

**Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6336

# **Kleinanlagen zur energetischen Verwertung von Abfällen**

J. Seier

Institut für Kern- und Energietechnik

Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

# Übersicht

## Kleinanlagen zur energetischen Verwertung von Abfällen

Nach dem Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz kann die Verbrennung von Abfällen als Maßnahme zur Beseitigung oder zur energetischen Verwertung der Abfälle erfolgen. Die Verbrennung von Siedlungsmüll ist eine Maßnahme zur Beseitigung der Abfälle, für die in Deutschland überwiegend Großanlagen mit einer Kapazität von einigen hunderttausend Tonnen Abfall pro Jahr eingesetzt werden. Die energetische Verwertung ist höherkalorischen Abfällen vorbehalten (Heizwert  $\geq 11$  MJ/kg), die z. B. in Industrie und Gewerbe anfallen.

Derzeitige Wege der energetischen Verwertung von Abfällen sind die Mitverbrennung in Zementwerken, Kraftwerken, Industriefeuerungen oder Hausmüllverbrennungsanlagen. Diese Verwertungswege sind jedoch nicht für alle Abfälle zur Verwertung geeignet und unter ökologischen und energetischen Gesichtspunkten umstritten.

Eine effizientere Form der Verwertung besteht in der Verbrennung hochkalorischer Abfälle in dezentralen Verbrennungsanlagen, die durch die gekoppelte Erzeugung von Wärme und Strom eine hohe Brennstoffausnutzung erreichen. Dazu müssen die Anlagen an den Wärmebedarf einzelner, nicht zu kleiner Wärmeverbraucher oder eines Verbundes an Wärmeverbrauchern angepaßt werden können, d. h., sie müssen *klein* dimensioniert werden können.

Aus wirtschaftlichen Gründen können Kleinanlagen zur energetischen Verwertung keine maßstäblich verkleinerten Großmüllverbrennungsanlagen sein, sondern müssen in Konstruktion, Auslegung und Ausstattung soweit vereinfacht werden, wie es ohne Verletzung der gesetzlichen Regelungen zur Abfallverbrennung, insbesondere der 17. BImSchV, möglich ist.

Die vorliegende Studie befaßt sich mit der Konzeption einer Demonstrationsanlage für die Kleinanlagentechnik mit einem Jahresdurchsatz von 16.500 t/a. Ziel ist, die technische Machbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Kleinanlagentechnik zu zeigen, die mit der Anlage zu machenden Betriebserfahrungen zur Weiterentwicklung der Technik zu nutzen und die gewonnenen Daten zur verbesserten Anlagenauslegung auszuwerten.

Für die Demonstrationsanlage ist eine Rostfeuerung mit einem Wirbeldüsenrost vorgesehen, der zur Verbrennung von Abfällen mit hohen Heizwerten entwickelt wurde. Erwartet werden 11 – 20 MJ/kg. Zur Rauchgasreinigung sind das SNCR-Verfahren und die konditionierte Trockensorption mit nachgeschaltetem Gewebefilter vorgesehen. Damit können die Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten werden. Die Energienutzung soll über eine zweistufige Dampfturbine mit zwischengeschalteter Dampfentnahme zur Fernwärmeerzeugung erfolgen.

Als Standort für die Demonstrationsanlage ist das Forschungszentrum Karlsruhe geplant, das die Möglichkeit zur ständigen wissenschaftlichen Begleitung des Anlagenbetriebs gibt. Regelbrennstoff soll die hochkalorische Fraktion einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage für Siedlungsmüll sein. Daneben soll im Rahmen von Verbrennungsversuchen sukzessive das Spektrum der zur energetischen Verwertung geeigneten Abfälle erschlossen werden.

Ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb ist möglich ab einer Vergütung von 71 DM pro Tonne verwertetem Regelbrennstoff. Bei einer Vergütung von 100 DM pro Tonne Regelbrennstoff besteht für einen Contractor ein Anreiz für die Finanzierung und den Betrieb einer Kleinanlage. Diese Vergütung wird als erzielbar angesehen. Damit stellt eine Kleinanlage eine interessante Alternative zu den bisher verfolgten Verwertungswegen für Abfälle zur Verwertung dar.

## Abstract

### Decentralised Facilities for the energetic utilisation of waste

According to the German waste law, waste can be incinerated either to eliminate the waste or to utilise the energy included in the waste. The objective of the incineration of residual waste is the elimination of the waste. In Germany incineration of residual waste is usually performed in huge plants with a capacity of several 100,000 tons per year. Energetic utilisation is restricted by the German waste law to high caloric waste fractions with a heating value greater or equal than 11 MJ/kg. Respective waste fractions are e.g. produced in industry and trade.

Customary ways of energetic utilisation are the co-incineration of suitable waste fractions in cement kilns, power plants, industrial firing installations or waste incineration facilities for residual waste. These ways of energetic utilisation are restricted to suitable waste fractions, and they have major disadvantages from an ecological point of view.

A more efficient way of energetic utilisation would be to incinerate high caloric waste fractions in decentralised incineration facilities generating heat and electricity. Decentralised facilities can reach a high level of energy efficiency, as long as they can be adopted to the heat demand of a (not too small) heat consumer or a group of interconnected heat consumers. This presumes that decentralised incineration facilities can be designed *small*.

Economy forbids to design decentralised incineration facilities by simply reducing the capacity of a customary waste incineration facility. To reduce the investment, as many simplifications as possible have to be included in the design. Simplification, however, are restricted by the legal regulations concerning waste incineration, especially the German 17<sup>th</sup> BImSchV.

This study includes the concept for a decentralised pilot facility with a capacity of 16,500 tons per year. The goals of the pilot facility are to demonstrate the feasibility of decentralised waste incineration facilities, to get experienced in plant operation even with different waste fractions, to use the experience for an improved plant design and to improve the plant technology.

The pilot facility shall be equipped with a three-stage fluidising nozzle grate developed for high caloric waste fractions. Expected heating values range from 11 MJ/kg to 20 MJ/kg. Flue gases shall be cleaned by a SNCR-process, a conditioned dry sorption system and a fabric filter. This flue gas cleaning system is well known to comply with the German emission limits given in the 17<sup>th</sup> BImSchV. Energy shall be recovered by a two-stage steam turbine. Steam can be taken of between the two turbine stages in order to generate district heat.

Plant site shall be at Research Centre of Karlsruhe. This gives the option that scientists accompany plant operation. Regular fuel shall be a refuse derived fuel produced by a mechanical and biological treatment of residual waste. In addition, different waste fractions shall be incinerated on a trial basis. This shall help to find out which industrial or commercial waste fractions are suitable for energetic utilisation in decentralised incineration facilities.

Economic plant operation starts at a refunding of DM 71 per ton of refuse derived fuel. At a refunding of DM 100 per ton, profitability is sufficient to interest a contractor to invest into a decentralised incineration facility and to operate it. A refunding of DM 100 per ton is conside-

red as realistic. These figures show that energetic utilisation in decentralised incineration facilities is an interesting option compared to common ways of waste treatment.

## **Vorwort**

Dieser Bericht ist im Rahmen meiner Tätigkeit am Forschungszentrum Karlsruhe entstanden. Er faßt die Ergebnisse zahlreicher Diskussionen über das Konzept für eine Verbrennungsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe zusammen, die als Demonstrationsanlage für die energetische Verwertung von Abfällen in dezentralen Anlagen dienen soll. Die Anlage soll zeigen, daß – im Gegensatz zur häufig vertretenen Auffassung – nicht nur möglichst große Abfallverbrennungsanlagen wirtschaftlich arbeiten können, sondern daß auch kleine Verbrennungsanlagen für geeignete Abfälle wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Das Konzept wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma DH Bio-Energieanlagen GmbH & Co. KG, Würzburg, erarbeitet. Hier möchte ich Herrn Andreas Mensing und Frau Sigrid Thole danken, die viele Erklärungen zur Ausstattung einer Verbrennungsanlage für die energetische Verwertung von Abfällen gegeben haben und bei der Berechnung der technischen und wirtschaftlichen Daten der Demonstrationsanlage sehr behilflich waren.

Weiterhin möchte ich Herrn Michael Stock von der Hessischen Industriemüll GmbH, Wiesbaden, für seine Beiträge zum Erarbeiten des Konzeptes danken, die mir die Sichtweise eines Contractors auf ein Projekt in dem hart umkämpften Markt der Abfallverwertung nahe brachten.

Am Forschungszentrum Karlsruhe möchte ich besonders Herrn Dr. Lambert Krebs für seine Unterstützung des Vorhabens und seine Mitarbeit bei der Konzeptfindung danken. Ein weiterer wichtiger Ansprechpartner war Herr Friedrich Arendt. Frau Dr. Elisabeth Schröder möchte ich für die kritische Durchsicht dieses Berichts und die konstruktiven Anmerkungen zur Verbesserung danken.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	7
2	Auswahl eines Verbrennungsverfahrens.....	11
2.1	Rostfeuerung mit wassergekühltem Rost.....	11
2.2	Rostfeuerung mit Wirbeldüsenrost.....	13
2.3	Wirbelschichtfeuerung .....	14
2.4	Drehrohrfeuerung .....	15
2.5	Mehrstufige Verfahren .....	16
2.6	Auswahl eines Verbrennungsverfahrens für eine Demonstrationsanlage.....	18
3	Entwurf einer Demonstrationsanlage .....	19
3.1	Anlagentechnik.....	20
3.2	Technische Daten .....	27
3.3	Einbindung der Demonstrationsanlage in die bestehende Versorgungsstruktur.....	28
3.4	Betriebsweise .....	31
4	Wirtschaftlichkeit von Kleinanlagen zur energetischen Verwertung .....	35
4.1	Berechnung der Investition .....	35
4.2	Berechnung der Betriebskosten und sonstigen Kosten .....	37
4.3	Berechnung der Erlöse .....	38
4.4	Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	39
4.5	Sensitivitätsanalyse .....	42
5	Untersuchungsziele für eine Demonstrationsanlage .....	45
5.1	Untersuchung und Optimierung des Anlagenbetriebs .....	45
5.2	Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe.....	47
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	51
7	Literatur .....	57

# 1 Einleitung

Die Ablagerung unbehandelter Abfälle auf Deponien stellt ein erhebliches und langfristig wirksames Gefährdungspotential für die Umwelt dar. Um dieses Gefährdungspotential auf ein Minimum zu reduzieren, stellt die 1993 in Kraft getretene TA Siedlungsabfall hohe Anforderungen sowohl an die Deponien als auch an die dort abzulagernden Abfälle. Eine zentrale Anforderung besteht darin, daß spätestens nach dem 1. Juni 2005 keine Abfälle mehr abgelagert werden dürfen, die – je nach Deponieklasse – einen Kohlenstoffgehalt von 1 % bzw. 3 %, gemessen als TOC (Total Organic Carbon), überschreiten. Diese niedrigen Werte für den Kohlenstoffgehalt sind nach dem heutigen Stand der Technik nur durch eine thermische Behandlung der Abfälle zu erreichen.

Die derzeit übliche Form der thermischen Behandlung von Abfällen ist die Verbrennung in Großanlagen mit einem Durchsatz von mehreren hunderttausend Tonnen pro Jahr. Da die spezifischen Kosten für die Investitionen für Abfallbehandlungsanlagen mit steigendem Anlagendurchsatz deutlich abnehmen, erhofft man, durch den Bau möglichst großer Anlagen niedrige Behandlungskosten pro Tonne Abfall zu erzielen (vgl. z. B. /Neukirchen, Jung 1996/).

Verbunden mit der Großanlagentechnik treten aber auch eine Reihe von Problemen auf:

- Die Auslastung der Anlagen kann in vielen Fällen nicht sichergestellt werden. Da der investitionsabhängige Anteil an den Behandlungskosten sehr hoch ist, steigen bei einer Unterauslastung der Anlage die Behandlungskosten drastisch an.
- Das Einzugsgebiet der Anlagen ist sehr groß, so daß ein hoher Aufwand für den Transport und die Logistik der Abfälle erforderlich ist.
- Die Akzeptanz der Großanlagen in der Bevölkerung ist sehr gering. Die Ablehnung wird verstärkt, wenn “importierter” Müll verbrannt wird.
- Die Energienutzung in Großanlagen erfolgt in vielen Fällen ineffizient. In den meisten Anlagen wird Dampf mit Dampfparametern im Bereich 40 bar und 400 °C erzeugt. Die angeschlossene Stromerzeugung erreicht damit nur Wirkungsgrade um 20 %. Eine Steigerung der Dampfparameter ist mit einer erhöhten Korrosionsgefahr verbunden (vgl. /Born, Seifert 1998/) oder erfordert spezielle Konstruktionen (vgl. /Seier, Albert 1999/).
- Eine Nutzung der Abwärme zur Erzeugung von Prozeßdampf oder Heißwasser für Industriebetriebe oder Fernwärmenetze ist aufgrund des Überangebotes in Großanlagen oft schwierig. Zwar wird in einigen Fällen durch die weitgehende Ausschöpfung der Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung ein sehr hoher Nutzungsgrad erreicht (vgl. /Seier, Albert 1999/, /Schäfers, Schuhmacher, Zwahr 1997/), doch spielt im allgemeinen bei der Standortsuche für eine thermische Abfallbehandlungsanlage die Eignung des Standorts für die Kraft-Wärme-Kopplung nur eine untergeordnete Rolle.

Diese Probleme der Großanlagentechnik führen dazu, daß neben dem Bedarf an Großanlagen auch ein Bedarf an dezentralen Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung besteht (vgl. /Born 1996/, /Kaimer, Schade 1998/, /Maselli 1999/). Dementsprechend wurden bereits mehrere Konzepte für Verbrennungsanlagen erstellt, die mit einem Jahresdurchsatz ab 50.000 t/a unter gewissen Randbedingungen wirtschaftlich arbeiten können. In /Thyssen 1999/ wird z. B. ein Konzept für eine dezentrale Verbrennungsanlage für unterschiedliche Abfälle vorgestellt. Für Klärschlamm und andere Schlämme wurde dieses Konzept bereits umgesetzt, für Hausmüll dagegen noch nicht.

Ziel bei dieser Form der Abfallverbrennung ist die *Beseitigung* des Schadstoffpotentials, das in den Abfällen enthalten ist. Darüber hinaus kann nach dem Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz die thermische Behandlung von Abfällen als Maßnahme zur *Verwertung* erfolgen. Die energetische Verwertung stellt einige Anforderungen an die Abfälle, die Hausmüll nicht erfüllt. Z. B. muß der Heizwert der Abfälle über 11 MJ/kg liegen, und das Hauptziel der Verbrennung muß die Erzeugung von Endenergie sein. Darunter fällt die Erzeugung von Strom, Fernwärme, Prozeßwärme, usw., die sonst mit fossilen Energieträgern erzeugt würden.

Konkrete Formen der energetischen Verwertung bestehen in der Mitverbrennung geeigneter Abfälle in fossil gefeuerten Kraftwerken, Industriefeuerungen oder Zementwerken. Diese Wege der energetischen Verwertung sind allerdings umstritten, da im Vergleich zur Verbrennung der Abfälle in Abfallverbrennungsanlagen mit ihren aufwendigen Rauchgasreinigungsanlagen erhöhte Schadstoffmengen freigesetzt werden (vgl. z. B. /Friedel, Urban 1998/).

Eine andere Form der energetischen Verwertung besteht in der Verbrennung in speziell für Abfälle zur Verwertung konzipierten Kleinanlagen. Diese Anlagen müssen mit einer Rauchgasreinigung ausgestattet sein, die die Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV sicherstellt. Die in den Abfällen gespeicherte Energie muß möglichst effizient genutzt werden. Mögliche Brennstoffe für diese Verwertungsanlagen sind Industrie- und Gewerbeabfälle, die unter Umständen aufbereitet werden müssen, aber auch aufbereiteter Siedlungsmüll.

Die Größe der Anlagen muß den gegenläufigen Tendenzen der Kostendegression und der flexiblen Einsetzbarkeit genügen. Die Kostendegression besagt, daß die spezifischen Investitionen für eine Abfallbehandlungsanlage mit wachsender Anlagengröße abnehmen. Eine flexible Einsetzbarkeit liegt besonders dann vor, wenn eine Anlage auf den Wärmebedarf eines (nicht zu kleinen) Wärmeverbrauchers oder eines Verbundes an Wärmeverbrauchern ausgelegt werden kann. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn die Anlagen auch mit Kapazitäten deutlich unter den o. g. 50.000 t/a wirtschaftlich darstellbar sind. Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit Verbrennungsanlagen in diesem Leistungsbereich. Sie werden im folgenden als Kleinanlagen bezeichnet.



Kleinanlagen sind für einige Brennstoffe bereits verfügbar. Insbesondere für Gebrauchtholz wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Verbrennungsanlagen errichtet (/Walter 1998/, /Voß 1998/, /ZAK 1998/, /Mensing, Mayer, Pauli 1997/). In einigen dieser Anlagen dürfen auch Hölzer verbrannt werden, die mit Holzschutzmitteln behandelt sind. Dazu sind die Anlagen mit Rauchgasreinigungsanlagen ausgestattet, die die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV ermöglichen.

Eine Anlage zur energetischen Verwertung eines Ersatzbrennstoffes, der in einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage hergestellt wird, wird voraussichtlich noch 1999 in Betrieb genommen (vgl. /Boeckh 1999/). In dieser Verbrennungsanlage sollen pro Jahr 15.000 t/a an Ersatzbrennstoff energetisch verwertet werden und Strom und Wärme für die mechanisch-biologische Aufbereitungsanlage mitsamt dem angeschlossenen Bürogebäude produziert werden.

Eine Anlage zur thermischen Behandlung von Produktionsrückständen aus der Automobilzulieferindustrie arbeitet aufgrund der speziellen Randbedingungen auch mit einer Kapazität von 2.000 t/a wirtschaftlich (vgl. /Mickel 1996/). Der Produktionsrückstand besteht überwiegend aus mit Kunstharz verklebten Naturfasern.

Für die größere Zahl an Abfällen zur Verwertung, darunter die meisten Industrie- und Gewerbeabfälle, ist dagegen eine Kleinanlagentechnik, die einen wirtschaftlichen Betrieb unter nicht zu speziellen Randbedingungen erlaubt, nicht verfügbar. Dieser Mangel schränkt die im Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz vorgesehene Möglichkeit der energetischen Verwertung stark ein und steht im Widerspruch zu der Tatsache, daß in vielen Industriebetrieben Abfälle anfallen, für die zur Einhaltung der TA Siedlungsabfall Verwertungswege gefunden werden müssen.

Die Entwicklung einer wirtschaftlich arbeitenden Kleinanlagentechnik setzt eine systematische Weiterentwicklung und Anpassung bestehender Anlagentechniken voraus. Zentrale Fragen bei der Entwicklung einer Kleinanlagentechnik sind:

- Wie können Abfälle mit Heizwerten, die bei Abfällen zur Verwertung mindestens 11 MJ/kg betragen, in vielen Fällen aber höher sind, mit vertretbarem anlagentechnischen Aufwand umweltfreundlich verfeuert werden ?
- Wie lassen sich durch konstruktive Maßnahmen und eine effiziente Energieerzeugung Kleinanlagen so gestalten, daß sie wirtschaftlich betrieben werden können ?
- Welche Abfälle zur Verwertung lassen sich in Kleinanlagen unter den genannten Voraussetzungen ggf. nach einer Vorbehandlung verfeuern ?

