flexibilität bei der Brennstoffbeschaffung. Günstige Brennstoffe können so gekauft und über einen längeren Zeitraum am Heizkraftwerk gelagert werden. Des weiteren kann eine Vergleichmäßigung der Brennstoffqualität erfolgen. Ein großer Teil des Brennstoffes (insbesondere grobstückiges Material) kann auf einer nicht überdachten, nach Möglichkeit betonierten Außenfläche gelagert werden. Es hat sich gezeigt, daß die Brennstoffe selbst bei ungünstigen Witterungsbedingungen wenig Feuchtigkeit aufnehmen. Der Effekt der Vortrocknung durch eine bessere Durchlüftung überwiegt bei feuchten Hölzern meist den „Anfeuchtungseffekt“. Nur in den Wintermonaten ist darauf zu achten, daß mit dem Brennstoff nicht größere Mengen Schnee und Eis in die Feuerung gefahren werden.

Um einen zu starken Temperaturanstieg im Inneren des Brennstofflagers zu vermeiden, ist auf eine gute Durchlüftung zu achten. Die Gefahr der Selbstentzündung bei feuchten Brennstoffen, die bei Lagerzeiten über mehrere Monate besteht, muß auf jeden Fall ausgeschlossen werden.

#### 4. Genehmigungsverfahren nach BImSchG

In Deutschland werden drei Kategorien für die Genehmigung einer Anlage unterschieden: förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG, vereinfachtes Genehmigungsverfahren nach § 19 BImSchG und „keine Genehmigungspflicht“.

Dem schriftlichen Genehmigungsantrag nach § 10 BImSchG sind alle zur Beschreibung der Anlage erforderlichen Unterlagen in Form von Zeichnungen und Erläuterungen beizufügen. Bei Vollständigkeit der Unterlagen hat die zuständige Behörde das Vorhaben öffentlich bekanntzumachen. Die Unterlagen sind einen Monat zur Einsicht auszulegen, bis zwei Wochen nach Auslegungsfrist können Einwendungen gegen das Vorhaben schriftlich erhoben werden. Sämtliche Einwendungen werden bei einem Erörterungstermin besprochen. Über den Genehmigungsantrag ist nach Eingang des Antrags innerhalb einer Frist von sieben Monaten zu entscheiden, eine Verlängerung dieser Frist um drei Monate ist bei besonderen Schwierigkeiten möglich.<sup>9</sup>

Ein vereinfachtes Verfahren kann erfolgen, wenn die von der Anlage hervorgerufenen Umwelteinwirkungen, Nachteile etc. mit dem Schutz der Allgemeinheit vereinbar sind. Bei einem vereinfachten Genehmigungsverfahren erfolgt keine Beteiligung der Öffentlichkeit. Die Antragsunterlagen müssen nicht öffentlich ausgelegt werden.<sup>10</sup>

Die nachstehende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Kriterien für Einteilung in die unterschiedlichen Genehmigungsverfahren nach BImSchG:<sup>11</sup>

Brennstoff	1. BImSchV Genehmigung nicht erforderlich	Einteilung gemäß 4. BImSchV Genehmigung	
		vereinfacht (§ 19 BImSchG) Spalte 2	förmlich (§ 10 BImSchG) Spalte 1
naturbelassenes, stückiges Holz einschließlich Rinde, Reisig und Zapfen	FWL * < 1 MW	Nr. 1.2	Nr. 1.2
naturbelassenes, nichtstückiges Holz in Form von Sägemehl, Spänen, Schleifstaub oder Rinde	15 kW < FWL < 1 MW	1 MW ≤ FWL < 50 MW	FWL ≥ 50MW
gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz (ohne Holzschutzmittel und Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen [PVC])	50 kW < FWL < 1 MW	1 MW ≤ FWL < 50 MW	Nr. 1.2 FWL ≥ 50MW
Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten, verleimtes Holz (ohne Holzschutzmittel und Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen [PVC])			
Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe	15 kW < FWL < 100 kW	Nr. 1.3 100 kW ≤ FWL < 1 MW	Nr. 1.3 FWL ≥ 1MW
Holz mit halogenorganischer Beschichtung, Holz mit Holzschutzmitteln (Imprägnierungen)	Einsatz nicht erlaubt	Nr. 1.3 100 kW ≤ FWL < 1 MW	Nr. 1.3 FWL ≥ 1MW

\* FWL = Feuerungswärmeleistung

Für eine Anlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 10 MW kann ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren erfolgen, wenn ausschließlich naturbelassene Hölzer zum Einsatz kommen. Für die oben gewählte Brennstoffpalette ist ein förmliches Genehmigungsverfahren erforderlich.

Der verwendete Brennstoff hat natürlich auch Auswirkungen auf die zu erwartenden Emissionsgrenzwerte. Die in den Gesetzen festgeschriebenen Werte können dabei durch die Genehmigungsbehörden grundsätzlich dynamisiert und dem Stand der Technik angepaßt werden. Mit einer Verschärfung der

Grenzwerte ist außerdem zu rechnen, wenn bereits eine überdurchschnittlich hohe Vorbelastung am geplanten Standort der Anlage besteht.

Die Emissionsgrenzwerte richten sich zum einen nach der Art der eingesetzten Brennstoffe, zum anderen nach der installierten Feuerungswärmeleistung. Brennstoffe nach Nr. 1.2 der 4. BImSchV fallen dabei grundsätzlich in die TA-Luft. Bei Brennstoffen nach Nr. 1.3 wird unterschieden: Bei der Verbrennung von Stroh, Landschaftspflegegut, Hölzer mit halogenorganischen Beschichtungen werden die Grenzwerte der TA-Luft herangezogen, die thermische Nutzung von Altholz (z.B. Hölzer mit Holzschutzmitteln, Hölzer unbekannter Herkunft) fällt unter die 17. BImSchV.

## **5. Verfahrenstechnik**

Auf eine detaillierte Beschreibung der möglichen Anlagentechnik wird nachfolgend weitgehend verzichtet, um bei den Lesern dieses Buches keine Voreingenommenheit gegenüber Herstellern und ihren Produkten zu erzeugen. Es wird darauf hingewiesen, daß sich die nachfolgenden Ausführungen insbesondere auf die oben gewählte Leistungseinheit der Feuerungsanlage beziehen. Die beschriebenen Verfahren sind, wenn nicht ausdrücklich auf etwas anderes hingewiesen wird, ausreichend erprobt, so daß sie als Stand der Technik bezeichnet werden können. Gerade im Bereich der Rauchgasreinigung werden immer wieder neue Verfahren und Betriebsmittel entwickelt, die zu einer Senkung der Investitions- und Betriebskosten führen können. Einer Weiterentwicklung der vorhandenen Technik(-en) steht der Autor natürlich positiv gegenüber.

### **5.1 Feuerung / Dampferzeuger**

Die nachfolgende Betrachtung soll exemplarisch an einer Rostfeuerungsanlage durchgeführt werden. In diesem Leistungsbereich sind sicherlich auch Einblas- und Wirbelschichtfeuerungen sowie Vergasungstechnologien in Betracht zu ziehen. Ein ausführlicher Vergleich würde jedoch über den Rahmen dieses Beitrages hinausgehen. Es soll nur kurz aufgezeigt werden, wieso die Wahl in diesem Fall auf die Rostfeuerungsanlage fiel.

Die Einblasfeuerungsanlage ist eine, in Bezug auf die Investitionskosten, kostengünstige Alternative zur Rostfeuerungsanlage. Die Investitionskosten für mehrere Roststufen, deren Antriebe und Steuerung sowie evtl. die komplette Entaschungsanlage können entfallen. Der Haupteinsatzbereich der Einblasfeuerungsanlage ist die Verbrennung von inertstoffarmen Brennstoffen. Die enthaltenen Inertstoffe können über den Rauchgasweg ausgetragen werden. Eine entsprechende Aufbereitung der Brennstoffe ist in den meisten Fällen erforderlich, wenn nicht ein Lieferant für Späne und Stäube vorhanden ist. Die Betriebskosten für eine evtl. Aufbereitung der Brennstoffe sind dadurch höher als bei der Rostfeuerungsanlage. Für die Aufbereitung muß mit Kosten in Höhe von 7...15 DM/Mg gerechnet werden. Die Einblasfeuerungsanlage eignet sich sehr gut für Umbauten an bestehenden Anlagen, da der vorhandene Kesselkörper in den meisten Fällen nicht verändert werden muß. Auch die Kombination mit einer Rostfeuerungsanlage bietet sich an. Die Emissionen, hauptsächlich  $\text{NO}_x$ , können bei der Einblasfeuerungsanlage durch konstruktive Vorkehrungen positiv beeinflusst werden.

den. Die Erzeugung eines Dralls bei der Verbrennungsluftzuführung entspricht einer „inneren Rauchgasrezirkulation“.<sup>12/13</sup> Der weitergehende Einfluß der Rauchgasrezirkulation wird weiter unten beschrieben.