Die Beantwortung dieser Fragen setzt die Errichtung und den Betrieb einer Demonstrationsanlage für die Kleinanlagentechnik in einem praxisnahen Maßstab voraus. Die mit der Demonstrationsanlage zu machenden Betriebserfahrungen sollen zur Entwicklung kommerzieller Anlagen für diesen Leistungsbereich ausgewertet werden.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Planung einer Demonstrationsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe. Im Kapitel 2 werden prinzipiell geeignete Verbrennungsverfahren verglichen. Eine als Demonstrationsanlage besonders geeignete Anlage wird im Kapitel 3 näher beschrieben. Die Wirtschaftlichkeit dieser Anlage wird in Kapitel 4 diskutiert. Im Anschluß daran werden in Kapitel 5 die Untersuchungsziele präzisiert. Die Ergebnisse dieser Studie werden im Kapitel 6 zusammengefaßt und im Rahmen eines Ausblicks diskutiert.

Zielgruppe für Kleinanlagen zur Verwertung sind zum einen Industrie- oder Gewerbebetriebe, die selbst Abfälle zur Verwertung produzieren und einen nicht zu geringen Bedarf an Strom und Wärme besitzen. Stellen sich die Abfälle zur Verwertung als geeignet zur Verbrennung in Kleinanlagen voraus, könnten sie in betriebseigenen Kleinanlagen verwertet werden, und die erzeugte Endenergie könnte vor Ort genutzt werden. Der Betrieb der Anlage würde in diesem Fall aus den vermiedenen Entsorgungskosten und den vermiedenen Kosten für die anderweitige Energieerzeugung oder den Energiebezug finanziert.

Eine weitere Zielgruppe sind Industrie- oder Gewerbebetriebe, aber auch kommunale Einrichtungen mit einem nicht zu geringen und möglichst ausgeglichenem Wärmebedarf. Fallen eigene Abfälle zur Verwertung nicht oder nicht in ausreichender Menge an, könnte eine Kleinanlage mit Ersatzbrennstoff betrieben werden, der z. B. durch die Aufbereitung von Hausmüll oder Industriemüll hergestellt wird. Der Betrieb der Anlage würde in diesem Fall durch die Vergütung für die Verbrennung (und damit Entsorgung) des Ersatzbrennstoffes und über die vermiedenen Kosten für den Wärme- und Strombezug finanziert.

Ein Einsatz von Kleinanlagen zur Verbrennung von unbehandeltem Siedlungsmüll ist im Prinzip möglich, würde aber eine sehr konservative Auslegung und eine aufwendige Konstruktion der Anlagen erfordern. Die Berücksichtigung des in Deutschland üblichen Standards von Müllverbrennungsanlagen würde die Kleinanlagentechnik zur Verbrennung von Siedlungsmüll unwirtschaftlich werden lassen. In Ländern mit geringeren Anforderungen an die Anlagentechnik und -ausstattung, in denen aber dennoch Wert auf niedrige Schadstoffemissionen gelegt wird, können dagegen Kleinanlagen auch für Siedlungsmüll interessante Entsorgungsmöglichkeiten bieten. Z. B. wird in /Seier et al. 1998/ eine Müllverbrennungsanlage mit einem Jahresdurchsatz von 30.000 t/a für Korea entworfen, die auf die Einhaltung der deutschen Grenzwerte für Dioxine und andere Schadstoffe ausgelegt ist und Behandlungskosten von weniger als 130 DM pro Tonne Müll ermöglicht.

## 2 Auswahl eines Verbrennungsverfahrens

Die energetische Verwertung in Kleinanlagen stellt in mehrfacher Hinsicht eine Modifikation der heute üblichen Verbrennung von Siedlungsmüll in Großanlagen dar. Für die Auswahl eines für Kleinanlagen geeigneten Verbrennungsverfahrens sind daher folgende Gesichtspunkte einzubeziehen:

- Die energetische Verwertung ist nach dem Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz auf Abfälle mit einem Heizwert von mindestens 11 MJ/kg beschränkt. In der Praxis wird diese Grenze häufig überschritten - hier ist von Heizwerten bis zu 20 MJ/kg auszugehen. Ein für Kleinanlagen geeignetes Verbrennungsverfahren muß für diese Heizwerte geeignet sein.
- Die spezifischen Investitionen von Abfallbehandlungsanlagen nehmen i. a. mit abnehmender Anlagengröße zu. Konstruiert man daher eine Kleinanlage wie eine maßstäblich verkleinerte herkömmliche Abfallverbrennungsanlage, würde man zu unverhältnismäßig hohen spezifischen Investitionen kommen und nicht wirtschaftlich arbeiten können. Ein Verbrennungsverfahren, das sich zur Konstruktion einer Kleinanlage eignet, muß daher Möglichkeiten für eine Vereinfachung der Ausstattung und Auslegung der Anlage im Vergleich zu einer maßstäblich verkleinerten Großanlage bieten.
- Eine Grenze der Vereinfachungen ist durch die gesetzlichen Regelungen zur Abfallverbrennung gegeben, insbesondere durch die 17. BImSchV. Die Bestimmungen der 17. BImSchV sind nicht nach der Größe der Anlage gestaffelt und gelten daher für eine Kleinanlage in der gleichen Weise wie für eine Großanlage.

Vor diesem Hintergrund wurde der Markt für Verbrennungsanlagen daraufhin untersucht, welche Verbrennungsverfahren zur Entwicklung einer wirtschaftlichen Kleinanlagentechnik in Frage kommen. Um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit machen zu können, wurden Richtpreisangebote für unterschiedliche Verbrennungsverfahren eingeholt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im folgenden dargestellt.

### 2.1 Rostfeuerung mit wassergekühltem Rost

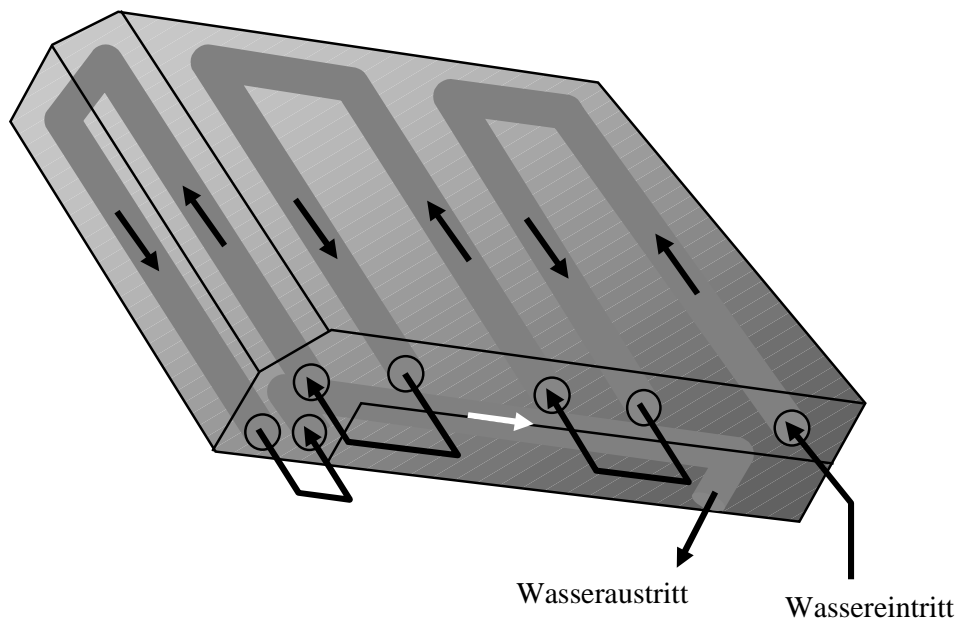
Die Erfahrungen mit den steigenden Heizwerten und der schwankenden Zusammensetzung von Abfällen haben in den letzten Jahren verstärkt zum Einsatz wassergekühlter Roste in Müllverbrennungsanlagen geführt. Darüber hinaus werden wassergekühlte Roste zunehmend in Verbrennungsanlagen für Gebrauchtholz eingesetzt, das mit seinem Heizwert von bis zu ca. 15 MJ/kg repräsentativ für eine Reihe von Abfällen zur Verwertung ist.

Bild 1 kann man den prinzipiellen Aufbau einer wassergekühlten Roststufe am Beispiel eines neueren Systems der MARTIN GmbH entnehmen. Der Rostbelag besteht nicht mehr aus einzelnen Roststäben, sondern aus Roststufen, die über die gesamte Breite der Rostbahn reichen

und von der Seite zugängliche, durchgängige Kanäle enthalten. Durch die Kanäle wird das Kühlmedium, i. a. Wasser, gepumpt. Dadurch wird eine gute Wärmeabfuhr erreicht.

Während die mittlere Lebensdauer von ungekühlten Roststäben im Bereich von 30.000 bis 50.000 Betriebsstunden liegt, muß ein gewisser Prozentsatz der Roststäbe bereits nach ca. 10.000 Betriebsstunden ausgetauscht werden. Dabei handelt es sich meist um die thermisch am höchsten belasteten Roststäbe. Durch die Verwendung wassergekühlter Roststäbe kann die Lebensdauer der thermisch am höchsten belasteten Roststäbe verlängert werden.

Ein weiterer Vorteil der Wasserkühlung besteht im Gewinn eines zusätzlichen Freiheitsgrades in der Feuerführung. In Rostsystemen ohne Wasserkühlung dient die Verbrennungsluft, die durch die Roststäbe bzw. zwischen den Roststäben hindurch in das Brennstoffbett gegeben wird, als Kühlmedium für die Roststäbe. Um eine ausreichende Kühlung zu gewährleisten, wird oft eine größere Luftmenge durch den Rost zugegeben, als für den Verbrennungsprozeß erforderlich ist. Die Wasserkühlung erlaubt nun die Anpassung der Luftmenge an den Verbrennungsprozeß. Dadurch kann z. B. ein verfrühtes Trocknen, Entgasen und Zünden des Brennstoffs verhindert werden.



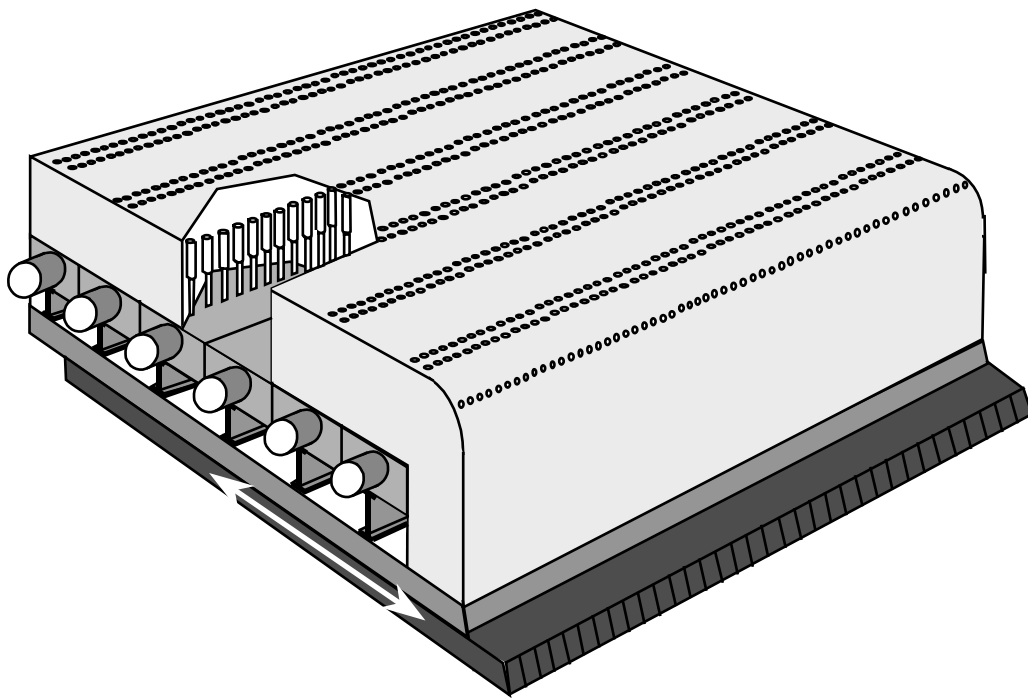
**Bild 1:** Querschnitt durch eine wassergekühlte Roststufe mit dem MARTIN-System

Ein Nachteil der Wasserkühlung besteht darin, daß einige Prozent der Wärmeleistung der Verbrennungsanlage an das Kühlwasser abgegeben werden. Diese Wärme fällt auf einem technisch schlecht nutzbaren Temperaturniveau an. Dadurch kann der energetische Nutzungsgrad einer Verbrennungsanlage mit wassergekühlter Rostfeuerung abnehmen. Ein weiterer Nachteil besteht in den hohen Investitionen, die durch den zusätzlichen Aufwand für die Wasserkühlung nötig sind.

## 2.2 Rostfeuerung mit Wirbeldüsenrost

Eine Bauart für Rostfeuerungen, die speziell für schwierige Brennstoffe entwickelt wurde, ist die Wirbeldüsenrostfeuerung (vgl. /DE19736003A1/). Der Wirbeldüsenrost besteht aus Luftkästen, auf die eine Vielzahl von Düsen aufgeschweißt ist. Die Zwischenräume zwischen den Düsen sind mit einer schlackeabweisenden, hochfeuerfesten Stampfmasse ausgekleidet, die einen hohen Anteil an Siliciumcarbid enthält. Dadurch erreicht der Rost eine hohe thermische Belastbarkeit von bis zu  $2,5 \text{ MW/m}^2$  und ist vergleichbar mit einem wassergekühlten Rost.

Eine einzelne Roststufe ist in Bild 2 dargestellt. Die Oberfläche einer Roststufe bildet eine ebene Fläche, mit der die Düsenköpfe bündig abschließen. Dadurch kann kein Rostdurchfall auftreten. Das Eindringen von Staub oder Flüssigkeiten in die Düsen wird durch den Impuls der austretenden Luft verhindert. Der Brennstofftransport über die Roststufen erfolgt über Schieber. Die Bewegungsrichtung der Schieber ist in Bild 2 durch einen Pfeil angedeutet.



**Bild 2:** Roststufe eines Wirbeldüsenrosts

Die Primärluft tritt mit einer Geschwindigkeit von bis zu  $120 \text{ m/s}$  aus den Düsen aus. Dadurch können leichte Brennstoffteilchen aufgewirbelt werden und in der Schwebeluft verbrennen. Um auch größere Brennstoffteilchen bewegen zu können, kann in Schüben Luft oder Dampf mit sehr hoher Geschwindigkeit (bis zu  $300 \text{ m/s}$ ) durch die Düsen gepreßt werden. Die hohen Dampf- bzw. Luftgeschwindigkeiten führen zu einer guten Vermischung von Brennstoff und Verbrennungsluft. Durch eine getrennte Regelung der Primärluftgeschwindigkeit in den verschiedenen Roststufen einer Rostfeuerung kann man den Ablauf der Verbrennung regeln. Von

der Verbrennungscharakteristik aus beurteilt liegt der Wirbeldüsenrost zwischen einer klassischen Festbettfeuerung und einer stationären Wirbelschichtfeuerung.

Nachteile des Wirbeldüsenrostes bestehen im hohen Energieverbrauch zur Erzielung der hohen Primärluftgeschwindigkeiten und in der geringen Erfahrung mit diesem Rostsystem. Derzeit ausgeführte Anlagen mit Wirbeldüsenrosten werden nur mit Gebrauchtholz betrieben (vgl. /Mensing, Mayer, Pauli 1997/).

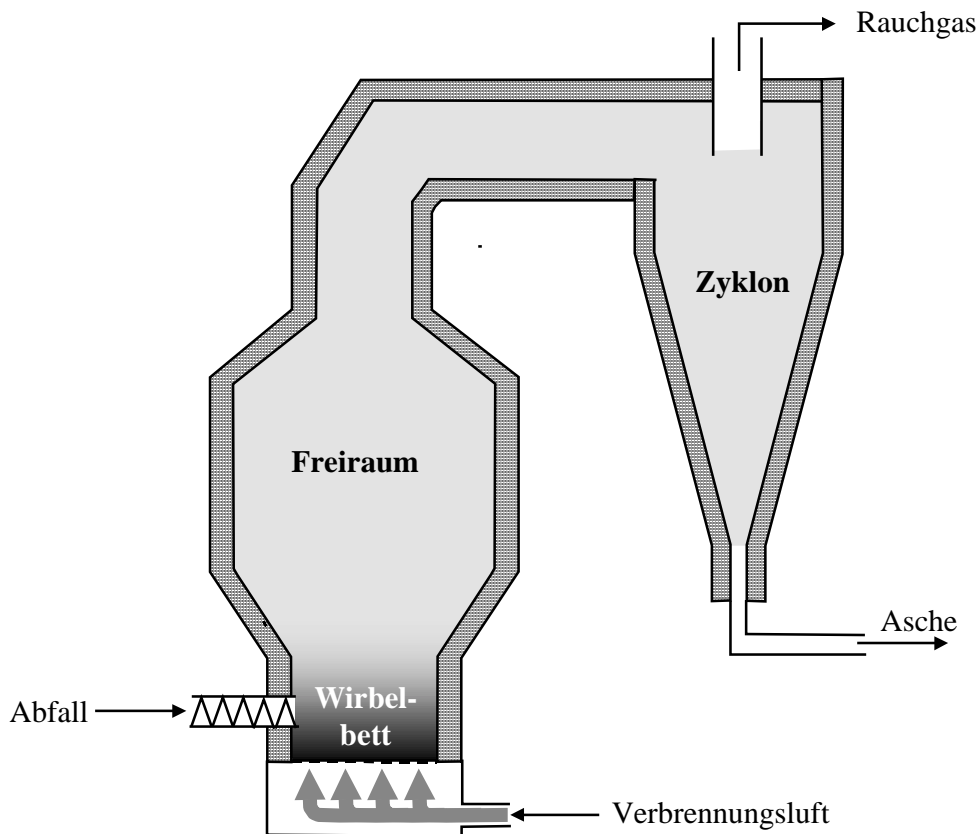
### **2.3 Wirbelschichtfeuerung**

Eine Verbrennungstechnik, die für eine ganze Reihe von Brennstoffen wesentliche Vorteile bietet, ist die Wirbelschichtfeuerung. Einige Konzepte für dezentrale Anlagen zur Verbrennung von Klärschlamm, aber auch Siedlungsmüll und anderen Abfällen (siehe z. B. /Thyssen 1999/) bauen daher auf einer stationären Wirbelschichtfeuerung auf.

Der prinzipielle Aufbau einer Wirbelschichtfeuerung ist in Bild 3 dargestellt. Der zerkleinerte Brennstoff wird mit einer Schnecke o. ä. in den unteren Teil der Feuerung gefördert. Dort befindet sich eine Sandschicht, die durch den aus einem Düsenboden austretenden Verbrennungsluftstrom fluidisiert und dadurch in der Schwebelage gehalten wird. Durch die wirbelnde Bewegung wird ein guter Wärme- und Stoffaustausch zwischen der Verbrennungsluft und dem Brennstoff-Sand-Gemisch erreicht. Die eigentliche Verbrennung läuft in der wirbelnden Sandschicht und in dem darüber befindlichen Freiraum ab. Insgesamt kann so ein guter Ausbrand erreicht werden. Nach dem Verlassen des Freiraums gelangt das Rauchgas in einen Zyklon zur Staubabscheidung, bevor es in den Abhitzeessel geleitet wird.