Die Wirbelschichtfeuerung bietet andere Vorteile: Zum einen die thermische Nutzung von sehr feuchten Brennstoffen, da keine stabile Flamme benötigt wird und über das Sandbett eine sehr gute Vortrocknung stattfindet, zum anderen eine „geringere“ Aufbereitung der Brennstoffe gegenüber der Einblasfeuerung. Die Wirbelschichtfeuerung zeichnet sich durch gute Verbrennungsbedingungen und niedrige Emissionen aus. Die Verwertbarkeit der Reststoffe ist allerdings durch den Anteil des Sandes, der nicht abgeschieden werden kann, beeinträchtigt. Des weiteren ist bei der Verfeuerung von Brennstoffen mit niedrigen Schlackeerweichungspunkten großer Wert auf die Regelung der Betttemperatur zu legen. Schlackeerweichung oder gar -verflüssigung führen zwangsläufig zum Stillstand der Anlage. Je größer die Feuerungswärmeleistung, desto günstiger wird der Einsatz der Wirbelschichtfeuerung gegenüber einer Rostfeuerung. Die spezifischen Investitionskosten gehen bei der Wirbelschichtfeuerung zurück, die Rostfeuerung dagegen muß größeren Leistungen mehrbahnig ausgeführt werden, so daß die spezifischen Kosten nahezu linear steigen.

Die Vergasungstechnologie wird nicht betrachtet, da nach derzeitigem Stand der Technik eine Kraft-Wärme-Kopplung über Gasmotor oder Gasturbine mit hohen Verfügbarkeiten nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand realisierbar erscheint.

Die Rostfeuerung ist eine Komponente, die sich, wie in dem hier dargestellten Fall, für den Einsatz in einer Neuanlage als auch für die Umrüstung einer Altanlage, entsprechende Platzverhältnisse vorausgesetzt, eignet. Bei einer Rostfeuerung ist die Flexibilität in Bezug auf Stückigkeit und Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffes am größten.

Die Gestaltung des Feuerraumes wird wesentlich durch die Brennstoffbeschaffenheit beeinflusst. Grundsätzlich lassen sich die Gleich-, Mittel- und Gegenstromfeuerung einsetzen. Bei sehr nassen Brennstoffen, beispielsweise bei der Verfeuerung von Rinde, ist darauf zu achten, daß die Konstruktion in Richtung Gleichstromfeuerung tendiert. Über eine lange Zünddecke erfolgt dabei eine Vortrocknung des Brennstoffes. Um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten, muß der ausgasende Volumenstrom an der Umlenkung in den Kessel von der Sekundärluft erfaßt werden.

Bei trockenen Brennstoffen mit hohen Heizwerten kann die Zünddecke kleiner ausgebildet werden, um die thermische Beanspruchung der Decke durch Strahlungswärme zu reduzieren (Gegenstromfeuerung).

Bei einer weitgehend unbekanntem Brennstoffpalette ist die Mittelstromfeuerung sehr günstig, da man mit ihr flexibel auf primärseitige Änderungen reagieren kann. Dies ist gerade zur Vermeidung von Emissionen wie  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}$  sehr wichtig.

Zu den primärseitigen Maßnahmen zur Vermeidung / Minimierung von Emissionen gehört eine optimale Verbrennungsluftverteilung. Es wäre wünschenswert, wenn sich die Verbrennungsluftmengen unter den jeweiligen Roststufen einzeln ein- bzw. verstellen lassen. Dadurch kann die Lage der Hauptverbrennungszone beeinflusst werden. Aus Kostengründen ist die automatische Regelung der einzelnen Volumenströme jedoch i.d.R. nur bei größeren Anlagen durchführbar.

Bei stark schwankenden Wassergehalten und Zusammensetzungen des Brennstoffes ist der Einsatz von Rauchgasrezirkulat unter den ersten Roststufen ein mögliches Mittel, um die Hauptverbrennung zu steuern und gleichzeitig den Gesamtwirkungsgrad der Anlage zu erhöhen. Bei sehr nassen Brennstoffen kann die, nach Möglichkeit vorgewärmte, Verbrennungsluft unter der (den) ersten Roststufe(-n) komplett durch Rauchgasrezirkulat ersetzt werden. Das hat den Vorteil, daß kein überschüssiger Sauerstoff, der nicht für die eigentliche Verbrennung benötigt wird, in die Feuerung eingebracht werden muß. Bei sehr trockenen Brennstoffen kann in der Entgasungszone ebenfalls Rauchgasrezirkulat zum Einsatz kommen. Die Lage der Hauptverbrennung auf dem Rost läßt sich somit weiter nach hinten verlegen. Eine eventuell vorhandene lange Zünddecke kann so vor thermischem Verschleiß besser geschützt werden. Des Weiteren kann bei der Verbrennung von trockenen Brennstoffen Rauchgasrezirkulat unter dem Ausbrennrost eingesetzt werden, da die vollständige Verbrennung meist schon abgeschlossen und damit nur ein Kühlmedium für die letzte (-n) Roststufe(-n) erforderlich ist.

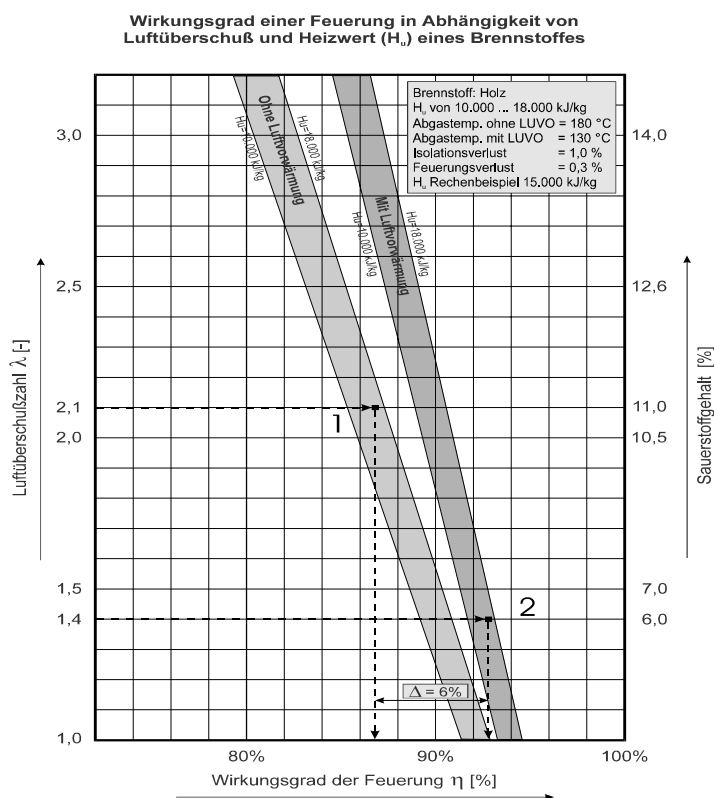
Die Verwendung von Rauchgasrezirkulat setzt voraus, daß die Kondensation des Rauchgases in den Rohrleitungen, in den Luftkästen unter dem Rost und in den Roststäben vermieden werden kann, insbesondere wenn im Rauchgas saure Schadstoffkomponenten enthalten sind. Des Weiteren ist zumindest eine Vorentstaubung des Rezirkulates erforderlich, um Verschmutzungen zu verringern.

Auch die Sekundärluft, die mittlerweile einen entscheidenden Beitrag zur Verminderung der Primäremissionen leistet, kann weitgehend durch Rauchgasrezirkulat ersetzt werden. Das hat folgende Vorteile: Zum einen kann die Feuerungsanlage mit niedrigeren Restsauerstoffgehalten betrieben werden, wodurch der Abgasverlust entsprechend gesenkt wird, zum anderen tritt nur eine verminderte Strahlenbildung gegenüber einer Eindüsung mit nicht vorgewärmter Sekundärluft auf (geringerer Zähigkeitsunterschied). Durch die Reduzierung des Abgasverlustes, die aus einer Verminderung des Rauchgasvolumenstromes resultiert, kann die nachgeschaltete Rauchgasreinigung (hier vor allem das Gewebefilter, bei Althölzern evtl. zusätzlich der Katalysator) kleiner dimensioniert werden. Dies führt zu einer Senkung der Investitionskosten.

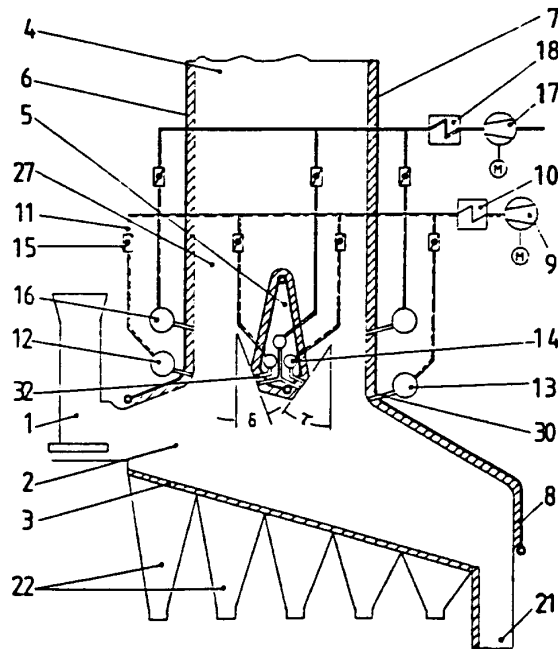
Das nachfolgende Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen Heizwert der Brennstoffe, Luftüberschuß und Wirkungsgrad einer Anlage ohne und mit Luftvorwärmung. Punkt 1 stellt den Betrieb einer Feuerung mit einem Sauerstoffgehalt der Rauchgase von 11 % dar. Die Abgastemperatur beträgt 180 °C. Der Luftüberschuß ergibt sich aus der möglichen Verbrennungs- bzw. Feuerraumtemperatur, wenn kein Rauchgasrezirkulat eingesetzt wird. Punkt 2 enthält zwei Änderungen gegenüber dem vorherigen Betriebszustand: Zum einen erfolgt die Vorwärmung der Verbrennungsluft, so daß eine Abgastemperatur von 130 °C erreicht wird, zum anderen wird Rauchgasrezirkulat als Sekundärluft eingesetzt, so daß der Luftüberschuß auf  $\lambda = 1,4$  gesenkt werden kann, ohne daß die Feuerraumtemperaturen ansteigen. Die Senkung der Abgastemperatur allein ergibt eine Verbesserung des Wirkungsgrades von ca. 87 % auf ca. 90 %. Durch die Senkung des Abgasvolumenstroms, die sich durch die Rauchgasrezirkulation ergibt, kann der Wirkungsgrad um weitere drei Prozentpunkte auf ca. 93 % angehoben werden. In Summe ergibt sich damit eine absolute Verbesserung des Wirkungsgrades von 6 %. Die besondere Bedeutung des Gesamtwirkungsgrades für die Wirtschaftlichkeit der Anlage wird unter Ziffer 7, Sensitivitätsanalyse, dargestellt.

Die Menge des Rezirkulates ist so zu wählen, daß die möglichen Feuerraumtemperaturen nicht überschritten werden. Das betrifft vor allem die Brennstoffe mit niedrigen Schlackeerweichungspunkten (z.B. Stroh, Landschaftspflegegut, Heu).

Die Verbrennungsluft sollte so weit wie möglich vorgewärmt werden, um den Gesamtwirkungsgrad der Anlage anzuheben. Auf Grund der sich aus der Verbrennungsluftvorwärmung ergebenden niedrigen Abgastemperatur sind die Wärmetauscher, speziell der Luftvorwärmer nach der Rauchgasreinigung, und der Kamin vor Korrosion durch Kondensatbildung zu schützen. Bei Verbrennungsrosten mit metallischer Oberfläche muß die Kühlung der Roststäbe gewährleistet sein. Dies kann z.B. durch eine Wasserkühlung erfolgen. Anderenfalls ist die Temperatur der Verbrennungsluft entsprechend zu begrenzen.



Die dargestellte, schematische Schnittzeichnung durch einen Dampferzeuger stellt eine neue Art der Sekundärlufteindüsung dar, die sich aus einer Weiterentwicklung von bekannten Konzepten (z.B. „Temelli-Balken“, „Ausbrennbalken“, „Wassergekühlter Sekundärluftbalken“) ergibt. Die Sekundärluft bzw. das Rauchgasrezirkulat wird nicht nur über Düsen an der Vorder- und Rückwand in den Feuerraum eingeblasen, sondern auch über ein Prisma im Rauchgasweg. Der Vorteil einer derartigen Anordnung ist, daß der erforderliche Impuls und die erforderlichen Eindringtiefen der Sekundärluft für eine gute Verwirbelung der Rauchgase kleiner sind. Dadurch wird die Bildung von Strähnen weiter reduziert. Die Eindüsung wird wassergekühlt (als Teil des Dampferzeugers) ausgeführt, um den thermischen Verschleiß gering zu halten.



Modifizierte Sekundärlufteindüsung („IBB-Prisma“, Patent angemeldet: DE 44 01 821 A 1, J. Kümmel)

Als Dampferzeuger wird dem Wasserrohrkessel (WRK) gegenüber dem Flammrohr-Rauchrohrkessel (FRK) der Vorzug gegeben (s. Ziffer 7). Dies wird wie folgt begründet:

Es hat sich gezeigt, daß die Erlöse aus der Stromeinspeisung für die Wirtschaftlichkeit der Anlage eine große Rolle spielen. Aus konstruktiven Gründen ist beim FRK das maximale Druckniveau begrenzt, der erreichbare Wirkungsgrad der Stromerzeugung ist somit beim WRK höher.

Die Überhitzungstemperatur des Dampfes muß je nach Brennstoff begrenzt werden. Bei hohen Chlorgehalten im Rauchgas, die z.B. durch die Verbrennung von Heu, Stroh, etc. hervorgerufen werden, ist eine Temperatur von max. 400...425 °C nicht zu überschreiten. Bei der Verfeuerung von naturbelassenem Holz können Überhitzungstemperaturen von 450 °C und höher gewählt werden.

Bei einem mehrzügigen WRK treten, richtige Auslegung vorausgesetzt, geringere Probleme mit Verschmutzungen auf. Die Abreinigung der einzelnen Wärmetauscherpakete ist leichter zu realisieren als bei einem FRK. Dies ist gerade bei Brennstoffen mit relativ hohen Aschegehalten und niedrigen Schmelzpunkten wichtig. Das Investitionsvolumen für einen FRK liegt i.d.R. niedriger als für einen WRK gleicher Leistung. Durch die höhere Verschmutzungsanfälligkeit der Rauchrohre sollten aber Vorschaltheizflächen berücksichtigt werden, so daß der Investitionsvorteil kleiner wird.

## 5.2 Rauchgasreinigung

Der Einsatz eines Elektrofilters ist für eine Anlage nach TA Luft, in der hauptsächlich naturbelassene Brennstoffe genutzt werden, eine kostengünstige Alternative zum Gewebefilter. Auf Grund des vorgesehenen Brennstoffbandes (Stroh, Heu, Landschaftspflegegut) ist jedoch eine Trockensorption erforderlich, die mit einem Gewebefilter einfacher zu realisieren ist, da das Gewebefilter im Gegensatz zum Elektrofilter keines zusätzlichen Reaktors nach der Eindüsung des Sorptionsmittels bedarf. Mit der Installation eines Gewebefilters können auch die Anforderungen der 17. BImSchV bei einer Nachrüstung der Anlage erfüllt werden.