Die Vorteile einer Wirbelschichtfeuerung liegen darin, daß man einen guten Ausbrand auch wasser- und aschereicher Brennstoffe, z. B. auch qualitativ minderwertiger Kohle oder Klärschlamm erreichen kann. Durch die speziellen Verbrennungsbedingungen in einer Wirbelschicht und die Möglichkeit der primären Schwefeleinbindung kann man bei vielen Brennstoffen auf nachgeschaltete Anlagen zur Entstickung und Entschwefelung verzichten. Dieser Vorteil der Wirbelschicht läßt sich aber nicht generell im Falle von Abfällen zur Verwertung voraussetzen, sondern trifft nur im Fall nicht zu hoher Schadstoffgehalte zu.

Die Nachteile der Wirbelschichtfeuerung bestehen in der notwendigen und relativ aufwendigen Aufbereitung des Brennstoffs. Um feste Abfälle zur Verwertung einzusetzen, müssen sie auf eine Kantenlänge von einigen Zentimetern zerkleinert werden. Die genauen Größenangaben schwanken von Hersteller zu Hersteller. Die zur Zerkleinerung notwendigen Aggregate sind sehr investitionsintensiv, was sich bei kleinen Anlagen überdurchschnittlich bemerkbar macht. Weiterhin liegen im Bereich der hier untersuchten Leistungen die spezifischen Investitionen für eine Wirbelschichtfeuerung über denen einer Rostfeuerung.

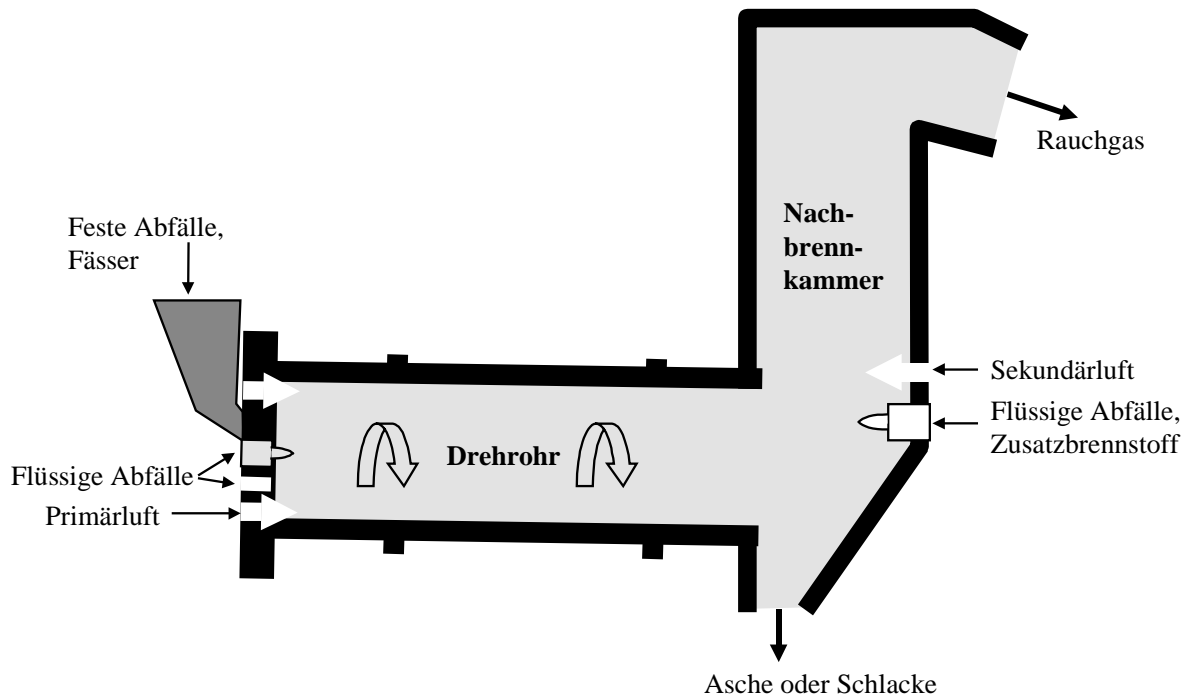


**Bild 3:** Aufschnitt durch eine stationäre Wirbelschichtfeuerung

## 2.4 Drehrohrfeuerung

Ein universell für feste, pastöse und flüssige Abfälle einsetzbares Verbrennungsverfahren ist die Verbrennung im Drehrohr mit angeschlossener Nachbrennkammer. Das Drehrohr (vgl. Bild 4) ist im wesentlichen ein rotierender, in Achsrichtung geneigter Stahlzylinder, der innen mit feuerfestem Material ausgemauert ist. Durch die Drehbewegung wird der Brennstoff häufig umgeschichtet und der Kontakt zwischen dem Brennstoff und der im Gleichstrom über die Stirnseite zugegebenen Verbrennungsluft hergestellt. Die Asche bzw. Schlacke kann fest oder flüssig am Ende des Drehrohrs abgezogen werden. Das Rauchgas wird in der Nachbrennkammer mit Sekundärluft vermischt und ausgebrannt. Um einen guten Ausbrand der Gasphase zu erzielen, wird in vielen Fällen ein zusätzlicher Gasbrenner in der Nachbrennkammer betrieben.

Die Vorteile der Drehrohrfeuerung liegen darin, daß sehr viele unterschiedliche Brennstoffe verbrannt werden können, die für sonstige Feuerungssysteme nicht geeignet sind. Darunter fallen viele Arten von Sondermüll, z. B. flüssige und pastöse Abfälle, die in Fässern in das Drehrohr gegeben werden können. Die Zusammensetzung und der Heizwert der aufgegebenen Abfälle können breiten Schwankungen unterliegen.



**Bild 4:** Querschnitt durch eine Drehrohrofenanlage

Ein Nachteil der Verbrennung im Drehrohr liegt in der schlechten Steuerbarkeit des Verbrennungsprozesses, da entlang des Drehrohrs keine Luft zugegeben werden kann. Um einen ausreichenden Ausbrand der Asche bzw. Schlacke zu erreichen, wird mit großem Luftüberschuß gearbeitet. Trotzdem weisen die festen Rückstände oft einen für eine Deponierung zu hohen Restkohlenstoffgehalt auf.

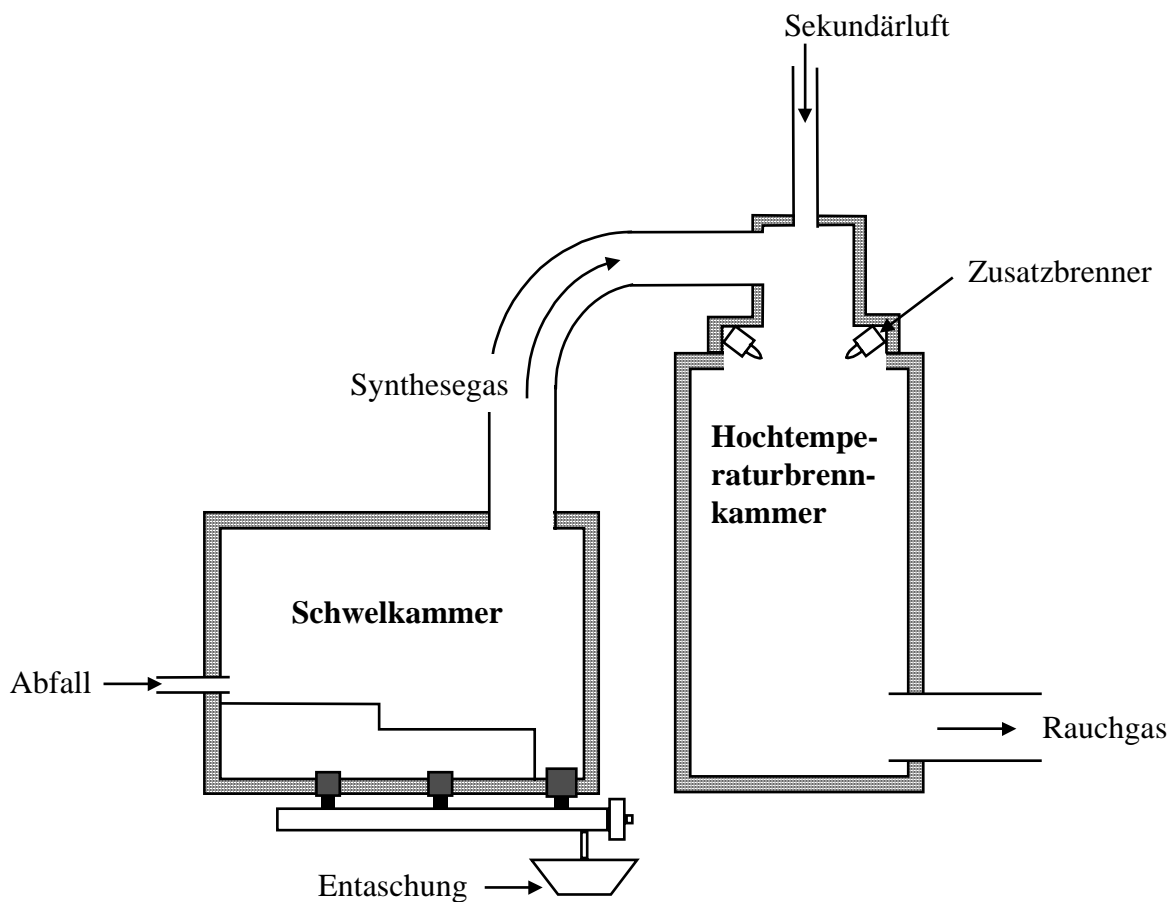
Durch die hohen Luftzahlen sinkt der Wirkungsgrad einer Drehrohrfeuerung. Diese Tendenz wird durch die hohen Abstrahlungsverluste verstärkt, die bei kleinen Anlagen durch das ungünstige Verhältnis von Oberfläche zu Volumen überproportional ansteigen. Eine ausreichende Isolierung ist wegen der Bewegung des Drehrohrs nicht zu erreichen. Ein weiterer Nachteil einer Drehrohrfeuerung sind die im Vergleich zu Rost- oder Wirbelschichtfeuerungen hohen Kosten. Neben der hohen Investition fallen hier die Kosten für die Wartung und Instandhaltung der Ausmauerung des Drehrohrs besonders ins Gewicht.

## 2.5 Mehrstufige Verfahren

Neben den klassischen Verfahren zur Verbrennung von Abfällen wurden in den letzten Jahren Verfahren entwickelt, bei denen die Teilprozesse der Verbrennung in räumlich getrennten Reaktoren durchgeführt werden. Prinzipiell können mehrstufige Verfahren auch für Kleinanlagen zur energetischen Verwertung eingesetzt werden. Das in /Mickel 1996/ beschriebene Verschmelzungs-Hochtemperaturverbrennungs-Verfahren wird bereits zur energetischen Ver-



wertung von 2.000 t/a eines Produktionsrückstandes betrieben. Dieses Verfahren wird im folgenden beispielhaft für mehrstufige Verfahren vorgestellt.



**Bild 5:** Schema des Verschmelzungs-Hochtemperaturverbrennungs-Verfahrens nach /Mickel 1996/

In der Schwelkammer (vgl. Bild 5) wird der zerkleinerte Abfall autotherm auf einem Rost ent- bzw. vergast. Vergasungsmittel ist Luft. Die notwendige Wärme wird durch die Oxidation eines Teils des Brennstoffs erzeugt. Das Synthesegas wird in den oberen Teil einer stehenden Hochtemperaturbrennkammer geleitet, mit Sekundärluft vermischt und verbrannt. Die festen Rückstände brennen auf dem Rost aus und gelangen von dort in einen Entascher.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, daß durch die Trennung von Verschmelzung und Verbrennung eine sehr guter Ausbrand der Gasphase erreicht werden kann. Die Emissionen an Kohlenmonoxid und organischen Stoffen unterschreiten die Grenzwerte der 17. BImSchV deutlich. Auch die Emissionen an Stickoxiden können ohne nachgeschaltete Entstickung unter den Grenzwerten der 17. BImSchV gehalten werden. Diese Erfahrungswerte gelten allerdings nur, solange stickstoffarme Produktionsrückstände verbrannt werden, und dürfen nicht für auf beliebige Abfälle zur Verwertung übertragen werden. Ein weiterer Vorteil des Verschwe-

lungs-Hochtemperaturverbrennungs-Verfahrens liegt darin, daß trotz des heizwertreichen Brennstoffs der Rost thermisch nicht stark belastet wird.

Im Gegensatz zum Ausbrand der Gasphase ist der Ausbrand der festen Phase nicht in allen Betriebszuständen zufriedenstellend. Der Restkohlenstoffgehalt von 1 % TOC, der für eine Ablagerung der Asche auf einer Deponie der Klasse I notwendig ist, wird häufig überschritten. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens liegt in der aufwendigen Verfahrenstechnik, die im allgemeinen höhere Investitionen als für einstufige Verfahren zur Folge hat. Der wirtschaftliche Betrieb einer Anlage mit 2.000 t/a im Fall von /Mickel 1996/ ist auf sehr spezielle Randbedingungen zurückzuführen und kann nicht verallgemeinert werden.

## **2.6 Auswahl eines Verbrennungsverfahrens für eine Demonstrationsanlage**

Sämtliche in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren sind prinzipiell zur Verbrennung von Abfällen zur Verwertung in Kleinanlagen geeignet. Die Stärken der Verfahren liegen allerdings zum Teil an anderer Stelle. Die Vorteile der Wirbelschicht kommen besonders bei wasser- und aschereichen Brennstoffen zur Geltung, bei denen ggf. auf Komponenten einer nachgeschalteten Rauchgasreinigung verzichtet werden kann. Der Vorteil der Drehrohrfeuerung ist, daß sie für pastöse und flüssige Brennstoffe oft die einzig geeignete Feuerung ist. Daher wird sie zur Verbrennung vieler Arten von Sondermüll eingesetzt.

Für die energetische Verwertung kommen dagegen nur Abfälle mit relativ hohem Heizwert (nach dem Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz mindestens 11 MJ/kg) in Frage. In den meisten Fällen sind diese Abfälle fest und trocken. Diese Brennstoffe können i. a. in einer einstufigen Rostfeuerung verbrannt werden, die im Vergleich zu den anderen vorgestellten System den geringsten verfahrenstechnischen Aufwand und die niedrigsten Investitionen verursacht. Dieser Vorteil ist besonders ausgeprägt bei kleiner Anlagengröße.

Diese Argumente führten dazu, daß für die Planung einer Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung eine Rostfeuerung zugrunde gelegt wurde. Die Entscheidung zwischen einem wassergekühlten Rost und einem Wirbeldüsenrost wurde aufgrund der unterschiedlichen Kosten für die beiden Rostsysteme getroffen. Der Wirbeldüsenrost erfordert pro m<sup>2</sup> Rostfläche geringere Investitionen und kann für einen gegebenen Durchsatz kleiner ausgelegt werden als ein wassergekühlter Vorschubrost.

Bisher wurde die Eignung des Wirbeldüsenrosters für einen speziellen Abfall zur Verwertung, Gebrauchtholz, gezeigt (vgl. /Mensing, Mayer, Pauli 1997/). Daher ergibt sich als wesentliches Ziel für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung, die Eignung des Wirbeldüsenrosters für ein breiteres Band an Abfällen zur Verwertung zu überprüfen.

### 3 Konzeption einer Demonstrationsanlage

Die Aufgabe einer Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung besteht darin, zu zeigen, daß eine energetische Verwertung in Kleinanlagen für eine Reihe von Abfällen zur Verwertung eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Alternative zu den bisherigen Entsorgungswegen darstellt. Eine dazu geeignete Anlagentechnik soll durch eine sukzessive Anpassung und Verbesserung der für die Demonstrationsanlage verwendeten Technik entwickelt werden. Das für Kleinanlagen in Frage kommende Spektrum an Brennstoffen (Abfälle zur Verwertung) steht nicht a priori fest, sondern ist durch gezielte Versuche mit der Demonstrationsanlage zu ermitteln.

Um diese Aufgabe zu erfüllen, muß eine Demonstrationsanlage wirtschaftlich betrieben werden können und verallgemeinerbare Ergebnisse liefern. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- Die Investition muß möglichst niedrig gehalten werden. Dazu sind Vereinfachungen gegenüber dem bei Großanlagen üblichen Stand der Anlagentechnik und -ausstattung nötig, die über die maßstäbliche Verkleinerung hinausgehen.
- Die Bedienung der Anlage muß mit sehr geringem Personaleinsatz möglich sein.
- Dazu muß die Beschickung der Anlage weitgehend automatisiert werden. Das erfordert bei einigen Brennstoffen eine vorherige mechanische Behandlung des Abfalls, die ggf. anlagenextern vorgenommen wird.
- Die Anlage muß in einer Fahrweise mit Kraft-Wärme-Kopplung betrieben werden. Die Wärmeabgabe muß über eine möglichst große Stundenzahl pro Jahr gewährleistet sein.
- Die Anlage muß eine hohe Verfügbarkeit aufweisen.
- Es muß ein genehmigungsfähiger Regelbrennstoff vorhanden sein, mit dem die Anlage ganzjährig betrieben werden kann.

In den folgenden Abschnitten wird das Konzept für eine Demonstrationsanlage vorgestellt, die diese Anforderungen erfüllt. Als Standort der Demonstrationsanlage ist das Forschungszentrum Karlsruhe vorgesehen. Der Betrieb der Anlage inkl. der Beschaffung des Brennstoffs sollen von einem externen Contractor vorgenommen werden. Die wissenschaftliche Begleitung des Betriebs und die Durchführung der Verbrennungsversuch kann durch das Personal des Forschungszentrums Karlsruhe unterstützt werden.

Die Größe der Demonstrationsanlage wird so gewählt, daß ein wirtschaftlicher Betrieb unter den gegebenen Randbedingungen gerade noch möglich ist. Da die im Forschungszentrum Karlsruhe gegebenen Randbedingungen nicht sehr speziell sind, lassen sie eine Verallgemeinerung der im Forschungszentrum erzielten Ergebnisse zu.

### **3.1 Anlagentechnik**

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, wurde eine Wirbeldüsenrostfeuerung als Verbrennungsverfahren für eine Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung ausgewählt. Die Einbindung einer Wirbeldüsenrostfeuerung in eine Gesamtanlage zeigt das Blockschaltbild in Bild 6. Die Funktionen der einzelnen Komponenten werden auf den folgenden Seiten erklärt.

#### **Brennstoffbevorratung und -beschickung**

Für den regelmäßigen Betrieb der Anlage wird ein Regelbrennstoff ausgewählt, der einen Anlagenbetrieb über eine möglichst große Stundenzahl pro Jahr ermöglicht. Da ein dazu geeigneter Abfall zur Verwertung im Forschungszentrum Karlsruhe nicht in der erforderlichen Menge anfällt, wird er extern von Unternehmen aus der Entsorgungsbranche beschafft. Die Anlieferung erfolgt in LKW (Kippern).

Zusätzlich sollen in Verbrennungsversuchen unterschiedliche Industrie- und Gewerbeabfälle auf ihre Eignung zur Verwertung in Kleinanlagen überprüft werden. Diese Abfälle werden von Industrie- oder Gewerbebetrieben beschafft, die eigenes Interesse an der Durchführung der Verbrennungsversuche haben.

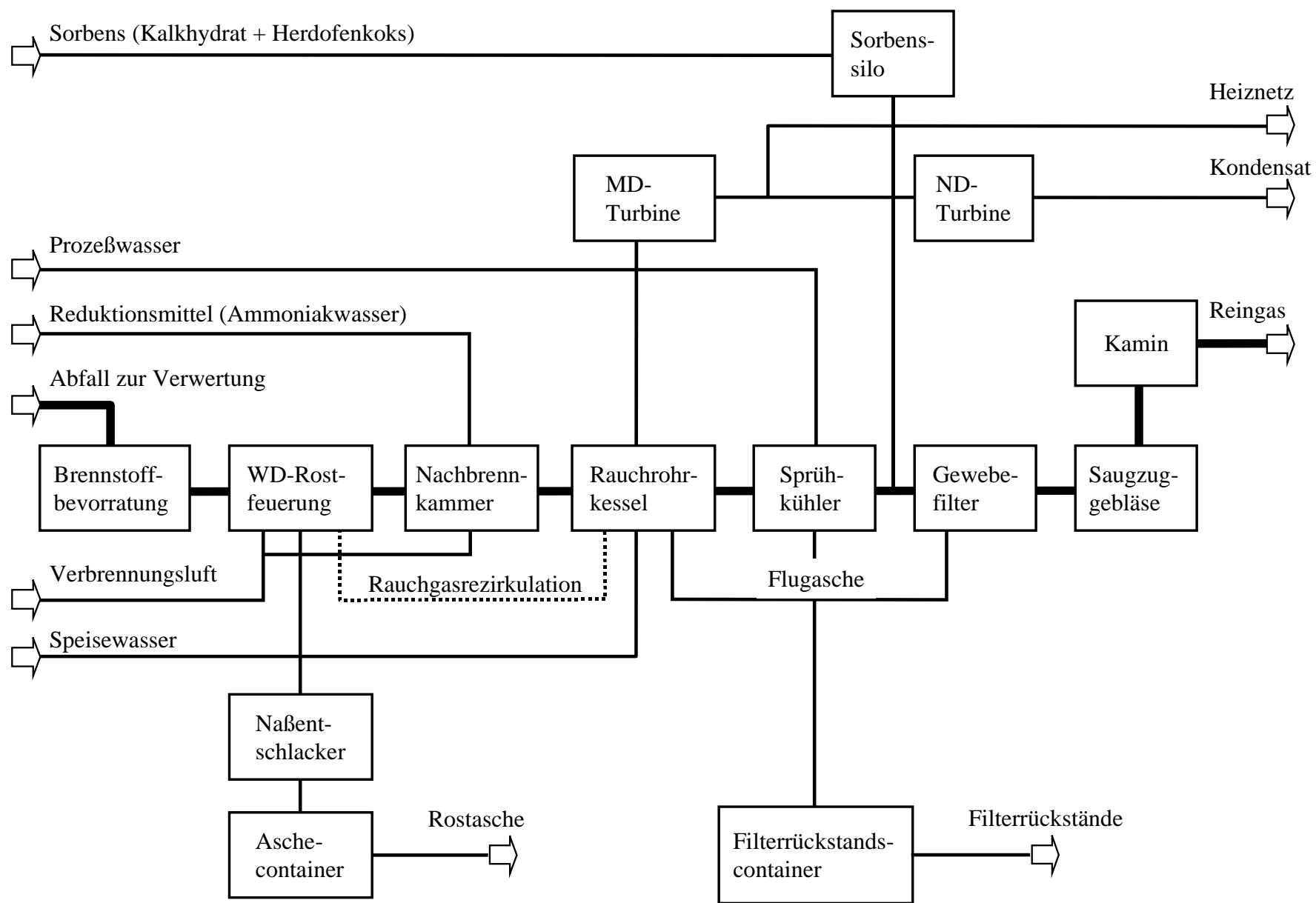
Der Brennstoff wird in einen Bunker abgekippt, der mit einem Schubboden ausgestattet ist. Um einen störungsfreien Betrieb des Schubbodens zu erreichen, darf der Brennstoff eine Kantenlänge von 10 cm bis maximal 20 cm nicht überschreiten. Kleinere Stückgrößen sind vorteilhaft, da sie die Gefahr von Störungen verkleinern. Gegebenenfalls muß der Abfall beim Entsorgungsunternehmen, das den Brennstoff liefert, vorzerkleinert werden.

Der Brennstoff wird von einem Kratzkettenförderer schräg nach oben in den Einfülltrichter der Feuerung gefördert. Der Einfülltrichter mündet in einen Aufgabetisch. Der Brennstoff fällt durch den Trichter auf den Aufgabetisch. Nach oben hin bildet sich eine Brennstoffsäule aus. Vom Aufgabetisch wird die unterste Brennstoffschicht durch einen Zuteilschieber auf die erste Roststufe gefördert. Auf diese Weise erreicht man eine quasikontinuierliche Beschickung der Feuerung, die eine Voraussetzung für eine gleichmäßige Verbrennung mit niedrigen Schadstoffemissionen ist.

#### **Wirbeldüsenrostfeuerung**

Für die in Frage kommenden Brennstoffe wird eine Feuerung mit drei Roststufen benötigt (vgl. Bild 7). Die drei Roststufen erfüllen unterschiedliche Aufgaben im Verbrennungsprozeß. Daher wird pro Roststufe eine unterschiedliche Primärluftgeschwindigkeit eingestellt.

Bild 6: Blockschaubild für eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung



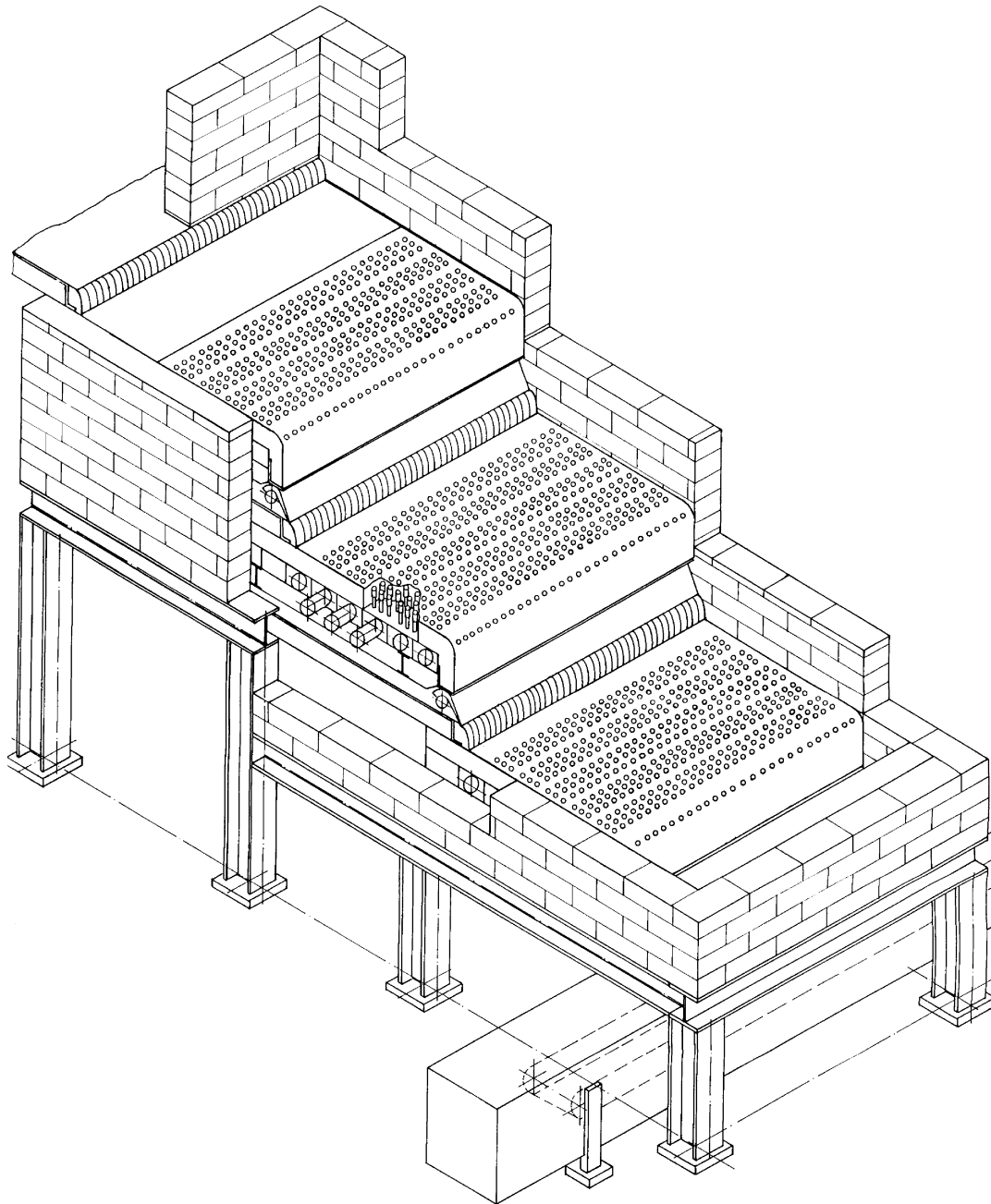
- Die erste Roststufe dient der Trocknung und Entgasung des Brennstoffs. Bei heizwertreichen Abfällen zur Verwertung ist für diese Aufgaben nur eine geringe Luftzugabe von ca. 20 % der Primärluftmenge erforderlich. Entsprechend wird eine niedrige Primärluftgeschwindigkeit eingestellt.
- Die zweite Roststufe bildet die Hauptverbrennungszone. Um eine ausreichende Luftmenge (ca. 50 % der gesamten Primärluftmenge) für den Oxidationsprozeß zur Verfügung zu stellen, wird je nach den aktuellen Erfordernissen eine hohe Primärluftgeschwindigkeit gewählt. Maximal kann eine Primärluftgeschwindigkeit von 120 m/s am Düsenaustritt erreicht werden.
- Die dritte Roststufe dient dem Ausbrand der festen Verbrennungsrückstände. Die Luftgeschwindigkeit wird so eingestellt, daß unverbrannte Bestandteile der Asche oxidiert werden, aber kein Schmelzfluß auftritt. In dieser Roststufe werden ca. 30 % der gesamten Primärluftmenge zugegeben.

Die Versorgung der Feuerung mit Primärluft erfolgt über ein frequenzgeregeltes Primärluftgebläse, das Luft aus dem Bunkerbereich durch einen Schalldämpfer ansaugt und dem Unterwindverteiler zuführt. Von dort werden die drei Roststufen versorgt. Zur Drosselung der Luftgeschwindigkeit befinden sich Klappen in der Luftzuführung zu den Rostkästen. Zusätzlich zur Verbrennungsluftzugabe kann Luft oder Dampf stoßweise durch die Wirbeldüsen geleitet werden. Damit können eventuell auftretende Verstopfungen der Düsen beseitigt werden.

Der Transport des Brennstoffs von einer Roststufe zur nächsten erfolgt über luftgekühlte Schieber. Die Schieber arbeiten unabhängig voneinander und sind in ihrer Geschwindigkeit regelbar. Durch die Schubbewegung wälzen sie den Brennstoff zusätzlich um und tragen zu einer Verbesserung des Ausbrandes bei.

Der Feuerraum oberhalb des Rostes ist mit einer schlackeabweisenden und hitzebeständigen Auskleidung versehen. Zur Kühlung des Feuerraums wird Rauchgas vom kalten Ende des Kessels in den Feuerraum zurückgeführt. Das rückgeführte Rauchgas wird durch Düsen in den Feuerraum eingedüst, die sich seitlich über dem Rost in den Feuerraumwänden befinden. Die Rezirkulation bereits ausgebrannter Gase ist erforderlich, um die Temperatur im Feuerraum zu begrenzen und eine Erweichung der Flugasche zu vermeiden.

Zum Anfahren der Anlage befindet sich im Feuerraum ein Brenner für Heizöl oder Erdgas. Außer zum An- und Abfahren der Anlage wird der Brenner für einen Warmhaltebetrieb eingesetzt, wenn auf dem Rost oder in der Brennstoffzuführung eine Störung auftritt.



**Bild 7:** Wirbeldüsenrostfeuerung mit drei Roststufen

### **Nachbrennkammer**

In der Nachbrennkammer werden unverbrannte Bestandteile des Rauchgases ausgebrannt. Dazu wird dem Rauchgas beim Eintritt in die Nachbrennkammer Sekundärluft zugegeben. Die Düsen zur Sekundärluftzugabe sind über den Umfang der Nachbrennkammer verteilt. Neben der Bereitstellung des zur Oxidation benötigten Sauerstoffs hat die Sekundärluft die Aufgabe, das Rauchgas zu durchmischen und zur Vermeidung von Strähnen beizutragen. Dazu wird die Sekundärluft mit hohem Impuls in die Nachbrennkammer eingedüst.

Die Nachbrennkammer muß so gestaltet sein, daß die Verweilzeit der Rauchgase in der Nachbrennkammer gemessen ab der letzten Sekundärluftzugabe mindestens 2 Sekunden beträgt. Die Temperatur muß mindestens 850 °C betragen. Diese in der 17. BImSchV festgelegten Anforderungen müssen auch für Volumenelemente des Rauchgases erfüllt werden, die sich schneller als mit der mittleren Rauchgasgeschwindigkeit bewegen. Eine Verweilzeit von 2 Sekunden und eine Temperatur von 850 °C werden als ausreichend zur Zerstörung organischer Schadstoffe angesehen. Um eine für eine Kleinanlage ungünstig hohe Nachbrennkammer zu vermeiden, wird sie in zwei Zügen mit einer Umlenkung um 180 ° ausgeführt.

Zum Abbau von Stickstoffoxiden wird 25 %-iges Ammoniakwasser mit Hilfe von Druckluft durch Zweistoffdüsen in den Rauchgasstrom eingedüst. Das optimale Temperaturfenster für die Reaktionen des Ammoniaks mit den Stickstoffoxiden (SNCR-Verfahren) liegt zwischen 850 °C und 950 °C und befindet sich damit in der Nachbrennkammer.

### **Rostascheaustrag**

Die auf dem Rost erzeugte Asche wird von der dritten Roststufe per Schieber in einen Schacht befördert, der in das Wasserbad eines Naßentschlackers mündet. Dort wird die Asche gelöscht. Ein Kratzkettenförderer transportiert die Asche vom Boden des Naßentschlackers in einen Aschecontainer, in dem sie für den Abtransport gesammelt wird.

### **Abhitzeessel**

Die Nutzung des Wärmeinhalts des Rauchgases erfolgt in einem Abhitzeessel. Als Abhitzeessel ist ein mehrzügiger Rauchrohrkessel mit einer Vorschaltheizfläche und einem Überhitzer vorgesehen. Die Wasserrohre der Vorschaltheizfläche sind in die Nachbrennkammer eingebaut und nehmen einen Teil der Rauchgaswärme auf, bevor das Rauchgas in die Rohre des Rauchrohrkessels tritt. Der Überhitzer wird in die Umlenkammer zwischen dem ersten und zweiten Zug des Rauchrohrkessels eingebaut.

Mit dieser Kesselbauweise erreicht man Dampfparameter von 28 bar und 380 °C. Diese Dampfparameter sind für die Aufgabe der Kraft-Wärme-Kopplung, bei der es um die Erzielung eines hohen Gesamtnutzungsgrades geht, ausreichend. Höhere Dampfparameter erlauben höhere elektrische Wirkungsgrade, erfordern aber den Einsatz eines reinen Wasserrohrkessels, der die Investition für eine Kleinanlage wesentlich erhöhen würde.

In den rauchgasdurchströmten Rohren des Kessels und in den Umlenkungen zwischen den Zügen kann es zu Ablagerungen von Flugasche kommen. Daher müssen diese Stellen in regelmäßigen Abständen gereinigt werden und entsprechend leicht zugänglich gestaltet sein.



Hinter dem Kessel wird ein Teil des Rauchgases abgezogen und in den Feuerraum rezirkuliert. Falls sich das Rauchgas als zu staubhaltig herausstellt, kann ein Zyklon zur Staub-Vorabscheidung zwischen die Nachbrennkammer und den Rauchrohrkessel geschaltet werden.

## Rauchgasreinigung

Als für Kleinanlagen zu energetischen Verwertung geeignetes Verfahren zur Rauchgasreinigung wird die konditionierte Trockensorption angesehen. Bei diesem Verfahren wird das Rauchgas nach Verlassen des Kessels in einen *Sprühkühler* geleitet, in dem Wasser sehr fein verdüst wird. Durch die Befeuchtung des Rauchgases werden die Reaktionsbedingungen für die nachgeschaltete Trockensorption wesentlich verbessert. Gleichzeitig wird das Rauchgas auf eine für die Trockensorption optimale Temperatur um 140 °C abgekühlt. Das versprühte Wasser soll vollständig verdampfen. Dazu wird der Sprühkühler so gestaltet, daß der Wassereindüsung eine Verdampfungsstrecke ohne Umlenkungen folgt. Abwasser fallen im Sprühkühler wie in der gesamten Rauchgasreinigung nicht an.

Zusätzlich zur Wassereindüsung wird im Sprühkühler dem Rauchgas das Sorbens zugegeben, das aus eine Mischung aus Kalkhydrat,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , und Aktivkoks besteht. Das Sorbens wird bereits als Mischung angeliefert und im Sorbenssilo gelagert. Die Korngrößenverteilungen der beiden Bestandteile sind so aufeinander abgestimmt, daß eine Entmischung vermieden wird.

Nach einer Mischstrecke wird der beladene Rauchgasstrom auf die Kammern eines *Gewebe-filters* verteilt. Der Gasstrom tritt durch das Filtermaterial, während Flugstaub und das mitgetragene Sorbens auf der Filteroberfläche abgeschieden werden. Dadurch baut sich auf der Filteroberfläche eine Filterhilfsschicht auf, die die Filterwirkung des Gewebes unterstützt. Materialien für das Gewebe sind Nadelfilze aus aromatischem Polyamid (temperaturbeständig bis 180 °C), PTFE (beständig bis 250 °C) oder GoreTex<sup>®</sup> (beständig bis 250 °C).

Die Reaktionen der Schadstoffe im Rauchgas mit dem Sorbens laufen überwiegend in der Filterhilfsschicht ab. Saure Schadgase reagieren nach den folgenden Bruttoreaktionsgleichungen mit dem Kalkhydrat:



Die Einbindung des HF und des HCl nach Reaktion (1) und (4) verläuft gegenüber der Einbindung des SO<sub>2</sub> nach Reaktion (2) energetisch bevorzugt. Für diese Schadstoffe wird auch ohne Befeuchtung des Rauchgases eine hohe Abscheideleistung erreicht. Für SO<sub>2</sub> erreicht man dagegen erst durch die im Sprühkühler vorgenommene Befeuchtung des Rauchgases eine ausreichende Abscheideleistung. Zur Erklärung der Verbesserung der SO<sub>2</sub>-Abscheidung geht man davon aus, daß der Wasserdampf im Rauchgas eine Hydrathülle um die Partikel des Sorbens bildet, die den Übergang des SO<sub>2</sub> aus der Gasphase auf die Partikeloberfläche begünstigt.

Die Reaktivität des CO<sub>2</sub> (Reaktion (5)) gegenüber dem Kalkhydrat ist wiederum kleiner als die des SO<sub>2</sub>. Da die Konzentration des CO<sub>2</sub> aber wesentlich höher als die der Schadstoffe HCl, SO<sub>2</sub> und HF ist, führt die Reaktion (5) dennoch zu einer Umwandlung eines Teils des Kalkhydrats zu Calciumcarbonat. Diese Reaktion ist unerwünscht, da sie zu einem Sorbensverbrauch führt. Unter Einbeziehung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Kalkhydrat stellt die CO<sub>2</sub>-Einbindung keine Umweltentlastung dar: Kalkhydrat wird mit hohem Energieaufwand durch das Brennen von Kalkstein (CaCO<sub>3</sub>) unter Abspaltung von CO<sub>2</sub> hergestellt.