Bei einem Betrieb der Anlage mit naturbelassenen Brennstoffen kann, im Gegensatz zum Betrieb mit Stroh, Heu etc., lediglich ein Pre-Coating der Schläuche erfolgen, auf eine kontinuierliche Eindüsung von Sorptionsmittel kann verzichtet werden. Dadurch können die Betriebskosten entsprechend gesenkt werden.

Zur Vorentstaubung der Rauchgase und zur Verhinderung von Funkenflug sollte dem Gewebefilter ein Multizyklon vorgeschaltet werden.

Das Gewebefilter sollte bereits so ausgelegt sein, daß die späteren Anforderungen der 17. BImSchV berücksichtigt sind. Dies betrifft die Filterflächenbelastung und damit die Größe, sowie das Schlauchmaterial und den Temperaturbereich, in dem das Gewebefilter betrieben wird. Die Beimischung von Herdofenkoks zum Kalkhydrat muß zur Abscheidung weiterer Schadstoffkomponenten (im wesentlichen Schwermetalle mit hohem Dampfdruck, organische Bestandteile incl. Dioxine) möglich sein. Der Platz für eine evtl. erforderliche Inertisierung des Gewebefilters und der Rückstandssilos ist vorzuhalten. Ob die Inertisierung mit Stickstoff erforderlich ist, hängt u.a. vom Anteil des Herdofenkokes ab.

Die für die Abscheidung optimale Temperatur am Gewebefilter sollte entweder über eine Speisewasservorwärmung oder die Verbrennungsluftvorwärmung eingestellt werden.

Bei der Auslegung der Anlage nach 17. BImSchV ist im Bereich der Rauchgasreinigung oder im Bereich des Dampferzeugers der Platzbedarf für eine Rauchgasentstickung vorzuhalten. Bei der Wahl eines SCR-Verfahrens sollen exemplarisch zwei mögliche Varianten für die Schaltung des Katalysators gezeigt werden: eine low-dust-Variante und eine high-dust-Variante.

Low-dust-Variante: Der Katalysator wird hinter dem Gewebefilter installiert. Vorteil dieses Vorgehens ist, daß der Katalysator nur mit gereinigtem Rauchgas beaufschlagt wird und somit keine Verschmutzungen und Veränderungen des Katalysatormaterials zu befürchten sind. Nachteil dieser Konstellation ist jedoch, daß der Wirkungsgrad des Katalysators ab einer Temperatur von ca. 190 °C und weniger proportional fällt. Da zur Abscheidung von leichtflüchtigen Schwermetallen am Gewebefilter eine möglichst niedrige Temperatur realisiert werden muß, ist ein Kompromiß für die Auslegung beider Aggregate zu finden. Aus diesem Grund ist bei einem Katalysator in low-dust-Schaltung evtl. eine Wiederaufheizung der Rauchgase nach dem Gewebefilter erforderlich. Die Aufheizung erfolgt entweder mit einem Kanalbrenner, bei dem Erdgas eingesetzt werden muß, oder mit einem DaGaVo. Der Einsatz von Erdgas hat

negativen Einfluß auf die Betriebskosten. Bei der Installation eines DaGaVo's ist ein Teil der für die Stromerzeugung vorgesehenen Dampfmenge verloren. Damit sinkt die Netto-Stromerzeugung.

High-dust-Variante: Die Installation des Katalysators erfolgt im Bereich des Dampferzeugers. Die optimale Temperatur liegt bei etwa 300...450 °C. Der Katalysator ist in diesem Bereich allerdings verschmutzungsgefährdet. Diese Variante hat gegenüber der low-dust-Variante größere Auswirkungen auf die anfängliche Auslegung der Anlage. Die Teilung des Dampferzeugers zeigt sich als zweckmäßig, der Economizer wird als separates Bauteil ausgeführt. Bei diesem Vorgehen ergibt sich die Möglichkeit, folgende Schaltung der Komponenten vorzunehmen: „Dampferzeuger - Zyklon - Katalysator - Economizer“. Damit kann die Staubfracht, die in den Katalysator eingebracht wird, deutlich verringert werden. Zudem ist durch die Vorentstaubung der Rauchgase in einem höheren Temperaturbereich von einer besseren Verwertbarkeit der Aschen auszugehen. Gerade bei der Verbrennung von Althölzern können so die Entsorgungskosten gesenkt werden.

Alternativ kann zur Rauchgasentstickung ein SNCR-Verfahren eingesetzt werden. Für das SNCR-Verfahren sind niedrigere Investitionskosten erforderlich, die Betriebskosten steigen aber auf Grund eines höheren Durchsatzes an Reduktionsmitteln. Das SNCR-Verfahren kann empfohlen werden, wenn nur niedrige Abscheidegrade, bis max. 60 %, erforderlich sind. Höhere Abscheidegrade sind nicht erzielbar, da die Emissionen an Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) über den bei neuen Anlagen zu erwartenden Grenzwert von  $5 \text{ mg/m}^3$  ansteigen. Die erforderlichen Ausbiegungen der Kesselrohre in den jeweiligen Temperaturbereichen des Dampferzeugers sind bereits bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Es bleibt anzumerken, daß eine Heißgasentstaubung, wie sie beispielsweise an der TU Graz untersucht wird, weitere Vorteile mit sich bringt (Die Entstaubung der Rauchgase findet hier allerdings in einem höheren Temperaturbereich statt). Bei der thermischen Nutzung von chlorhaltigen Brennstoffen, wie dies Stroh, Heu etc. sind, besteht im Temperaturfenster von 250...450 °C die Gefahr der sog. De-Novo-Synthese, der Neubildung von Dioxinen. „Ausgehend von der Erkenntnis, daß sich Dioxine während der Abkühlphase der Abgase im Rauchgaszug in Gegenwart von Sauerstoff, katalytisch wirkenden Metallchloriden, Kohlenstoff und Chlorgas in einem Temperaturbereich etwa zwischen 250 bis 450 °C bilden, stellt sich die Frage, inwieweit eine Dioxinbildung grundsätzlich vermieden werden kann. Die Idee ist nahelegend, die Flugasche, auf deren Oberflächen die „De-Novo-Synthese“ stattfindet, bereits im Hochtemperaturbereich dem Rauchgasstrom zu entziehen.“<sup>14</sup> Der für die Abscheidung von PCDD erforderliche Anteil an Herdofenkoks im Sorptionsmittel kann somit gesenkt werden.

Eine weitere, wenn auch derzeit relativ kostspielige, Variante ist die Heißgasentstaubung mit Keramikfiltern. Eine Schlackeerweichung ist hier jedoch unter allen Umständen zu vermeiden, um ein Verkleben der Keramikkerzen zu verhindern.

Zusätzlich zu den oben genannten Maßnahmen kann eine Rauchgaskondensation erfolgen. Bei der Rauchgaskondensation wird das Rauchgas vor der Ableitung in die Atmosphäre so stark abgekühlt, daß es zu einer Verflüssigung (Auskondensieren) des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes kommt. Damit können die Abgasverluste der Gesamtanlage gesenkt werden. Der Gesamtwirkungsgrad wird entsprechend angehoben, wenn die im Kondensat enthaltene Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (z.B. Luftvorwärmung, Niedertemperaturwärme) genutzt werden kann. Dies ist in der Regel jedoch nur bei

Heizwerken der Fall. Bei Heizkraftwerken kann die im Abdampf der Dampfturbine enthaltene Kondensationswärme meist kostengünstiger genutzt werden.

Die Rauchgaskondensation trägt ferner zu einer Vermeidung von optischen Emissionen bei, da eine Wasserdampffahne über dem Kamin bei den meisten Betriebszuständen und Wetterlagen vermieden werden kann. Gerade in Gebieten dichter Bebauung oder in Gegenden, für die der Tourismus eine größere Bedeutung hat, kann somit die Akzeptanz einer Biomasseverbrennungsanlage erhöht werden.