Schwermetalle und organische Schadstoffe, u. a. polychlorierte Dibenzodioxine und -furane, reagieren nicht mit dem Kalkhydrat. Sie werden vom Aktivkoks adsorbiert. Die Rohgaskonzentration dieser Schadstoffe und die geforderte Abscheideleistung bestimmen den Anteil des im Vergleich zum Kalkhydrat teureren Aktivkoks im Sorbens. Übliche Zusammensetzungen liegen bei 97 % Kalkhydrat und 3 % Aktivkoks. Als Aktivkoks wird üblicherweise der aus Braunkohle sehr günstig herstellbare Herdofenkoks verwendet.

Für eine ausreichende Abscheidung ist neben der Feuchte des Rauchgases die Temperatur im Gewebefilter entscheidend. Gute Ergebnisse werden in einer Müllverbrennungsanlage erzielt, deren Gewebefilter bei einer Temperatur von 142 °C bis 145 °C betrieben wird (vgl. /Metschke et al. 1997/). Die Grenzwerte der 17. BImSchV werden dort sicher eingehalten.

Durch die Abscheidung von Staub und Sorbens auf der Oberfläche des Gewebes wächst die Dicke der Filterhilfsschicht kontinuierlich an. Um den Druckverlust über den Gewebefilter zu begrenzen, wird der Filter in regelmäßigen Abständen durch Druckluftstöße gereinigt. Die Filterhilfsschicht, die aus Flugasche, den Reaktionsprodukten der Schadstoffe mit dem Sorbens und unreaktiertem Sorbens besteht, fällt in Spitzbunker an der Unterseite des Filtergehäuses. Von dort werden sie mit einer Schnecke zur Entsorgung in einen *Filterrückstandscontainer* gefördert. Der Container dient zusätzlich zur Aufnahme von Flugstaub, der aus dem Kessel, dem Sprühkühler und den Rauchgaskanälen abgezogen wird.

## **Saugzuggebläse**

Das gereinigte Rauchgas wird durch ein Saugzuggebläse zum Kamin gefördert. Regelgröße für das Saugzuggebläse ist der Unterdruck im Feuerraum.

## **Kamin**

Das gereinigte Rauchgas wird durch einen Kamin in die Atmosphäre geleitet. Im Kamin bzw. im Rauchgaskanal zwischen Saugzug und Kamin befinden sich die in der 17. BImSchV vorgeschriebenen Meßstellen zur Überwachung der Reingaskqualität. Die Meßdaten werden auf einem verplombten Computer gespeichert und der Überwachungsbehörde zur Verfügung gestellt. Die Reingaskonzentrationen müssen den Anforderungen der 17. BImSchV entsprechen.

## **Energienutzung**

Der im Rauchrohrkessel erzeugte und auf 380 °C überhitzte Dampf wird in einer MD-Turbine auf einen Druck von 2,5 bar entspannt. Dabei wird elektrische Energie erzeugt. Der Abdampf aus der MD-Turbine kann zu verschiedenen Zwecken eingesetzt werden. Besteht Bedarf an einer Fernwärmeerzeugung, wird der Dampf in einen entsprechenden Wärmetauscher geleitet. Besteht kein Bedarf an Fernwärme oder ist der Bedarf geringer als die im Abdampf der MD-Turbine enthaltene Energie, wird der Dampf ganz oder teilweise in eine ND-Turbine geleitet, die an einen Kondensator angeschlossen ist. Diese Schaltung besitzt den Vorteil, daß auf Schwankungen der Wärmenachfrage flexibel reagiert werden kann, ohne daß die Feuerung in ihrer Fahrweise beeinflusst wird.

### **3.2 Technische Daten**

Durch einen Vergleich unterschiedlicher Wirtschaftlichkeitsrechnungen wurde die untere Anlagengröße ermittelt, ab der eine Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung im Forschungszentrum Karlsruhe wirtschaftlich betrieben werden kann. Die Forderung nach einem wirtschaftlichen Betrieb umfaßt die Deckung sämtlicher Kosten, die durch den Anlagenbetrieb entstehen, sowie eine Rentabilität für einen externen Betreiber, der als Contractor eine Demonstrationsanlage finanziert und betreibt. Eine weitere Forderung an die Dimensionierung der Anlage ist, daß die erzeugte Endenergie (Strom und Fernwärme) im Forschungszentrum Karlsruhe verbraucht werden kann. Die technischen Daten der kleinsten Anlage, die diese Forderungen erfüllt, sind im folgenden zusammengestellt:

Kapazität: ..... 16.500 t/a  
Durchsatz: ..... 2.200 kg/h

Brennstoff: .....	Abfälle zur Verwertung
Heizwert (Auslegungswert): .....	18 MJ/kg
Feuerungswärmeleistung: .....	11.000 kW <sub>th</sub>
Roststufen: .....	3
Abmessungen pro Roststufe: .....	Breite • Länge = 3 • 2 m <sup>2</sup>
Betthöhe: .....	30 – 40 cm
Kesselleistung: .....	9.700 kW <sub>th</sub>
Dampfleistung: .....	13 t/h
Dampfdruck: .....	28 bar
Dampftemperatur: .....	380 °C
Maximale Stromerzeugung: .....	2670 kW <sub>el</sub>
Maximale Wärmeauskopplung: .....	7800 kW <sub>th</sub>
Stromerzeugung bei maximaler Wärmeauskopplung: .....	1470 kW <sub>el</sub>
Elektrischer Eigenbedarf: .....	200 kW <sub>el</sub>
Wirkungsgrad bei max. Stromauskopplung: .....	22,5 % (netto)
Wirkungsgrad bei max. Wärmeauskopplung: .....	84,3 % (netto)

### 3.3 Einbindung der Demonstrationsanlage in die bestehende Versorgungsstruktur

Für das Forschungszentrum Karlsruhe wurde Anfang 1999 ein Energiekonzept erstellt. Als Vorarbeit für das Energiekonzept wurde eine umfangreiche Datenbasis über die Energieverbrauchs- und -erzeugungsstruktur im Forschungszentrum zusammengestellt, auf die in den folgenden Abbildungen und Ausführungen zurückgegriffen wird. Die Daten beziehen sich auf das Jahr 1997. Da sich die Struktur der Verbraucher und der Erzeugungsanlagen seither nicht wesentlich verändert hat, können die Daten weiterhin als aktuell angesehen werden.

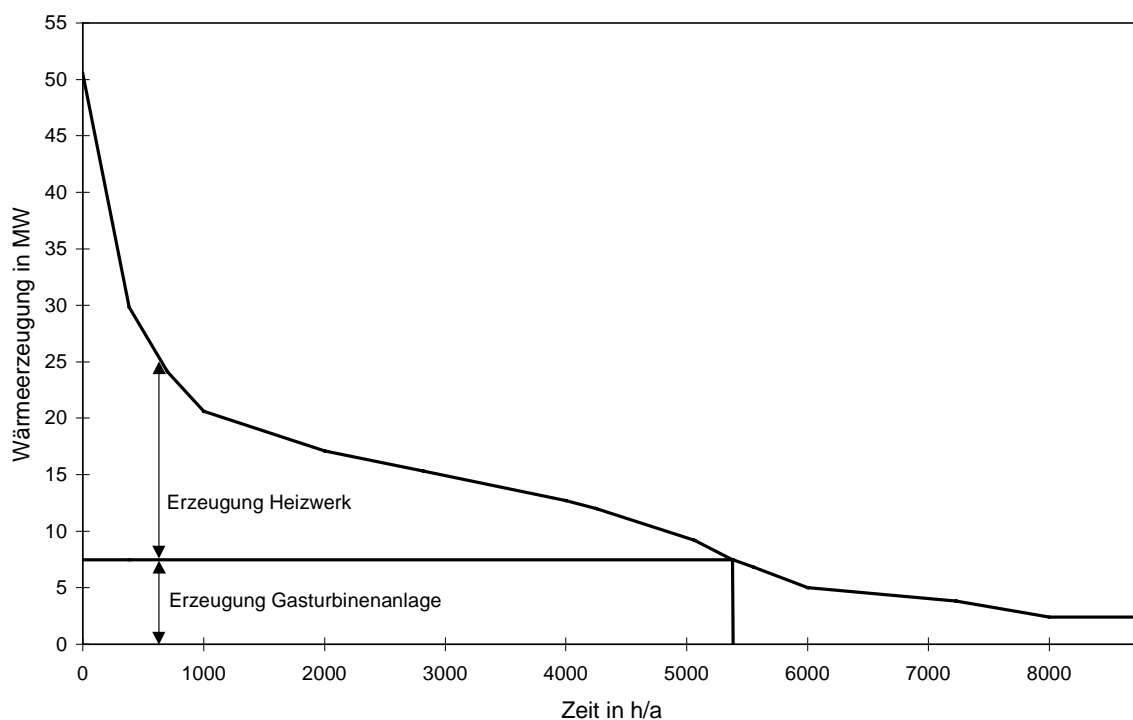
Das Forschungszentrum Karlsruhe verfügt über folgende Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme:

- Eine Gasturbinenanlage mit nachgeschaltetem Abhitzeessel. Die elektrische Leistung der Gasturbine beträgt 4 MW<sub>el</sub>, die thermische Leistung 7,5 MW<sub>th</sub>. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wird die Gasturbine nur bei gesicherter Wärmeabnahme betrieben.
- Einem Wasserrohrkessel zu 11,6 MW<sub>th</sub> und zwei Wasserrohrkesseln zu 23,3 MW<sub>th</sub>. Die Kessel werden mit Erdgas gefeuert und erzeugen Heißwasser, das durch ein Fernwärmenetz zu den Verbrauchern geleitet wird. Die drei Kessel sind zusammen in einem Heizwerk untergebracht.
- Ein heizölgefeuerter Kessel mit 24 MW<sub>th</sub>, der zur Reserve im Heizwerk bereitsteht.

Der Strombedarf im Forschungszentrum Karlsruhe liegt wesentlich über der Stromerzeugung der Gasturbine von  $4 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Die benötigte Leistung liegt fast während des gesamten Jahres über  $10 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Der Strombedarf, der die Eigenerzeugung übersteigt, wird von der EnBW auf der 110 kV-Ebene bezogen und im Forschungszentrum auf der 20 kV-Ebene verteilt. Insgesamt werden pro Jahr 80 - 90 GWh an elektrischem Strom bezogen.

Die Gegenüberstellung der Daten für den Strombedarf und die Stromeigenerzeugung zeigt, daß die Stromerzeugung einer Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung mit einer maximalen Leistung von  $2,47 \text{ MW}_{\text{el}}$  nach Abzug des Eigenbedarfs in das interne Netz des Forschungszentrums eingespeist werden und intern verbraucht werden kann. Eine Einspeisung in das externe Stromnetz braucht nicht betrachtet zu werden.

Die Möglichkeiten zur Einspeisung von Fernwärme von der Demonstrationsanlage in das Fernwärmenetz müssen differenzierter betrachtet werden. Die bisherige Situation der Wärmeerzeugung wird in Bild 8 anhand einer Jahresdauerlinie der Wärmeerzeugung im Forschungszentrum Karlsruhe deutlich. Bei einer Jahresdauerlinie sind die Werte der Wärmeerzeugung nicht chronologisch geordnet, sondern absteigend der Größe nach sortiert. Dadurch stellen die Werte auf der x-Achse ein Maß für die Häufigkeit dar, mit der ein gegebener Wert der Erzeugung über- bzw. unterschritten wird. Die obere Kurve in Bild 8 gibt die gesamte Wärmeerzeugung der Wärmeerzeugungsanlagen im Forschungszentrum Karlsruhe wieder. Zusätzlich ist die Wärmeerzeugung der Gasturbinenanlage eingezeichnet. Die Wärmeerzeugung des Heizwerks ergibt sich damit aus der Differenz zwischen der oberen und der unteren Kurve.



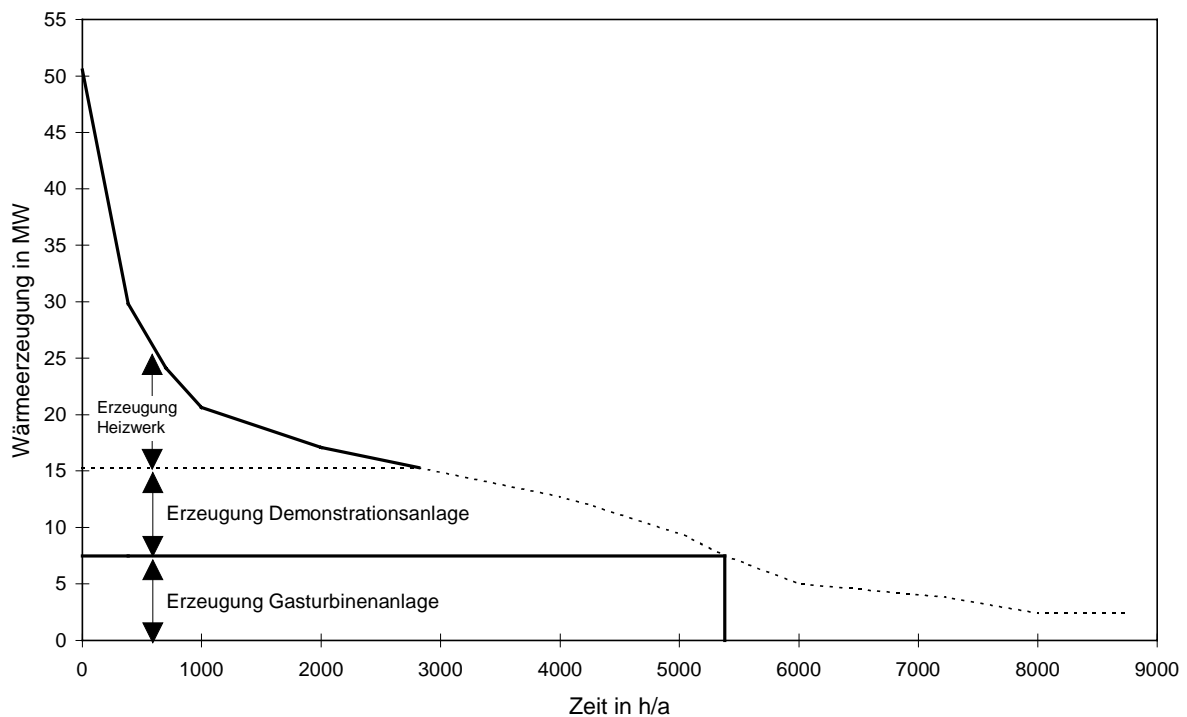
**Bild 8:** Jahresdauerlinie der Wärmeerzeugung im Forschungszentrum Karlsruhe (Stand 1997)

Müssen mehr als  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$  an Wärme erzeugt werden, wird die Gasturbine mit voller Last eingesetzt, und das Heizwerk erzeugt den Bedarf, der  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$  überschreitet. Diese Fahrweise ist in Bild 8 für 5.400 Stunden pro Jahr zu erkennen. Sie hat zur Konsequenz, daß mit Annäherung an den Punkt 5.400 h/a die Wärmeerzeugung des Heizwerks, also der Anlage mit der höheren Wärmeleistung, niedriger ist als die Wärmeerzeugung der Gasturbinenanlage.

Fällt der Wärmebedarf unter  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$ , wird die Gasturbinenanlage außer Betrieb genommen, da sie aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht in Teillast gefahren werden soll. In diesem Fall deckt das Heizwerk den gesamten Wärmebedarf. Diese Fahrweise ist in Bild 8 für den Teil der x-Achse rechts von 5.400 h/a zu erkennen.

Im Sommer geht die Wärmeerzeugung auf  $2 \text{ MW}_{\text{th}}$  bis  $3 \text{ MW}_{\text{th}}$  zurück. Da diese Leistungen den Regelbereich der Kesselanlagen im Heizwerk unterschreiten, werden die Kesselanlagen intermittierend betrieben. Diese Betriebsweise wird durch zwei Speicherbehälter für Heißwasser ermöglicht. In Bild 8 entspricht dies dem Bereich rechts von 7.000 h/a.

Eine mögliche Einbindung der geplanten Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung mit einer thermischen Leistung von  $7,8 \text{ MW}_{\text{th}}$  (bei maximaler Wärmeauskopplung) in die bestehende Struktur der Wärmeerzeugungsanlagen zeigt Bild 9. Grundlage ist die Jahresdauerlinie aus Bild 8.



**Bild 9:** Einbindung der geplanten Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung in die Struktur der Wärmeerzeugungsanlagen im Forschungszentrum Karlsruhe

Die erste Priorität beim Einsatz der Anlagen zur Wärmeerzeugung hat in Bild 9 die Gasturbinenanlage mit ihrer thermischen Leistung von  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Dadurch ergibt sich eine im Vergleich zu Bild 8 unveränderte Fahrweise. Überschreitet der Wärmebedarf die Leistung von  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$ , wird die Differenz von der Demonstrationsanlage und dem Heizwerk erbracht. Die zweite Priorität hat dabei die Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung, die dritte das Heizwerk. Diese Prioritätenfolge führt dazu, daß, wenn die gesamte Wärmezeugung über  $15,3 \text{ MW}_{\text{th}}$  liegt, die Demonstrationsanlage ihre maximal auskoppelbare Wärmeleistung in das Fernwärmenetz einspeist ( $7,8 \text{ MW}_{\text{th}}$ ), und das Heizwerk die Differenz zwischen dem Bedarf und  $15,3 \text{ MW}_{\text{th}}$  erzeugt. Diese Fahrweise ist für den Bereich von 0 bis 2.900 h/a zu erkennen. Liegt der Wärmebedarf zwischen  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$  und  $15,3 \text{ MW}_{\text{th}}$ , wird die Wärmeabgabe der Demonstrationsanlage reduziert und die Stromerzeugung erhöht. Das Heizwerk erzeugt in diesem Fall keine Wärme. Diese Fahrweise liegt von 2.900 h/a bis 5.400 h/a vor.

Unterschreitet der Wärmebedarf die thermische Leistung der Gasturbine von  $7,5 \text{ MW}_{\text{th}}$ , wird die Gasturbine außer Betrieb genommen. In diesem Fall wird die Wärmeerzeugung von der Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung übernommen. Das Heizwerk dient als Reserve zur Sicherung der Wärmeversorgung, da Ausfälle der Demonstrationsanlage nicht ausgeschlossen werden können.

Die in Bild 9 dargestellte Fahrweise der Demonstrationsanlage ermöglicht einen kontinuierlichen Betrieb der Demonstrationsanlage. Fast während des gesamten Jahres wird Wärme von der Demonstrationsanlage in das Fernwärmenetz eingespeist. Die Wärmeeinspeisung der Demonstrationsanlage gleitet dabei stufenlos von 0 bis  $7,8 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Summiert man die eingespeisten Wärmeleistungen, erhält man eine jährliche Einspeisung von  $40,4 \text{ GWh/a}$ . Zur Berechnung dieses Werte wurde eine Verfügbarkeit von 85 % angenommen. Bezieht man die tatsächlich eingespeiste Wärme auf die maximal auskoppelbare Wärme, erhält man die Vollaststundenzahl. Im vorliegenden Fall erhält man eine Vollaststundenzahl von 5.150 h/a und damit einen für eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage hohen Wert.

### **3.4 Betriebsweise**

Für die hier vorgestellte Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung wird ein kontinuierlicher Betrieb über 7.500 h/a bis 8.000 h/a angestrebt. Das entspricht einer Verfügbarkeit von 85 % bis 90 %, die für Verbrennungsanlagen für feste Brennstoffe nach dem heutigen Stand der Technik durchaus erreicht werden können.