### **5.3 Energieauskopplung**

Die Energieauskopplung stellt nicht nur einen wirtschaftlich bedeutenden Faktor dar, sie kann auch für die Genehmigung der Gesamtanlage von großer Bedeutung (Wärmenutzungsverordnung) sein. Die reine Stromerzeugung, ohne den Nutzen einer Kraft-Wärme-Kopplung, mag zwar in einigen Fällen wirtschaftlich interessant sein, der Brennstoffausnutzungsgrad liegt bei Anlagen dieser Größenordnung jedoch weit unter dem von großen zentralen Kraftwerken. Dabei sollte es gerade als Vorteil der dezentralen Anlagen angesehen werden, daß der Brennstoffausnutzungsgrad mit Hilfe der Wärmeauskopplung erhöht werden kann. Eine Wärmeauskopplung in Form von Heißwasser oder Prozeßdampf kann in großen Kraftwerken, wenn dies überhaupt möglich ist, nur zu einem kleinen Teil realisiert werden, da die nötigen Wärmeabnehmer i.d.R. fehlen. Es mag einige Ausnahmen geben, wie man sie z.B. in München vorfindet: einer Stadt mit einem sehr gut ausgebauten Fernwärmenetz.

Bei der Standortwahl ist das Prozeßmedium und die Prozeßtemperatur für die Wärmeauskopplung zu beachten. Die gängigsten Druck- bzw. Temperaturstufen dürften bei ca. 10...12 bar (z.B. Molkereien), 4 bar (z.B. Küchen, Wäschereien) und 1,2 bar (Heißwasser für Heizwärme) liegen. Die Auslegung der Dampfturbine ist darauf abzustimmen.

Der Kondensationsdruck der Dampfturbine ist den Standortverhältnissen anzupassen: für die Kühlung bzw. Kondensation des Vakuumdampfes kommen generell Luftkondensatoren, Naßkühltürme, eine Kombination aus beiden (Hybrid-) und Flußwasserkühlung in Frage. Letztere dürfte nur in wenigen Einzelfällen realisierbar sein. Aus optischen Gründen (Vermeidung einer Wasserdampffahne) ist der Luftkondensator dem Naßkühlturm vorzuziehen. Ob dieser zum Einsatz kommen kann, liegt hauptsächlich an den Investitionskosten. Der Luftkondensator ist in der Regel teurer als der Naßkühlturm. Bei geringer Differenz der Investitionskosten sollte der Luftkondensator auch aus Wirtschaftlichkeitsgründen einem Naßkühlturm vorgezogen werden, der durch seinen kontinuierlichen Wasserbedarf hohe Betriebskosten verursacht. Die Mindereinnahmen der Stromerzeugung bei Luftkondensatoren (durch geringfügig höhere Kondensationstemperaturen) sind dabei berücksichtigt.

An einigen Standorten ist eine Nutzung von Niedertemperaturwärme im Temperaturbereich von 35...70 °C möglich. Durch deren Nutzung kann der Brennstoffausnutzungsgrad gesteigert werden, da die Abwärme aus der Dampfturbine nicht „vernichtet“ werden muß. Bei einer Bedarfsdeckung mit hohen Betriebszeiten über das Jahr kann evtl. die anschließende Kondensation kleiner dimensioniert werden.

Für alle Arten der Wärmelieferung gilt, daß der Standort mit der jeweils erforderlichen Länge der Fernwärmeleitungen abzustimmen ist. Die Fernwärmeleitungen nehmen i.d.R. einen nicht unbeträchtlichen

Posten bei den Investitionskosten ein. Bei der Leitungsverlegung muß immer das Nutzen-Aufwand-Verhältnis kritisch betrachtet werden.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, daß die vertragliche Festlegung der Fernwärmepreise zu kleineren und größeren Schwierigkeiten, zähen Verhandlungen und Verzögerungen des Projektes führen kann. Es hat sich gezeigt, daß die Abnehmer vielfach nicht bereit sind, Mehrkosten für die Wärme aus regenerativer Energie zu zahlen. Dabei spielt es keine Rolle, ob dies private Abnehmer oder Industriebetriebe sind. In vielen Fällen kann nicht einmal der Preis verlangt werden, der in Industriebetrieben durch die eigene Erzeugung von Wärme substituiert werden kann. Mit dem Argument und der Einstellung „Der Betreiber des Biomasse-Heizkraftwerkes bekommt ja eine staatliche Förderung!“ wird teilweise um Fernwärmepreise „gepokert“, welche die gesamte Projektabwicklung und -realisierung in Gefahr und Verzug bringen können.

#### **5.4 Reststoffverwertung / -entsorgung**

Auch wenn die Reststoffentsorgung und / oder -verwertung in der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und bei der erforderlichen Anlagentechnik oft nur eine untergeordnete Rolle spielt, muß eine sorgfältige Planung erfolgen, die sämtliche Verwertungswege berücksichtigt. Eventuelle Nachrüstungen an der Anlage auf Grund einer Änderung des Brennstoffbandes müssen dabei mit nur geringem Aufwand realisierbar sein.

Die oben dargestellten chemischen Zusammensetzungen der Brennstoffe zeigen, daß keine verbindlichen Aussagen möglich sind, mit welcher Qualität Aschen und Rückstände anfallen. Selbst beim Betrieb der Anlage mit naturbelassenen Brennstoffen sind, vor allem in den Flugstäuben, sehr hohe Schwermetallgehalte zu finden, die eine Verwertung als Düngemittel erschweren oder gar verhindern.

Die einzelnen Rückstandsströme sind nach Möglichkeit getrennt zu erfassen. Die Betriebskosten können somit auf Grund der unterschiedlichen Entsorgungskosten und -wege gesenkt werden. Folgende Entsorgungswege sind generell möglich: Verwertung als Düngemittel in Land- oder Forstwirtschaft, Verwertung in der Zementindustrie, Entsorgung auf der Hausmülldeponie, Entsorgung in einer Untertage-deponie.

Analysen während des Betriebes zeigen, welche Rückstände zusammengefaßt und gemeinsam entsorgt / verwertet werden können. Die Verwertung der Aschen in der Land- oder Forstwirtschaft muß nicht unbedingt die kostengünstigste sein, da der Aufwand für die erforderlichen Analysen nicht unterschätzt werden darf. Es besteht z.B. die Möglichkeit, sich mit einem anderen Betreiber zusammenschließen, da in der Regel für eine Aufbereitung relativ große Mengen erforderlich sind. Dies kann auch eine Müllverbrennungsanlage sein, deren Rostaschen auf Grund der hohen Metallanteile aufbereitet und verwertet werden können. Auf diese Weise können Entsorgungskosten in Höhe von 70 DM/Mg realisiert werden.

Die Rückstände müssen für die einzelnen Verwertungs- / Entsorgungswege unterschiedlich „manipuliert“ werden können: Das betrifft zum einen die Abfüllung der Rückstände in verschiedene Behältnisse (Container, Big-Bag's, Silos), zum anderen die Beschaffenheit der Rückstände. Je nach gewähltem Weg

müssen die Rückstände trocken oder angefeuchtet (staubfrei) angeliefert werden. Aus diesem Grund ist der Platzbedarf für eine Anfeuchtung der Rückstände vorzuhalten.

## 6. Förderung

Zum Schwerpunkt „Wärme- und Stromgewinnung aus fester Biomasse“ wurde in Deutschland das Förderkonzept „Nachwachsende Rohstoffe 1996-2000“ eingerichtet. Im Rahmen dieses Konzeptes werden von der Bundesregierung Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben bezuschußt. Vorrangig werden Biomasseverbrennungsanlagen mit Leistungen im Megawattbereich für die thermische Nutzung von halmgutartigen Biomassefestbrennstoffen bearbeitet. Förderfähig sind ebenfalls Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur gemeinsamen Nutzung von organischen Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten und Bioenergieträgern aus der Land- und Forstwirtschaft zur Wärme- und Stromerzeugung. Nicht förderfähig sind Vorhaben zur energetischen Nutzung von organischen Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten, wenn dabei Umwelt- und Entsorgungsaspekte im Vordergrund stehen. Die Eigenbeteiligung von Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft soll dabei mindestens 50 % betragen. Die genaue Festlegung der Fördergelder erfolgt nach Einzelfallprüfung.<sup>15/16</sup>

Auf Landesebene unterscheiden sich die Fördermöglichkeiten: In Ländern wie Bremen, Hamburg und Berlin stehen keine Förderprogramme zur Verfügung, in Rheinland-Pfalz existiert kein Förderprogramm, dennoch kann eine Förderung von Forschungs- und Modellvorhaben bis zu 50 % erfolgen. In Bayern werden über das Förderkonzept „Nachwachsende Rohstoffe in Bayern“ entsprechende Fördermittel auf Grund von Einzelentscheidungen vergeben. Nähere Informationen zu einzelnen Förderprogrammen sind z.B. bei der FNR zu erhalten.