Zur Bedienung der Anlage ist von einem ständigen Personaleinsatz auszugehen. Der Umfang der Aufgaben erfordert eine Person pro Schicht. Bei einem Betrieb der Anlage über 24 Stunden pro Tag und über 7 Tage in der Woche ergibt sich damit unter Berücksichtigung von Ur-

laubs- und Krankheitszeiten ein Personalbedarf von 5 Personenjahren pro Jahr. Die Aufgaben des Bedienpersonals liegen überwiegend in der Überwachung der Feuerung, des Kessels, der Rauchgasreinigung und der Brennstoffbeschickung. Dazu steht dem Bedienpersonal eine Schaltwarte mit einem PC-gestützten Prozeßleitsystem zur Verfügung. Werden in der Schaltwarte Störungen gemeldet und sind diese einfach zu beheben, beseitigt das Bedienpersonal diese Störungen selbst. Insbesondere im Bereich der Brennstoffbeschickung ist von relativ häufigen, leicht zu behobenden Störungen auszugehen.

Bei Störungen, die aufgrund ihres Umfangs oder ihrer Art vom Bedienpersonal der Anlage nicht sofort und selbst behoben werden können, muß auf zusätzliches Personal zurückgegriffen werden. Dieses zusätzliche Personal wird nur im Bedarfsfall benötigt. Daher erfordern diese Aufgaben keine volles Personenjahr pro Jahr.

Die Anlieferung von Brennstoff soll während der Tagesschicht erfolgen. Bei der Abladung des Brennstoffs und der Befüllung der mit Schubböden ausgestatteten Bunker wird Personal zusätzlich zum Bedienpersonal der Anlage benötigt. Zusammen mit den o. g. Aufgaben der Unterstützung des Bedienpersonals bei der Behebung Störungen wird von einem zusätzlichen Personaleinsatz von einem Personenjahr pro Jahr ausgegangen.

Das Betriebspersonal für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung wird von einem Contractor zur Verfügung gestellt, der für die Finanzierung und den Betrieb der Anlage zuständig ist.

Der Personaleinsatz für die Demonstrationsanlage im Forschungszentrum wurde relativ hoch abgeschätzt. Geht man davon aus, daß eine Kleinanlage in einem Industriebetrieb betrieben werden soll, kann dort Personal, das hauptsächlich für Produktionszwecke eingesetzt wird, die Bedienung und Überwachung der Anlage mit übernehmen. Voraussetzung ist, daß diese Aufgaben die ursprünglichen Aufgaben in der Produktion nicht zu stark beeinträchtigen.

Besonderheiten im Betrieb der Demonstrationsanlage ergeben sich dadurch, daß sie einerseits zur Erzeugung von Strom und Fernwärme aus Abfällen zur Verwertung eingesetzt werden soll und andererseits verschiedene Abfälle zur Verwertung versuchsweise verbrannt werden sollen. Die Planung, Durchführung und Auswertung der Verbrennungsversuche verursacht in erheblichem Umfang Arbeiten, die im Gegensatz zum regulären Anlagenbetrieb F+E-Charakter aufweisen. Diese Aufgaben sollen gegen Bezahlung vom Personal des Forschungszentrums Karlsruhe übernommen werden. Dieser Personaleinsatz wird nicht in die Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Demonstrationsanlage einbezogen.

Die Anlage soll möglichst kontinuierlich und mit Vollast betrieben werden. Eine solche Betriebsweise ist Voraussetzung für eine saubere Verbrennung mit geringen Emissionen an



Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen sowie für eine gleichbleibende hohe Qualität der Rostasche. Diese Betriebsweise wird ermöglicht, indem der im Kessel erzeugte Dampf nach der ersten Turbinenstufe wahlweise zur Fernwärmeerzeugung genutzt oder weiter zur Stromerzeugung entspannt werden kann. Durch diese vergleichsweise aufwendige Energienutzung wird die Fahrweise der Feuerung von der momentanen Nachfrage nach Wärme entkoppelt.

Ausnahmen vom Vollastbetrieb können während der Verbrennungsversuche gemacht werden. Während dieser Zeiträume kann für eine begrenzte Stundenzahl pro Jahr die Betriebsweise der Anlage den Aufgabenstellungen des Versuchsbetriebs untergeordnet werden.



## **4 Wirtschaftlichkeit von Kleinanlagen zur energetischen Verwertung**

Neben der Aufgabe, die technische Eignung der Wirbeldüsenrostfeuerung zur Verbrennung hochkalorischer Abfälle zu demonstrieren, hat die hier vorgestellte Kleinanlage die Aufgabe, die Wettbewerbsfähigkeit der Gewinnung von Strom und Wärme aus einem Ersatzbrennstoff, bei dem es sich um einen Abfall zur Verwertung handelt, zu zeigen. Der zweite Punkt wird im folgenden anhand einer Wirtschaftlichkeitsrechnung für den Betrieb der Demonstrationsanlage als Heizkraftwerk im Forschungszentrum Karlsruhe deutlich untersucht. Die Untersuchung gliedert sich auf in die Betrachtung eines Referenzfalls (Abschnitt 4.1 bis 4.4) und einer Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 4.5).

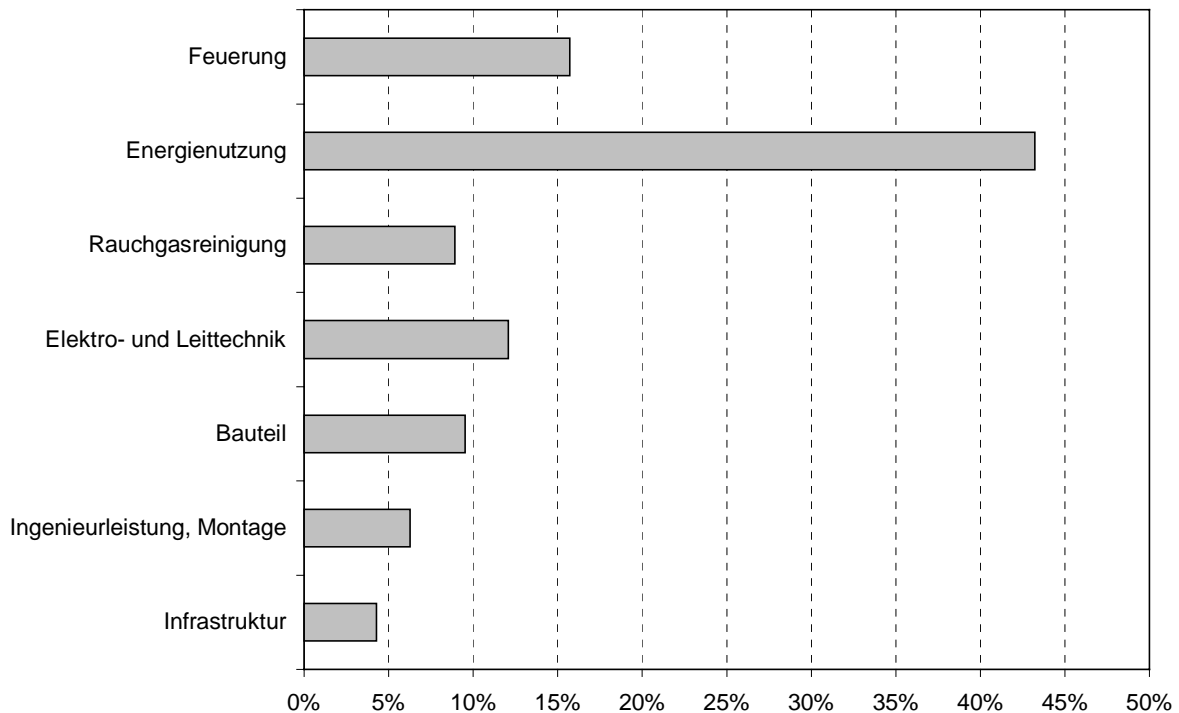
Die Demonstrationsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe soll nicht nur als Betriebsanlage, sondern in begrenztem Umfang auch für Versuche genutzt werden (siehe dazu Kapitel 5). Dadurch entstehen Kosten, z. B. für die Instrumentierung, die über die Kosten für eine reine Betriebsanlage hinausgehen. Diese zusätzlichen Kosten sind nicht repräsentativ für den reinen Betrieb der Anlage und werden daher nicht in die Wirtschaftlichkeitsrechnung aufgenommen.

Die Investition für die Demonstrationsanlage soll von einem externen Contractor geleistet werden, der für die Finanzierung und den Betrieb der Anlage verantwortlich ist. Damit dieses im Anlagenbau heute übliche Betreibermodell für einen Contractor wirtschaftlich interessant ist, müssen Mindestanforderungen an die Gewinne aus dem Anlagenbetrieb erfüllt werden. Mit diesen Anforderungen wird die Mindestgröße einer wirtschaftlich zu betreibenden Kleinanlage zu 16.500 t/a berechnet.

### **4.1 Berechnung der Investition**

Die Investition für eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung mit einer Kapazität von 16.500 t/a und mit der in Kapitel 3 beschriebenen Technik wurde von einem im Anlagenbau tätigen Unternehmen im Rahmen eines Richtpreisangebotes zu 10,6 Mio. DM abgeschätzt. Die Anteile der Kosten der wichtigsten Funktionseinheiten an der Gesamtinvestition sind in Bild 10 gegenübergestellt.

Den größten Anteil an der Gesamtinvestition hat mit 43 % die Energienutzung. Der hohe Kostenanteil dieser Funktionseinheit ist auf die hohen spezifischen Investitionen für Dampfturbinen im unteren Leistungsbereich zurückzuführen. Die vorgesehene Ausstattung der Turbinenanlage mit einer Kondensationsturbine, die einen Kühlturm erforderlich macht, erhöhen die Kosten für die Energienutzung weiter. Kostensenkend wirkt sich dagegen die Verwendung eines Rauchrohrkessels statt eines Wasserrohrkessels aus.



**Bild 10:** Aufteilung der Gesamtinvestition von 10,6 Mio. DM für eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung mit einer Kapazität von 16.500 t/a auf die Funktionseinheiten

Die Feuerung verursacht mit 16 % einen deutlich geringeren Anteil an der Gesamtinvestition. In diesem Anteil sind die Kosten für den Aufgabeförderer, den Wirbeldüsenrost, den Entschlacker sowie die Brennkammer und Nachbrennkammer enthalten. Weiterhin sind die Kosten für die Verbrennungsluftzuführung und die Rauchgasrückführung berücksichtigt.

Ein ähnlicher Aufwand (12 % der Gesamtinvestition) ist für die Elektro- und Leittechnik erforderlich. Dieser Investitionsaufwand ist zu einem erheblichen Anteil auf die Meßgeräte zur behördlich vorgeschriebenen Überwachung der Reingasqualität zurückzuführen, die unabhängig von der Anlagenleistung zu installieren sind. Der zweite wichtige Kostenfaktor sind die Feldmeßgeräte, die zur Beobachtung und Bedienung der Anlage erforderlich sind.

Bei den Kosten für die Rauchgasreinigung macht sich die Verwendung des relativ einfachen, aber effektiven Verfahrens der konditionierten Trockensorption bemerkbar. Dadurch verursacht die Rauchgasreinigung einen Anteil von weniger als 10 % an der Gesamtinvestition. Das zur  $\text{NO}_x$ -Umwandlung erforderliche SNCR-Verfahren ist in den Feuerraum integriert und im dortigen Kostenanteil enthalten.

Der Kostenanteil von 9 %, der in Bild 10 für das Bauteil ausgewiesen ist, umfaßt die Kosten für eine Leichtbauhalle, das Brennstofflager und die Schubböden. Das für die Verbrennungsanlage samt Brennstofflager und Nebenanlagen benötigte Grundstück wurde bei der Ermittlung der Kosten nicht berücksichtigt. Es soll als Beitrag des Forschungszentrums Karlsruhe

zum gemeinsamen Projekt „Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung“ kostenfrei zur Verfügung gestellt werden soll.

Die Kosten für die Ingenieurleistungen und die Montage umfassen das Basis- und Detailengineering für die Gesamtanlage, die Montage und Montageüberwachung, die Inbetriebnahme der Gesamtanlage sowie deren Funktionsprüfung. Die Kosten für diese Dienstleistungen verursachen einen Anteil von 6 % an der Gesamtinvestition.

Unter dem Punkt „Infrastruktur“ sind die Kosten für die Anbindung der Anlage an die bestehenden Netze für Strom, Wasser, Fernwärme und Druckluft zusammengefaßt. Die durch die Anbindung entstehenden Kosten können erst dann genau abgeschätzt werden, wenn der Standort der Anlage im Forschungszentrum Karlsruhe feststeht. Eine vorläufige Abschätzung der Kosten liefert einen Anteil von 4,5 % an der Gesamtinvestition.

Die spezifischen Investitionen pro Tonne Brennstoffdurchsatz ergeben sich mit der o. g. Investition von 10,6 Mio. DM zu gerundet 650 DM/t. Dieses Ergebnis zeigt, daß für eine Kleinanlage zur Verbrennung von Abfällen zur Verwertung erhebliche geringere spezifische Investitionen nötig sind als für Siedlungsmüllverbrennungsanlagen, für die von Investitionen von 1000 DM/t bis 2000 DM pro Tonne Durchsatz auszugehen ist (vgl. z. B. /Bayer 1995/). Damit ist ein Ziel dieser Studie erreicht: es wurde eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung vorgestellt, die eine sehr niedrige Investition erfordert und damit eine wesentliche Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb erfüllt.

## **4.2 Berechnung der Betriebskosten und sonstigen Kosten**

Während des Anlagenbetriebs werden folgende Stoffe verbraucht (veranschlagter Verbrauch pro Betriebsstunde in Klammern):

- Ammoniakwasser für die NO<sub>x</sub>-Entfernung aus dem Rauchgas (4 kg/h).
- Prozeßwasser zur Rauchgaskühlung und -befeuchtung nach dem Austritt aus dem Rauchrohrkessel (800 kg/h).
- Kalkhydrat-Aktivkoks-Gemisch für die Rauchgasreinigung (75 kg/h). Der relativ hohe Verbrauch an Sorbens kommt dadurch zustande, daß das Gemisch überstöchiometrisch dosiert werden muß, um eine ausreichende Schadstoffabscheidung zu gewährleisten.
- Elektrische Energie für das Primär- und Sekundärluftgebläse, das Saugzuggebläse, das Rezirkulationsgebläse und einige andere Verbraucher mit untergeordneter Bedeutung (200 kWh<sub>el</sub>/h).

Zur Berechnung der Kosten werden die Verbrauchswerte mit marktüblichen Preisen multipliziert. Abweichend davon wird zur Ermittlung der Kosten für die benötigte elektrische Energie die entgangene Vergütung für die Einspeisung angesetzt. Neben den Verbrauchskosten entstehen Kosten für die Entsorgung der festen Rückstände der Verbrennung:

- Rostasche (220 kg/h bei einem angenommenen Ascheanteil von 10 %). Die Rostasche kann verwertet oder deponiert werden. Als Verwertungsweg kommt der Einsatz der Rostasche im Straßenbau in Frage.
- Flugasche, unreaktiertes Sorbens und die Reaktionsprodukte der trockenen Rauchgasreinigung (200 kg/h). Diese Reststoffe werden gemeinsam in Containern gesammelt und können als Versatzmaterial im Bergbau (Salzbergwerke) eingesetzt werden. Mit einem Reststoffanfall von 200 kg/h wird ein relativ hoher Wert angesetzt, da durch die hohen Luftgeschwindigkeiten beim Wirbeldüsenrost ein im Vergleich zu anderen Rostsystemen höherer Flugascheanteil nicht ausgeschlossen werden kann.

Die folgenden jährlichen Kosten entstehen unabhängig vom Betrieb der Anlage:

- Personalkosten (6 Personenjahre pro Jahr, vgl. dazu Abschnitt 3.4).
- Instandhaltung. Hier wird ein üblicher Wert von 5 % der Investition pro Jahr angesetzt.
- Versicherung, Verwaltung. Hier wird ein üblicher Wert von 2 % der Investition angesetzt.

### **4.3 Berechnung der Erlöse**

Durch den Betrieb einer Kleinanlage zur energetischen Verwertung entstehen an den folgenden drei Stellen Erlöse:

- Stromeinspeisung,
- Wärmeeinspeisung,
- Vergütung für die Verbrennung von Ersatzbrennstoff.

Die Strom- und Wärmeeinspeisung wurde mit Hilfe des kommerziellen Simulationsprogramms IPSEpro berechnet (vgl. /IPSEpro 1999/). Die pro Stunde von der Demonstrationsanlage in das Fernwärmenetz einspeisbare Wärmemenge wird der modifizierten Jahresdauerlinie der Wärmeerzeugung in Bild 9 entnommen. Das Simulationsprogramm liefert bei gegebener Wärmeauskopplung und Kesselleistung die erzeugte elektrische Leistung. Auf diese Weise erhält man für jede Stunde eines Jahres die abgegebene Wärme- und Strommenge. Die jährlich abgegebene Wärme- und Strommenge wird durch Summation der Stundenwerte und die Multiplikation mit dem Faktor 85 % bestimmt. Der Faktor 85 % berücksichtigt die Verfügbarkeit der Anlage.

Mit dieser Methode ergibt sich eine jährliche Stromeinspeisung von 13,9 GWh<sub>el</sub>/a und eine jährliche Wärmeeinspeisung von 40,4 GWh<sub>th</sub>/a. Der Gesamtnutzungsgrad der Demonstrationsanlage beträgt unter diesen Annahmen 65 % und liegt damit vergleichsweise hoch.

Die Vergütung für die Stromeinspeisung entspricht den vermiedenen Kosten des Bezugs. Der Bezugspreis für elektrische Energie beträgt zur Zeit im Forschungszentrum Karlsruhe 8,9 Pfg/kWh<sub>el</sub>. Da der Bezugspreis für elektrische Energie durch die Entwicklungen auf dem Strommarkt Schwankungen unterworfen ist, wird die Veränderung des jährlichen Gewinns der Demonstrationsanlage in Abhängigkeit von der Vergütung für die Stromeinspeisung in Abschnitt 4.5 diskutiert.

Die Vergütung für eine eingespeiste Wärmeeinheit entspricht den Grenzkosten für die Erzeugung einer zusätzlichen Wärmeeinheit im Heizwerk. Da durch die Wärmeeinspeisung der Demonstrationsanlage die Investition für das Heizwerk sowie der technische und personelle Aufwand für dessen Betrieb nicht oder nicht wesentlich verkleinert werden, ergeben sich die Grenzkosten aus den vermiedenen Brennstoffkosten (Erdgas) zu 2,5 Pfg/kWh<sub>th</sub>.

Weitere Erlöse für eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung werden durch die Vergütung für die Entsorgung von Abfällen zur Verwertung erwirtschaftet. In der Demonstrationsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe sollen im Regelfall Ersatzbrennstoffe verfeuert werden, die den gesetzlich festgelegten Status „Abfall zur Verwertung“ haben. Würde der Ersatzbrennstoff nicht in der Demonstrationsanlage verbrannt, müßte der Abfall anderweitig entsorgt werden. Die Ersatzbrennstoffe sollen von Unternehmen der Entsorgungsbranche beschafft werden, die für die Abgabe des Ersatzbrennstoffs eine Vergütung zahlen. Die Höhe der Vergütung kann maximal gleich den Kosten einer anderweitigen Entsorgung des Ersatzbrennstoffs bzw. der Abfälle, aus denen der Ersatzbrennstoff hergestellt wird, angesetzt werden. Im Referenzfall wird davon ausgegangen, daß eine Vergütung von 100 DM pro Tonne Ersatzbrennstoff erzielt werden kann. Die Kosten für die ggf. notwendige Behandlung von Abfällen zur Herstellung des Ersatzbrennstoffs liegen beim Lieferanten des Ersatzbrennstoffs.