Die thermische Verwertung von Altholz ist damit, wie aus den oben erwähnten Förderkriterien hervorgeht, bedingt förderfähig, wenn keine Entsorgungsaufgaben übernommen werden. Eine Mischfeuerung von Altholz, Restholz aus der Holzverarbeitenden Industrie und naturbelassenem Holz ist somit möglich und kann gefördert werden. Damit kann die Wirtschaftlichkeit eines Heizkraftwerkes positiv beeinflusst werden. In den Förderauflagen ist dabei der Brennstoffmix vorgeschrieben. In der Regel ist davon auszugehen, daß bei Neuanlagen mindestens 50 % naturbelassene Hölzer eingesetzt werden müssen. Eine Ausnahme bildet beispielsweise die Zufeuerung von Biomasse in bestehenden Kohlefeuerungen.

In der Vergangenheit wurden bzgl. der Verwendung von „Billigmachern“ (den Brennstoffen, die den Preis des Brennstoffmixes nach unten „korrigieren“) von Seiten der Fördergeber Einschränkungen gemacht. Dies hat dazu geführt, daß einige Projekte während der Bearbeitungszeit eingestellt bzw. komplett auf die thermische Verwertung von Altholz ausgelegt wurden. Die Wirtschaftlichkeit war nur an einigen ausgewählten Standorten sichergestellt, da sehr viele Randbedingungen erfüllt sein mußten.

Dieses Vorgehen war sicherlich auch richtig, wenn es hauptsächlich um einen positiven Beitrag für die Land- und Forstwirtschaft ginge. Man sollte jedoch nicht außer acht lassen, daß auch durch die Nutzung von Altholz fossile Primärenergieträger ersetzt werden können und ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung geleistet werden kann. Altholz hat gegenüber anderen biogenen Brennstoffen sogar den Vorteil, daß es dem Kreislauf erst nach ein- oder mehrmaliger Nutzung entzogen wird.

Im Zuge des Förderantrages, der nach einer Studie des Gesamtkonzepts an die begutachtenden Institutionen zu stellen ist, muß natürlich auf der Basis der bis dahin ermittelten Rahmendaten eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angefertigt werden. Bei der Höhe der Fördersumme wird die Wirtschaftlichkeit der Anlage und der erreichbare Jahresüberschuß berücksichtigt. Das bedeutet im Klartext, daß dem Investor ein Jahresüberschuß in einer bestimmten Größe „gewährt“ wird, welcher durch die Höhe der Förderquote bestimmt wird. Die zur Verfügung gestellte Fördersumme ist generell eine Bezuschußung der Anfangsinvestition, es erfolgt keine Unterstützung bei den laufenden Betriebskosten. Über die Fördersumme sollen die Mehrkosten einer Biomassefeuerung gegenüber einer Feuerung für fossile Brennstoffe ausgeglichen werden.

Dieses Vorgehen beinhaltet nach Meinung des Autors folgende Nachteile: Es besteht die Gefahr, daß an den Planer der Wunsch herangetragen wird, evtl. aufschiebbare Investitionen bereits anfangs zu berücksichtigen (da ja nur ein Teil der Gesamtkosten getragen werden muß). Dies kann natürlich, wenn überhaupt, nur in einem gewissen Rahmen geschehen, da sich nahezu alle Projekte auf der Basis von regenerativen Energieträgern, bei denen der Brennstoff zugekauft werden muß, gegenüber fossilen Brennstoffen und den hierfür derzeit niedrigen Preisen durch eine relativ schlechte Wirtschaftlichkeit „auszeichnen“ und sehr schnell die maximal erhältliche Förderquote von 48 % überschritten wird. Auf der anderen Seite könnten Projekte, bei denen die Wirtschaftlichkeit nicht oder nur knapp gegeben ist, gut gerechnet werden, indem man, nach Meinung des Autors, erforderliche Investitionen nicht berücksichtigt. Dies betrifft vor allem die Ausstattung und die Qualität der Feuerung und deren Emissionen sowie die Rauchgasreinigung. Des weiteren ist bei der Gewährung eines bestimmten Jahresüberschusses, dies ist die derzeitige Praxis, das Risiko für den Betreiber weiterhin relativ groß, da wie oben schon ausgeführt, die Schwankungen für die Brennstoffkosten nicht ohne weiteres abgefangen werden können.

Aus diesem Grund sollten bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse höhere Renditen zugelassen werden. Derzeit liegen die Renditen im Bereich der von durchschnittlichen, weitgehend risikofreien Anlageformen. Die Zulassung von nur geringen Renditen führt dazu, daß Anlagen mit hoher Wirtschaftlichkeit, d.h. hohen Jahresüberschüssen und geringen Amortisationsdauern, mit einem niedrigeren Zuschuß rechnen müssen und somit künstlich auf das Niveau unwirtschaftlicher Anlagen gestellt werden.

Dies führt dazu, daß Initiatoren von Biomasse-Heizkraftwerken das Interesse an der Realisierung der wirtschaftlichen (und meist auch teureren) Anlagen verlieren können, da für diese das Risiko nicht mehr kalkulierbar ist.

Folgende Anregung soll zur Diskussion gestellt werden: Ein entsprechender Ausgleich für „bessere“ Anlagen könnte erfolgen, indem sich die Höhe der Förderung nicht nur an der Wirtschaftlichkeit orientiert, sondern auch an den zu erwartenden und realisierten Emissionen und der Umweltfreundlichkeit. Mit einer Förderung, die sich auch an den Emissionen der Anlage orientiert, ließe sich momentan ein flexible Regelung schaffen, bis schon lange erwartete Abgaben wie CO<sub>2</sub>-Steuer oder andere Umweltabgaben gesetzlich verankert werden.

## 7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

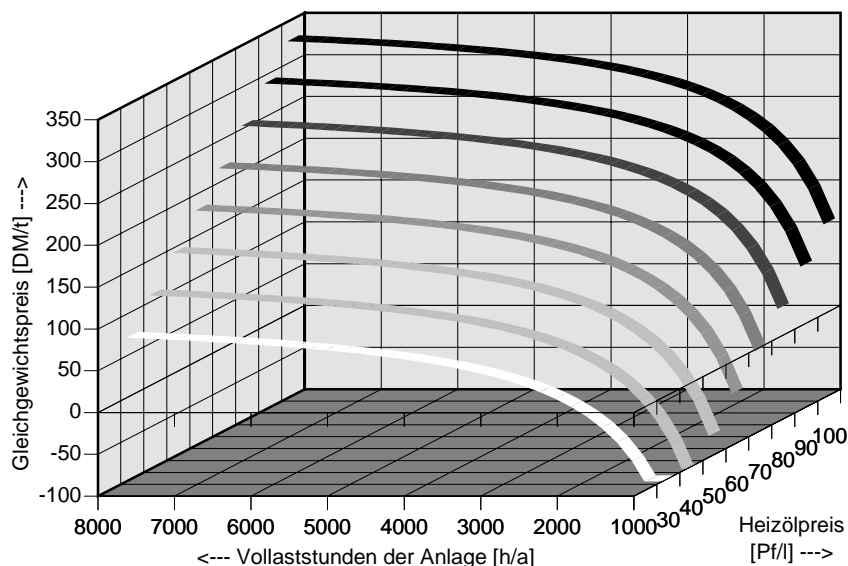
### 7.1 Vergleich zu fossilen Primärenergieträgern

In der Regel wird die Kostenermittlung und die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit nach dem Kurzverfahren der VDI-Richtlinie 2067 durchgeführt.<sup>17</sup> Dabei ist die absolute Größe der jährlichen Über- oder Unterdeckung meist die ausschlaggebende Größe. Weitergehende Analysen führen zu Betrachtungen der erreichbaren Gesamt- und Eigenkapitalrenditen.