#### **4.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung**

Tabelle 1 enthält das Ergebnis einer Gewinnvergleichsrechnung für die Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung. Als Abschreibungsdauer wird ein branchenüblicher Wert von 12,5 Jahren verwendet, mit dem sich bei einem Zinssatz von 6 % ein Annuitätsfaktor von 11,6 %/a ergibt. Die Betriebsstundenzahl pro Jahr ist mit 7.500 h/a angesetzt. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung in Tabelle 1 wird in der folgenden Diskussion als Referenzfall bezeichnet. Die Struktur der Kosten und Erlöse ist in Bild 11 veranschaulicht.

Tabelle 1: Wirtschaftlichkeitsrechnung für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung im Forschungszentrum Karlsruhe

	Einheitspreis	Verbrauch	Kosten bzw. Erlöse pro Jahr pro Mg Brennst.	
<b>Kapitalkosten</b>				
Maschinenteil + Bauteil	10.600.000 DM	11,6 %/a	<b>1.229.459 DM/a</b>	<b>74,51 DM/Mg</b>
<b>Verbrauchskosten</b>				
Kalkhydrat-Aktivkoks-Gemisch	360 DM/Mg	0,075 Mg/h	202.500 DM/a	12,27 DM/Mg
Ammoniakwasser (25 %)	250 DM/Mg	0,004 Mg/h	7.500 DM/a	0,45 DM/Mg
Prozeßwasser	2,40 DM/cbm	0,8 cbm/h	14.400 DM/a	0,87 DM/Mg
Strom	0,089 DM/kWh	200 kWh/h	133.500 DM/a	8,09 DM/Mg
Zwischensumme Verbrauchskosten			<b>357.900 DM/a</b>	<b>21,69 DM/Mg</b>
<b>Entsorgungskosten</b>				
Rostasche	70 DM/Mg	0,22 Mg/h	115.500 DM/a	7,00 DM/Mg
Flugasche, Reaktionsprod.	280 DM/Mg	0,2 Mg/h	420.000 DM/a	25,45 DM/Mg
Zwischensumme Entsorgungskosten			<b>535.500 DM/a</b>	<b>32,45 DM/Mg</b>
<b>Sonstige Betriebskosten</b>				
Personal	90.000 DM/PJ	6 PJ/a	540.000 DM/a	32,73 DM/Mg
Instandhaltung	5% der Investition		530.000 DM/a	32,12 DM/Mg
Versicherung, Verwaltung	2% der Investition		212.000 DM/a	12,85 DM/Mg
Zwischensumme Sonstiges			<b>1.282.000 DM/a</b>	<b>77,70 DM/Mg</b>
<b>Gesamtkosten</b>			<b>3.404.859 DM/a</b>	<b>206,36 DM/Mg</b>
<b>Erlöse</b>				
Stromerzeugung	0,089 DM/kWh	13,86 GWh/a	1.233.498 DM/a	74,76 DM/Mg
Wärmeerzeugung	0,025 DM/kWh	40,43 GWh/a	1.010.638 DM/a	61,25 DM/Mg
Vergütung für Ersatzbrennstoff	100 DM/Mg	16.500 Mg/a	1.650.000 DM/a	100,00 DM/Mg
<b>Gesamterlöse</b>			<b>3.894.136 DM/a</b>	<b>236,01 DM/Mg</b>
<b>Gewinn</b>			<b>489 277 DM/a</b>	<b>29,65 DM/Mg</b>

Die jährlichen Kosten für den Betrieb der Demonstrationsanlage belaufen sich nach Tabelle 1 auf 3,4 Mio. DM/a. Der Anteil der Kapitalkosten an den Gesamtkosten beträgt 36 % und ist damit wesentlich geringer als z. B. bei Hausmüllverbrennungsanlagen, bei denen der Anteil der Kapitalkosten an den Gesamtkosten über 60 % betragen kann (vgl. /Bayer 1995/).

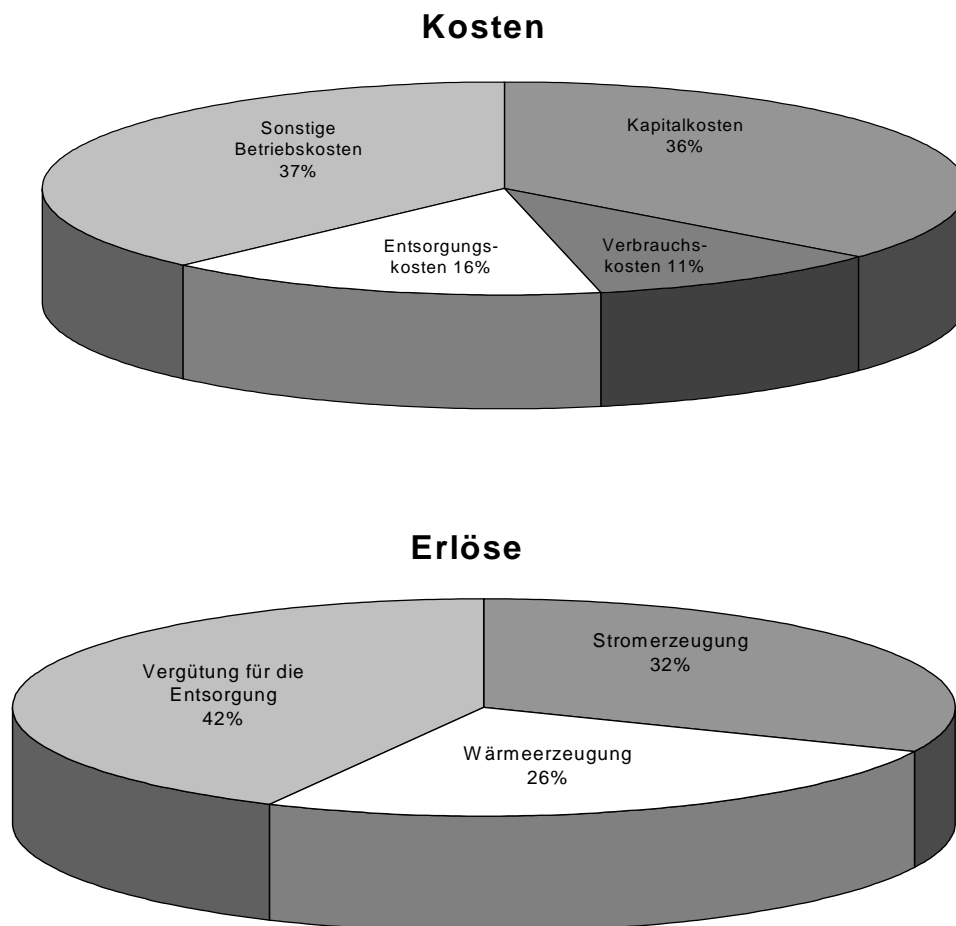
Der Anteil der sonstigen Betriebskosten ist mit 37 % dagegen vergleichsweise hoch. Für dieses Ergebnis ist zum einen der Personaleinsatz verantwortlich, der für die Demonstrationsanlage mit 6 Personenjahren pro Jahr veranschlagt wurde. Bezogen auf die Anlagengröße ist dieser Personaleinsatz sehr hoch. Ein weiterer Grund für die hohen sonstigen Betriebskosten liegt in der konservativen Abschätzung des Aufwandes für die Instandhaltung und der Versicherung und Verwaltung.

Die Anteile der Verbrauchs- und Entsorgungskosten an den jährlichen Kosten betragen 11 % und 16 %. Diese vergleichsweise hohen Kosten sind zu einem großen Teil auf die Verwen-



dung der konditionierten Trockensorption zur Rauchgasreinigung und den dadurch bedingten hohen Sorbenseinsatz und Reststoffanfall zurückzuführen. Bei Verwendung eines aufwendigeren (nassen) Verfahrens zur Rauchgasreinigung würden niedrigere Verbrauchs- und Entsorgungskosten entstehen. Ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Verfahren zur Rauchgasreinigung unter Berücksichtigung der fixen und variablen Kosten (siehe z. B. /Akustat et al. 1998/) zeigt aber die Vorteile der konditionierten Trockensorption für die hier geplante Anlagengröße.

Die Betriebskosten des SNCR-Verfahrens zur  $\text{NO}_x$ -Entfernung kommen im Verbrauch an Ammoniakwasser zum Ausdruck. Im Vergleich zu den anderen Betriebskosten der Rauchgasreinigung (Sorbenseinsatz, Reststoffentsorgung) sind die Betriebskosten des SNCR-Verfahrens sehr gering.



**Bild 11:** Struktur der Kosten und Erlöse für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung im Forschungszentrum Karlsruhe

Die Erlöse setzen sich zu insgesamt 58 % aus Erlösen aus der Energieerzeugung zusammen. Den größeren Anteil daran hat die Stromerzeugung mit 32 % bezogen auf die gesamten Erlöse. Dieses Ergebnis zeigt die hohe Bedeutung der flexiblen und effizienten Energienutzung

bei der geplanten Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung. Die Vergütung für die Verbrennung von Ersatzbrennstoff und damit die Entsorgung von Abfällen macht einen Anteil von weniger als der Hälfte der gesamten Erlöse aus (42 %).

Insgesamt werden bei der angesetzten Betriebsweise jährliche Erlöse von fast 3,9 Mio. DM/a erzielt, womit ein jährlicher Gewinn von fast 0,5 Mio. DM/a erwirtschaftet wird. Das Verhältnis von Gewinn zu Erlösen, die Umsatzrentabilität, beträgt damit 12,6 %. Zur Berechnung der Investitionsrentabilität wird zunächst der durchschnittliche Kapitaleinsatz pro Jahr unter Berücksichtigung der jährlichen Tilgung der Anfangsinvestition berechnet. Anschließend wird der Gewinn pro Jahr ins Verhältnis zum durchschnittlichen Kapitaleinsatz gesetzt. Für die Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung ergibt sich eine Investitionsrentabilität von 8,5 %. Die Amortisationsdauer der Demonstrationsanlage beträgt 6,2 Jahre und liegt damit bei der Hälfte der angesetzten Abschreibungsdauer von 12,5 Jahren.

Diese Betrachtungen zeigen, daß ein wirtschaftlicher Betrieb einer Kleinanlage zur energetischen Verwertung möglich ist. Die Rentabilität der Investition und des Umsatzes liegen in einem Bereich, der Contracting-Unternehmen einen Anreiz geben kann, Kleinanlagen zur energetischen Verwertung in geeigneten Fällen zu finanzieren und zu betreiben.

Neben der hier vorgestellten Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine Kleinanlage mit einer Kapazität von 16.500 t/a wurde eine Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine Anlage mit einer Kapazität von 10.000 t/a durchgeführt. Die jährlichen Erlöse decken bei der kleineren Anlage gerade die jährlichen Kosten. Unter Berücksichtigung des Risikos des Anlagenbetriebs und der Mindestanforderungen an die Rentabilität ist damit kein Anreiz für den Betrieb einer Anlage mit 10.000 t/a gegeben. Je nach Anforderungen an die Rentabilität liegt die Mindestgröße, oberhalb der der Betrieb einer Kleinanlage zur energetischen Verwertung unter den hier genannten Randbedingungen wirtschaftlich interessant ist, damit zwischen 10.000 t/a und 16.500 t/a. Liegen speziellere Randbedingungen vor, z. B. eine höhere Vergütung für die eingespeiste Wärme oder eine kontinuierliche Wärmeabgabe, so daß auf die Stromerzeugung verzichtet werden kann, kann sich die Mindestgröße für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu kleineren Werten verschieben.

#### **4.5 Sensitivitätsanalyse**

Die Wirtschaftlichkeit der hier vorgestellten Kleinanlage hängt in starkem Maße von den Annahmen über die einfließenden Größen ab. Im folgenden wird untersucht, in welchen Grenzen die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs erhalten bleibt, wenn die einfließenden Größen verändert werden. Dabei interessiert weniger die Frage, ab welchen Werten für die einfließenden Größen überhaupt ein Gewinn erwirtschaftet wird, sondern vielmehr, ab welchen

Werten der zu erwartende Gewinn einem Contractor einen Anreiz zum Betrieb einer Kleinanlage geben kann. Wie hoch dieser Gewinn mindestens sein muß, hängt vom einzelnen Contractor ab. Für die folgende Diskussion wird als Diskussionsgrundlage ein Mindestgewinn von 200.000 DM/a angesetzt.

Die Sensitivität des jährlichen Gewinns aus dem Betrieb einer Kleinanlage auf eine Variation der einfließenden Größen zeigt Bild 12. In der Sensitivitätsanalyse wurden folgende Größen variiert:

- die Erlöse für die Strom- und Wärmeeinspeisung,
- die Vergütung für den Ersatzbrennstoff,
- die Investition für die Gesamtanlage,
- der Personaleinsatz.

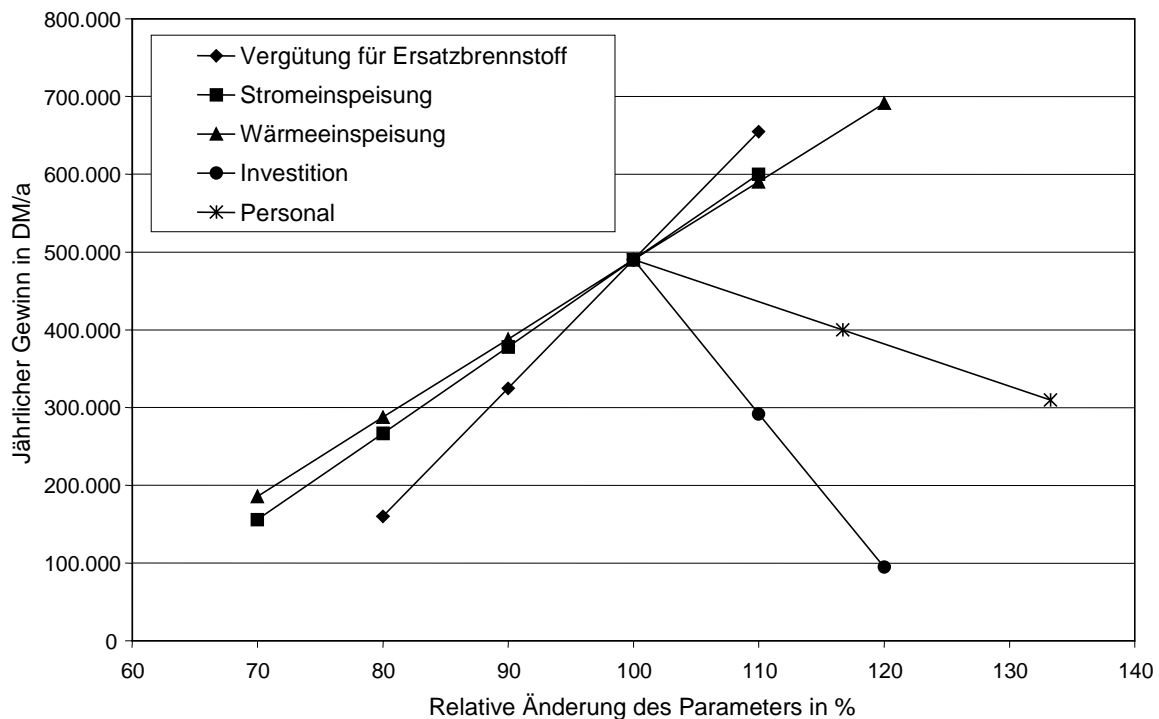


Bild 12: Änderung des jährlichen Gewinns aus dem Betrieb der geplanten Demonstrationsanlage bei einer Variation der wichtigsten Einflußgrößen

Durch die aktuellen und zukünftig erwarteten Entwicklungen in der Energiewirtschaft können sich die Vergütungen für die Strom- und später auch die Wärmeeinspeisung in Zukunft verringern. Die Einführung von Wettbewerb in der Stromwirtschaft hat im Jahr 1998 zu einer deutlichen Reduktion des Einkaufspreises für elektrische Energie für das Forschungszentrum Karlsruhe geführt. Diese Reduktion wird im Referenzfall berücksichtigt, indem die Vergütung für die erzeugte elektrische Energie mit 8,9 Pfg/kWh<sub>el</sub> angesetzt wird. Nimmt man eine weitere Reduktion des Strompreises und damit der Vergütung für erzeugte elektrische Energie um 10 % bzw. 20 % an, reduziert sich der jährliche Gewinn aus dem Betrieb der Demonstrations-

anlage von 490.000 DM/a im Referenzfall auf 380.000 DM/a bzw. 270.000 DM/a. In beiden Fällen bleibt der Betrieb der Anlage wirtschaftlich interessant. Erst eine Verringerung der Vergütung für die Stromerzeugung um 30 % senkt den jährlichen Gewinn auf weniger als 200.000 DM/a und macht den Anlagenbetrieb wirtschaftlich uninteressant.

Fast gleiche Ergebnisse liefert die Annahme einer verringerten Vergütung für die Wärmeeinspeisung als mögliche Folge der erwarteten Einführung von Wettbewerb in der Gaswirtschaft.

Die Vergütung für die Wärmeeinspeisung kann auch über den derzeitigen Wert von 2,5 Pfg./kWh steigen. Diese Annahme berücksichtigt, daß der Gaspreis durch Öko-Steuern steigt. Bei Annahme einer um 10 % höheren Wärmevergütung steigen die jährlichen Gewinne um 20 % auf rund 590.000 DM/a. Genauere Aussagen zu den Auswirkungen der Öko-Steuern auf die Wirtschaftlichkeit von Kleinanlagen zur energetischen Verwertung können aufgrund der geringen Erfahrungen mit diesen Steuern nicht gemacht werden.

Einen wesentlich größeren Einfluß auf den jährlichen Gewinn als die Variation der Vergütung für die Energieeinspeisung hat die Variation der Vergütung für die Verbrennung von Ersatzbrennstoff. Erzielt man Erlöse von 90 DM pro Tonne Ersatzbrennstoff statt der angestrebten 100 DM/t, sinkt der jährliche Gewinn um auf rund 325.000 DM/a. Damit bleibt die Anlage noch wirtschaftlich interessant. Eine Verringerung der Vergütung um 20 % auf 80 DM pro Tonne Ersatzbrennstoff senkt den jährlichen Gewinn auf einen Wert unter die o. g. Grenze von 200.000 DM/a und macht den Betrieb der Anlage wirtschaftlich uninteressant. Der Grenzpreis, bei dem der Gewinn pro Jahr zu Null wird, beträgt 71 DM pro Tonne Abfall.

Als sensitivste Größe für die Wirtschaftlichkeit stellt sich die Investition heraus. Nimmt man an, daß die notwendige Investition um 1 Mio. DM höher als die veranschlagten 10,6 Mio DM liegt, nimmt der jährliche Gewinn infolge des vergrößerten Kapitaldienstes auf 292.000 DM/a ab. Das entspricht einer Reduzierung des jährlichen Gewinns um 40 % gegenüber dem Referenzfall. Eine weitere Erhöhung der Investition um 1 Mio. DM auf zusammen 12,6 Mio DM läßt den jährlichen Gewinn auf unter 100.000 DM/a sinken und den Anlagenbetrieb wirtschaftlich uninteressant werden.