Die thermische Nutzung von biogenen Brennstoffen steht aber immer in Konkurrenz zu fossilen Primärenergieträgern wie Heizöl EL oder Erdgas. Aus diesem Grund erfolgt in den meisten Fällen eine Vergleichsrechnung. Die Mehrkosten für die Anschaffung einer feststoffbetriebenen Feuerungsanlage müssen den Minderkosten für den Betrieb der Anlage gegenübergestellt werden.

Dabei interessiert vor allem die Frage, wie hoch bei gegebenen Öl- oder Gaspreisen die Tonne Biobrennstoff vergütet werden kann. Die Berechnung der Gleichgewichtspreise erfolgt mit Hilfe der Kostenvergleichsrechnung. Die Gleichgewichtspreise sind in Abhängigkeit vom Preis für Heizöl EL für unterschiedliche Volllaststunden im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

**Gleichgewichtspreise für Biomasse**  
(Biomasseheizwerk mit einer Kesselleistung von 10 MW)



Der Gleichgewichtspreis für Biomasse steigt mit dem Heizölpreis linear an, mit einer Erhöhung der Betriebszeit ergibt sich zunächst ein überproportionaler Anstieg des Preisniveaus für Biomasse.

Das Ziel derartiger Berechnungen ist es, Vergleichsgrundlagen für eine überschlägige Betrachtung der Wirtschaftlichkeit gegenüber Feuerungsanlagen für fossile Energieträger zu schaffen. Der Berechnung in

obigem Beispiel sind empirische Werte für Wirkungsgrade, Jahresmehrkosten etc. zu Grunde gelegt, so daß letztendlich eine Rechenformel entwickelt werden kann.

$$P_{BM} = \left( \frac{P_{HEL}}{0,92} - \frac{522.500 + 13,3 \times t}{7 \times t} \right) \times 3,944 \times 0,85 \quad [DM / Mg]$$

Interessant sind bei der Entwicklung einer solchen Formel die partiellen Ableitungen des Biomassepreises nach den beiden unabhängigen Variablen „Volllaststunden“ und „Heizölpreis“. Die entsprechenden Differentialquotienten geben Aussagen über die Empfindlichkeit des Gleichgewichtspreises der Biomasse auf Veränderungen des Preises für fossile Energieträger sowie der Betriebszeit der Anlage.

Grundlage der obigen Betrachtung sind Ausführungen von Hr. Dr. E. Ortmaier, die im Buch VDI-Berichte Nr. 1236 wiedergegeben sind.<sup>18</sup>

## 7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am konkreten Beispiel

Ausgehend von den obigen Erkenntnissen kann auch für die hier beschriebene Feuerungsanlage eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI 2067 aufgestellt werden, die Grundlage für eine Sensitivitätsanalyse ist. Die Untersuchung der Sensitivität zeigt, auf welche Parameter bei der Auslegung besonderer Wert zu legen ist. Für diese Größen müssen die Kosten bzw. Erlöse so genau wie möglich ermittelt werden, um eine entsprechende Sicherheit für den Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Für Positionen, die nur eine geringe Bedeutung bei der Sensitivitätsanalyse haben, reichen überschlägige Abschätzungen.

Die wichtigsten Rahmendaten für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit sind nachfolgend aufgeführt:

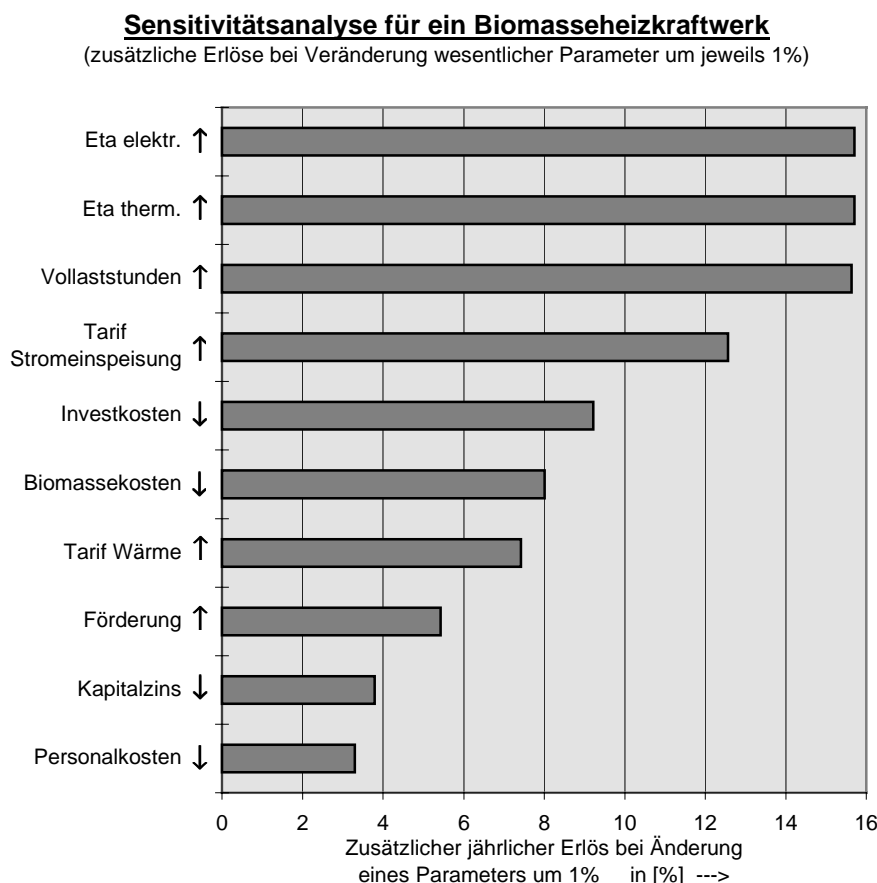
Investitionskosten	20 Mio. DM
Betriebsstunden	8.000 h/a
Förderquote	48 %
Feuerungswärmeleistung	10 MW
Thermischer Wirkungsgrad	89 %
Elektrischer Wirkungsgrad	27 %
Heizöl (für Reservekessel)	400 DM/Mg
Biomassepreis	75 DM/Mg
Entsorgung der Rückstände	150 DM/Mg
Erlös Stromeinspeisung	149,2 DM/MWh
Stromeinspeisung	17.500 MWh/a
Erlös Wärmeverkauf	30 DM/MWh
Wärmemenge	42.000 MWh/a

Die Investitionskosten wurden an Hand von Ausschreibungen und Angeboten verifiziert. Die Berechnung der Annuität und des Aufwandes für Reparatur und Wartung erfolgte nach VDI 2067. Als Kapitalzins wurden 8 % zu Grunde gelegt. Die Anlage wird im Vollastbetrieb gefahren. Die Wärmemenge, die nicht verkauft werden kann, dient der Stromerzeugung.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Rahmendaten ergibt sich eine jährliche Überdeckung von 170.000 DM.

Die Eigenkapitaldecke der Betreiber sollte nicht zu gering ausgestattet sein. Damit ist ein Puffer vorhanden, der z.B. erforderlich ist, falls in der Anfangszeit noch nicht die geplante Wärmeabnahme vorhanden ist. Damit sinken zwar die erreichbaren Eigenkapitalrenditen, der Sicherheit sollte aber bei einem Projekt dieser Größenordnung der Vorrang gegeben werden. In der Regel wird diese „Überwachung“ von den Kreditgebern vollzogen, die Größen wie „Verschuldungsgrad“, „Erwartete Einnahmen“, „Förderquote“ etc. als Grundlage für die Gewährung eines Kredites heranziehen.

Auf Grundlage der Kostenvergleichsrechnung nach VDI 2067 wird nun eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der die einzelnen Kosten- bzw. Erlöspositionen partiell verändert werden. Diese Analyse wurde nicht nur für den Brennstoffpreis und die Auslastung der Anlage vollzogen, sondern auch für die im nachstehenden Diagramm enthaltenen Größen.



Die an der linken Achse dargestellten Parameter wurden jeweils um 1 % nach oben oder unten geändert, so daß die dargestellten Balken jeweils Erlöse bedeuten. Die Pfeile zeigen an, ob eine Verringerung oder Erhöhung des Parameters erfolgte. Die Änderung der von den Hauptparametern abhängigen Größen wurde entsprechend berücksichtigt. Dies sind z.B. bei einer Erhöhung der Volllaststunden die Brennstoffkosten, die Entsorgungskosten für Rückstände, die Erlöse für Stromeinspeisung etc. Die Änderung um 1 % stellt eine relative Änderung der abgebildeten Größe dar: Aus einem Wirkungsgrad der Stromer-

zeugung von 27 % als Ausgangsbasis ergibt sich somit eine Erhöhung um 0,27 % und ein absoluter Wert von 27,27 %.

Bei Änderung des thermischen oder elektrischen Wirkungsgrades oder der Vollaststunden ergibt sich eine prozentuale Steigerung der jährlichen Überdeckung von knapp 16 %, in diesem Fall ca. 27.000 DM/a. Diese Größen haben somit, unter den oben aufgeführten Rahmenbedingungen, den größten Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit. Dieser Sachverhalt muß während der Planungsphase entsprechend berücksichtigt werden. Das Steigern der Wirkungsgrade ist aber nur solange sinnvoll, wie die Verfügbarkeit der Anlage auf Grund steigender Komplexität des Gesamtverfahrens nicht beeinträchtigt wird.

Der große Einfluß der Investitions- und der Brennstoffkosten war zu erwarten. Interessant erscheint in diesem Zusammenhang aber, daß die Wirtschaftlichkeit von der Stromeinspeisung in höherem Maße abhängig ist als von der Wärmelieferung.

## **8. Zusammenfassung**

„Ein neu zu errichtendes regeneratives Energiesystem ist gegenüber einem bestehenden konventionellen System wettbewerbsfähig, wenn die Gesamtkosten der regenerativen Energieerzeugung niedriger sind als die variablen Kosten der schon bestehenden konventionellen Energieerzeugung.“<sup>19</sup>

Mit diesem einleitenden Satz ist das Wesentliche ausgedrückt. Bei den derzeitigen, sehr niedrigen Kosten für fossile Energieträger hat der Brennstoff Biomasse nur dann eine Chance, die Konkurrenz zu bestehen, wenn Biomassefeuerungsanlagen mit erheblichen Investitionszuschüssen zur Kompensation der Mehrkosten gestützt und / oder der Brennstoff Biomasse subventioniert wird. Ausgenommen hiervon sind ausdrücklich Rest- und Abfallstoffe, die entweder zu minimalen Bereitstellungskosten verfügbar sind oder „Geld mitbringen“, da entsprechende Entsorgungskosten gespart werden können.

Die gemeinsame thermische Nutzung von Rest- und Althölzern mit naturbelassenen Hölzern ist nach Meinung des Autors der Weg in die richtige Richtung. Durch die Verwendung von „Billigmachern“ können die Anlagen wirtschaftlich betrieben werden. Letztendlich wird so auch der Land- und Forstwirtschaft geholfen, da mehr Anlagen gebaut werden können und somit die gesamte Absatzmenge an naturbelassenen Brennstoffen gesteigert werden kann. Der Gefahr, daß nur Altholzverbrennungsanlagen entstehen und keine Hackschnitzel zum Einsatz kommen, wird, wie bisher, durch eine Auflage im Förderbescheid begegnet.

Die CO<sub>2</sub>-Neutralität ist bei der Verbrennung sämtlicher Hölzer gegeben. Damit wird die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche das ursprüngliche Ziel der Förderung von Anlagen auf der Basis biogener Brennstoffe war, sowohl durch die Verwendung von Altholz aus als durch naturbelassene Hölzer erreicht.

- 
- <sup>1</sup> Stromeinspeisungsgesetz
  - <sup>2</sup> Brennstoffeigenschaften und Anforderungen an Feuerungstechnik und Abgasreinigung für die Nutzung von Industriest- und Altholz, Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer, Zürich. Veröffentl. in: Biomasse als Festbrennstoff, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 6, Landwirtschaftsverlag Münster 1996, S. 180.
  - <sup>3</sup> Untersuchungen von Holz und Holzwerkstoffen auf Holzschutzmittel und deren Emissionen bei der Verbrennung, M. Strecker, R. Marutzky. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens Nr. 76-104 03 518 für das Umweltbundesamt, Berlin 1993.
  - <sup>4</sup> Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten, Rainer Marutzky, Braunschweig. Habilitationsschrift, WKI-Bericht Nr. 26, Wilhelm-Klauditz-Institut, Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung, Oktober 1991, S. 184.
  - <sup>5</sup> Quelle: Eigene Brennstoffuntersuchungen
  - <sup>6</sup> Zuordnungskriterien für Rest- und Altholz zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung, Volker Hoffmann, Essen. Veröffentl. in: Alt- und Restholz, Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik, Rainer Marutzky, Werner Schmidt, Düsseldorf VDI-Verlag 1996, S.19.
  - <sup>7</sup> Holzschutzmittel schnell erkennen, Monika Vogt, Duisburg. Veröffentl. in: Alt- und Restholz, Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik, Rainer Marutzky, Werner Schmidt, Düsseldorf VDI-Verlag 1996, S.51.
  - <sup>8</sup> Entsorgung von Holzaschen, Dr. Kathrin Pohlandt; Braunschweig. Veröffentl. in: Alt- und Restholz, Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik, Rainer Marutzky, Werner Schmidt, Düsseldorf VDI-Verlag 1996, S.192.
  - <sup>9</sup> BImSchG, § 10, November 1994.
  - <sup>10</sup> BImSchG, § 19, November 1994.
  - <sup>11</sup> Das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren - Anforderungen zur Luftreinhaltung bei thermischer Nutzung von Rest- und Altholz, K. Mair, H. Frieß, München. Veröffentl. in: VDI-Tagung „Alt- und Restholz“ in Salzburg, 19./20.10.1995, VDI-Bildungswerk Düsseldorf.
  - <sup>12</sup> Experimentelle Untersuchung der Bildung von Stickstoffoxiden bei der Kohlenstaubverbrennung, Waldemar Schulz, Bochum. Doktorarbeit der Abteilung für Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum, 1985, S. 20.
  - <sup>13</sup> Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen durch verbrennungstechnische Maßnahmen, H. Kremer und W. Schulz. Veröffentl. in: VDI-Berichte 495, Düsseldorf VDI-Verlag 1984.
  - <sup>14</sup> Heißgasentstaubung, Gernot Schwindegg, Frankfurt. Veröffentl. in: VDI-Tagung „Dioxin- und NO<sub>x</sub>-Minimierungstechniken“ in München, 18./19.10.1992, VDI-Bildungswerk Düsseldorf.
  - <sup>15</sup> Bekanntmachung Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow.
  - <sup>16</sup> Nachwachsende Rohstoffe, Konzept der Bundesregierung zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben 1996-2000. BML, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn.
  - <sup>17</sup> VDI 2067 Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen. Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen
  - <sup>18</sup> Ökonomische Voraussetzungen für einen erfolgreichen Anlagenbetrieb beim Einsatz biogener Festbrennstoffe - Projektbeispiele aus Bayern, Dr. Erich Ortmaier, München. Veröffentl. in: VDI-Berichte Nr. 1236, Düsseldorf VDI-Verlag 1996.
  - <sup>19</sup> Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Aspekte der Wirtschaftlichkeitsrechnung, Prof. Dr. W. Schulz, Köln. Veröffentl. in: Regenerative Energien, Betriebserfahrungen und Wirtschaftlichkeitsanalysen der Anlagen in Deutschland, VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Nr. 851, Düsseldorf VDI-Verlag 1991, S.4.
  - <sup>20</sup> Konzeptstudie zur Verbesserung der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe mit Hilfe eines nachgeschalteten Gasturbinenprozesses, Dr. B. Pauli, J. Kötting, Wärmetechnik Dr. Pauli GmbH, im Auftrag des Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, April 1994.
  - <sup>21</sup> Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Betrieb zur Trocknung von Holzspänen, J. Kötting. Diplomarbeit, Juni 1993.
  - <sup>22</sup> Neue Feuerungsanlagen im mittleren Leistungsbereich, Entwicklung eines Projektes aus planerischer und wirtschaftlicher Sicht, J. Kötting, München. Veröffentl. in: VDI-Tagung „Anlagen und Konzepte für die energetische Verwertung von Waldholz, Biomasse und Holzabfällen“ in Salzburg, 24./25.10.1996, VDI-Bildungswerk Düsseldorf.