Weniger sensitiv reagiert die Wirtschaftlichkeit auf eine Variation des Personaleinsatzes. Nimmt man an, daß sich die mit der Brennstoffanlieferung verbundenen Arbeiten als so umfangreich erweisen, daß sie ein volles Personenjahr pro Jahr erfordern, und daß häufige Reparaturarbeiten nötig sind, beträgt der Personaleinsatz 7 Personenjahre pro Jahr. In diesem Fall nehmen die jährlichen Gewinne um 19 % auf 400.000 DM/a ab. Eine weitere Erhöhung des Personaleinsatzes auf 8 Personenjahre pro Jahr, die als sehr unwahrscheinlich angesehen wird, führt zu Gewinnen von 310.000 DM/a. In beiden Fällen bleibt der Anlagenbetrieb wirtschaftlich interessant.

## 5 Untersuchungsziele für eine Demonstrationsanlage

In den letzten Kapiteln wurde der prinzipielle Aufbau einer Kleinanlage dargestellt, mit der eine wirtschaftliche Energieerzeugung durch die Verbrennung von Abfällen zur Verwertung demonstriert werden kann. Eine Verbrennungsanlage dieser Art wurde noch nicht realisiert und ist daher noch nicht Stand der Technik. Eine Anlage dieser Art im Forschungszentrum Karlsruhe hätte daher den Charakter einer Pilotanlage, die auf der einen Seite für einen möglichst kontinuierlichen Betrieb mit hoher Verfügbarkeit und auf der anderen Seite für Untersuchungen eingesetzt werden kann.

Die Untersuchungsziele bestehen vor allem darin, Betriebserfahrungen bei der Verbrennung unterschiedlicher Produktionsrückstände und Ersatzbrennstoff aus aufbereiteten Abfällen zu sammeln und zur Optimierung des Anlagenbetriebs zu nutzen. Dazu muß der Anlagenbetrieb wissenschaftlich begleitet werden, und die Ergebnisse müssen systematisch ausgewertet werden. In Abschnitt 5.1 sind konkret zu untersuchende Fragestellungen zusammengestellt, soweit sie bereits absehbar sind. Darüber hinaus werden sich aus der Praxis des Anlagenbetriebs weitere, jetzt noch nicht im Detail absehbare Fragestellungen ergeben. In Abschnitt 5.2 wird das Spektrum der interessanten Brennstoffe für Kleinanlagen zur energetischen Verwertung diskutiert.

### 5.1 Untersuchung und Optimierung des Anlagenbetriebs

Der Wirbeldüsenrost kann infolge seiner *keramischen Oberfläche* thermisch hoch belastet werden. Damit besitzt er ein großes Potential, hochkalorische Brennstoffe wie Abfälle zur Verwertung zu verbrennen. In den Investitionen liegt er unter den Kosten für einen wassergekühlten Rost.

Der Wirbeldüsenrost ist bisher nur in Verbrennungsanlagen für Altholz eingesetzt worden, in denen er einer relativ geringen chemischen Belastung ausgesetzt ist. Im Vergleich dazu treten bei der Verbrennung von Abfällen zur Verwertung höhere Chlor- und Flourkonzentrationen im Rauchgas auf. Diese Rauchgasbestandteile könnten zu einem chemischen Angriff der keramischen Rostoberfläche führen. Ein wichtiges Untersuchungsziel ist daher die Ermittlung der *Standzeiten* des Wirbeldüsenrostes und des Aufwandes für seine Instandhaltung bei der Verbrennung unterschiedlicher Abfälle zur Verwertung.

Die Untersuchungen der Standzeit des Wirbeldüsenrostes können dadurch ergänzt werden, daß zu Testzwecken unterschiedliche keramische Materialien zur Auskleidung der Zwischenräume zwischen den Wirbeldüsen eingesetzt werden.

Die hohe thermische Belastbarkeit des Wirbeldüsenrostes ermöglicht einen Feuerungsbetrieb mit einer *geringeren Luftzahl* als bei anderen Rostfeuerungen. Angestrebt wird eine Luftzahl zwischen 1,4 und 1,7. Der untere Wert ist für den Normalbetrieb vorgesehen, der obere Wert dient als Regelreserve zur Vermeidung hoher CO-Konzentrationen im Rauchgas. Anhaltswerte für die Aufteilung der Primärluftmenge auf die drei Roststufen sind 20 % für die Entgasungsstufe, 50 % für die Hauptverbrennungszone und 30 % für die Ausbrandstufe. Die gesamte Primärluftmenge soll einen Anteil von ca. 40 % an der Gesamtluftmenge ausmachen. Die restlichen 60 % der Gesamtluftmenge sollen als Sekundärluft zugegeben werden.

Diese Anhaltswerte für die Luftverteilung sollen durch die Erfahrungen aus dem Betrieb der Demonstrationsanlage mit unterschiedlichen Brennstoffen modifiziert werden. Damit soll ein jeweils für den Brennstoff optimierter Anlagenbetrieb erreicht werden. Die Optimierung der Luftzugabe bei möglichst kleinem Luftüberschuß ist u. a. dazu nötig, die Abgasverluste zu verkleinern. Dadurch wird der energetische Nutzungsgrad erhöht. Weiterhin gestattet eine kleinere Abgasmenge eine kleinere Dimensionierung der Rauchgaskanäle und der Abgasreinigungsanlage, was zu einer Senkung des Investitionsaufwandes beiträgt.

Weitere zu machende Betriebserfahrungen betreffen das *Verschmutzungsverhalten* der Feuerung und des Rauchrohrkessels beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe. Hierüber ist bei den als Brennstoff vorgesehenen Abfällen zur Verwertung wenig bekannt. Das Verschmutzungsverhalten beeinflusst die Verfügbarkeit der Anlage sowie den Aufwand für die Wartung und Instandhaltung stark. Daher ist es von hoher Bedeutung, Betriebsparameter zu finden, die zu einer möglichst geringen Verschmutzung führen.

Zur Begrenzung des Personalaufwandes zum Betrieb der Anlage ist eine möglichst weitgehend *automatisierte* und *störungsarme* Brennstoffbeschickung von hoher Bedeutung. Daher stellen Betriebserfahrungen über die Störanfälligkeit der Brennstoffbeschickung für eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung eine wichtige Grundlage zur Verbesserung der Konstruktion und ggf. zur noch weitergehenden Automatisierung dar.

Die Betriebserfahrungen sollen dazu verwendet werden, die *Grundlagen für verbesserte Methoden zur Planung und Auslegung* von Kleinanlagen zur energetischen Verwertung zu liefern. Dazu soll das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Programmsystem TOSCA weiterentwickelt und mit Hilfe der zu machenden Betriebserfahrungen validiert werden. Mit dem Programmsystem TOSCA ist es möglich, die Vorgänge während der Verbrennung im Festbett nachzuvollziehen und für die Auslegung von Feuerungen auszuwerten. Eine Beschreibung des Systems findet sich z. B. in /Peters 1996/ und /Peters 1997/.

Die Validierung der Rechenergebnisse erfordert eine enge Kopplung der Programmentwicklung und des Betriebs der Demonstrationsanlage. Zum Teil werden zur Validierung des Pro-

grammsystems Meßdaten benötigt, die den Betriebsdaten nicht entnommen werden können. Darunter fallen z. B. Daten über die Temperaturen und Konzentrationen von Rauchgasbestandteilen im Feuerraum oder in der Nachbrennkammer. Diese Daten sollen im Rahmen von Forschungsarbeiten ermittelt werden, die für einen begrenzten Zeitraum pro Jahr an der Demonstrationsanlage durchgeführt werden können.

Weitergehende Untersuchungsziele für eine Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung betreffen die *gestufte Verbrennung*. Es wird erwartet, durch eine vergasende Fahrweise auf dem Rost und eine Verbrennung des entstehenden Gasgemisches in der Nachbrennkammer eine primäre NO<sub>x</sub>-Minderung zu erreichen, die die kostenintensivere sekundäre NO<sub>x</sub>-Minderung ersetzt. Grundlagenuntersuchungen zur gestuften Verbrennung von Abfällen werden in den Jahren 1999 bis 2002 im Forschungszentrum Karlsruhe im Rahmen eines HGF-Strategiefond-Projektes durchgeführt. Diese Grundlagenuntersuchungen umfassen Verbrennungsversuche an der Versuchsanlage TAMARA. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen könnten die wichtigsten Ergebnisse an einer Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung in Langzeitversuchen überprüft werden.

## **5.2 Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe**

In der geplanten Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung sollen unterschiedliche Abfälle zur Verwertung als Brennstoff eingesetzt werden. Das Ziel des wirtschaftlichen Anlagenbetriebs setzt den Einsatz eines Regelbrennstoffs für einen möglichst langen Zeitraum pro Jahr voraus. Während dieses Regelbetriebs ist die Möglichkeit zur wissenschaftlichen Begleitung des Betriebs im Rahmen von *Langzeitversuchen* gegeben, die den Betrieb nicht oder nicht maßgeblich beeinträchtigen. Darüber hinaus ist die Möglichkeit zur wissenschaftlichen Untersuchung des Betriebs der Anlage mit speziellen Brennstoffe gegeben, die im Rahmen von Verbrennungsversuchen eingesetzt werden.

Die Auslegung der Anlage und die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit erfordert die Festsetzung eines bestimmten Brennstoffs als Regelbrennstoff. Dabei wird von folgendem (gemischten) Brennstoff ausgegangen:

- *Hochkalorische Fraktion aus der mechanisch-biologischen Aufbereitung:*

derzeit werden in Deutschland mehrere Verfahren zur mechanisch-biologischen Aufbereitung von Siedlungsmüll praktiziert bzw. noch entwickelt. Die Verfahren sind im einzelnen sehr unterschiedlich und verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen. Sämtlichen Verfahren ist jedoch gemeinsam, daß der Siedlungsmüll zerkleinert wird und eine leichte Fraktion abgetrennt wird. Diese Fraktion ist aufgrund ihres hohen Anteils an Kunststoff-

fen, Papier u. a. sehr heizwertreich. Je nach Behandlungsverfahren kann diese hochkalorische Fraktion den größten Teil des Eingangsmassenstroms ausmachen.

Diese Fraktion wird mit dem Ziel der energetischen Verwertung hergestellt (vgl. /Darmstadt 1998/). Die Verbrennung in Kleinanlagen zur Erzeugung von Wärme und Strom mit hoher Effizienz würde eine solche Verwertung darstellen. Daher besteht ein großes Interesse, das Betriebsverhalten der geplanten Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung bei Einsatz dieser Fraktion zu untersuchen und zu optimieren (/Maselli 1999/). Ziel der Untersuchungen ist, die Eignung dieses Materials als Regelbrennstoff für Kleinanlagen zu überprüfen. Damit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, das Konzept der mechanisch-biologischen Aufbereitung als Methode zur Siedlungsmüllentsorgung zu schließen. Parallel dazu soll das Konzept der dezentralen Erzeugung von Wärme und Strom am Ort eines Wärmeverbrauchers aus dieser Abfallfraktion, die auch als Ersatzbrennstoff bezeichnet wird, untersucht werden.

- Shredderleichtfraktion

Beim Shreddern von Alautos entsteht neben einer stofflich verwertbaren Schrottfraktion eine Fraktion aus Reststoffen, die sog. Shredderleichtfraktion. Sie enthält heizwertreiche Stoffe wie Kunststoffe, Textilien, Holz und Papier, aber auch aschereiche Bestandteile wie Glas, Metalle, Staub, Lacksplitter u. a.. Der Gehalt an Schwermetallen und Chloriden der Shredderleichtfraktion ist deutlich höher als bei Siedlungsmüll.

Durch mechanische Behandlungsschritte wie die Klassierung, die Metallabscheidung nach der Klassierung und die Dichtentrennung kann die Qualität der Shredderleichtfraktion erhöht (vgl. z. B. /Spanke 1998/, /Mark et al. 1998/) und ihr Schadstoffgehalt reduziert werden. Da der Anteil der Kunststoffe in der Shredderleichtfraktion bei diesen Behandlungsschritten zunimmt, steigt der Heizwert. Der für die energetische Verwertung notwendige Schwellenwert von 11 MJ/kg kann infolge der mechanischen Behandlung überschritten werden.

Die Mitverbrennung von Shredderleichtfraktion in Müllverbrennungsanlagen ist technisch möglich und wird bereits praktiziert. Der Anteil der Shredderleichtfraktion am gesamten Mülleinsatz beträgt im regulären Anlagenbetrieb einige Prozent. Lediglich versuchsweise wurden Anteile von bis zu 36 % Shredderleichtfraktion mit Haushaltsmüll vermischt und in einer Müllverbrennungsanlage verbrannt (vgl. /Mark 1999/).

Als Alternative zur Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen könnte Shredderleichtfraktion in Kleinanlagen energetisch verwertet werden. Dadurch würde dem Verwertungsgedanken Rechnung getragen und die deutsche Altautoverordnung erfüllt, die für die



nächsten Jahre einen steigenden Prozentsatz an verwertetem Material bei der Entsorgung von Altautos fordert. Die Art der Aufbereitung muß dabei sicherstellen, daß die Schadstoffgehalte des Materials nicht zu hoch sind.

Ein Untersuchungsziel für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung besteht in der Sammlung von Betriebserfahrungen bei der Mitverbrennung von Shredderleichtfraktion. Die Mischung der Shredderleichtfraktion mit der o. g. hochkalorischen Fraktion aus der mechanisch-biologischen Aufbereitung soll regelmäßig erfolgen. In diesem Sinne soll Shredderleichtfraktion als Regelbrennstoff eingesetzt werden.

Ein weiterer Brennstoff, der technisch als Brennstoff für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung geeignet ist und in den entsprechenden Mengen zur Verfügung steht, ist Gebrauchtholz. Ein Regelbetrieb der Demonstrationsanlage mit Gebrauchtholz ist allerdings wirtschaftlich nicht tragbar, da der Marktpreis für Gebrauchtholz (derzeit) unterhalb der für eine Wirtschaftlichkeit notwendige Vergütung für die Entsorgung einer Tonne Abfall zur Verwertung liegt.

Zusätzlich zu den Regelbrennstoffen sollen in der Demonstrationsanlage in Verbrennungsversuchen unterschiedliche Abfälle zur Verwertung verbrannt werden. Im Rahmen der Verbrennungsversuche sollen die optimalen Betriebsparameter für die Verbrennung der Abfälle ermittelt werden und die Eignung der energetischen Verwertung als Entsorgungspfad demonstriert werden.

Die Abfälle für Verbrennungsversuche sollen je nach Bedarf dem breiten Spektrum der Industrie- und Gewerbeabfälle entnommen werden. Bereits heute erkennbarer Bedarf besteht z. B. für die Verbrennung von Spuckstoffen aus der Papierindustrie und verschiedene Produktionsrückstände mit hohen organischen Anteilen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in Deutschland übliche Form der thermischen Behandlung von Abfällen, insbesondere von Siedlungsabfällen, besteht in der Verbrennung in Großanlagen. Durch den Bau möglichst großer Anlagen versucht man, die Degression der spezifischen Investitionen mit wachsender Anlagengröße auszunutzen und die Behandlungskosten pro Tonne Abfall zu senken.

Verbunden mit der Großanlagentechnik treten aber auch eine Reihe von Problemen auf. Die Auslastung der Anlagen ist oft schwierig zu erreichen, die Logistik ist aufwendig, die Akzeptanz der Anlagen in der Bevölkerung ist gering und die Energienutzung erfolgt – von Ausnahmen abgesehen – mit niedrigem Nutzungsgrad.

In Großanlagen zur Verbrennung von Siedlungsabfällen besteht das Hauptziel der Verbrennung in der Beseitigung der Abfälle und des darin enthaltenen Schadstoffpotentials. Darüber hinaus gibt das Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz die Möglichkeit zur Verbrennung von Abfällen als Maßnahme zur energetischen Verwertung von Abfällen. Damit die Verbrennung als Maßnahme zur Verwertung angesehen werden kann, müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. Eine Voraussetzung besteht darin, daß das Hauptziel der Verbrennung in der Erzeugung von Endenergie, z. B. Fernwärme oder Strom, besteht. Weiterhin müssen einige Anforderungen an den Brennstoff und die Verbrennungsanlage erfüllt sein, z. B. muß der Heizwert von Abfällen zur Verwertung mindestens 11 MJ/kg betragen.

Die energetische Verwertung kann auf mehrere Arten erfolgen, z. B. durch die Mitverbrennung geeigneter Abfälle in Zementwerken, Kraftwerks- oder Industriefeuerungen. Diese Verwertungswege sind unter ökologischen Gesichtspunkten nicht unbedenklich, da dabei höhere Mengen an Luftschadstoffen freigesetzt werden können, als wenn die Abfälle in Anlagen verbrannt würden, die mit einer an diese Aufgabe angepaßten Rauchgasreinigungsanlage ausgestattet sind.

Eine weitere Möglichkeit der energetischen Verwertung besteht darin, die Abfälle in dezentralen Anlagen zu verbrennen, die mit hoher Effizienz Endenergie aus der im Abfall gebundenen Energie erzeugen. Die Anlagen müssen mit einer Rauchgasreinigungsanlage ausgestattet sein, die die Grenzwerte der 17. BImSchV sicher einhält. Die Anlagengröße muß so klein sein, daß die Anpassung an den Wärmebedarf einzelner Verbraucher oder eines Verbundes an Wärmeverbrauchern leicht möglich ist. Auf der anderen Seite dürfen die Kosten für den Betrieb der Anlage nicht so hoch sein, daß die Entsorgung der Abfälle in dezentralen Anlagen unwirtschaftlich im Vergleich zu anderen Entsorgungspfaden wird. Anlagen in diesem Größenbereich werden in der vorliegenden Studie als Kleinanlagen zur energetischen Verwertung bezeichnet. Die Mindestgröße für solche Anlagen ergibt sich nach selbst angestellten Berechnungen aus der Forderung nach einem wirtschaftlichen Betrieb zu rund 16.500 t/a.

Interessant als Betreiber für Kleinanlagen zur energetischen Verwertung sind zum einen Abfallerzeuger mit einem ausreichenden Wärmebedarf. Der Betrieb einer Kleinanlage würde in diesem Fall durch die eingesparten Entsorgungskosten und die eingesparten Kosten für den Energiebezug finanziert. Zum anderen könnten ausreichend große Wärmeverbraucher auch ohne eigene geeigneten Abfälle eine Kleinanlage zur energetischen Verwertung betreiben. In diesem Fall würde ein extern zu beschaffender Ersatzbrennstoff verbrannt, der durch die Aufbereitung von Abfällen erzeugt wird. Mögliche Ersatzbrennstoffe sind die hochkalorische Fraktion einer mechanisch-biologischen Aufbereitung von Siedlungsmüll, eine aufbereitete Shredderleichtfraktion, Gebrauchtholz oder geeignete Industrie- und Gewerbeabfälle.

Aus wirtschaftlichen Gründen können Kleinanlagen zur energetischen Verwertung keine maßstäblich verkleinerten Großanlagen sein, die heute zur Verbrennung von Siedlungsabfällen eingesetzt werden. Kleinanlagen müssen wesentlich vereinfacht werden, dürfen aber nicht die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen zur Abfallverbrennung, insbesondere die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV, in Frage stellen.

Kleinanlagen zur energetischen Verwertung mit diesen Anforderungen sind – von Ausnahmen abgesehen – nicht Stand der Technik. Die Ausnahmen sind im wesentlichen Anlagen zur Verbrennung von Gebrauchtholz oder anderen Materialien biogenen Ursprungs. Für viele Abfälle zur Verwertung müssen geeignete Kleinanlagen dagegen noch entwickelt werden.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Konzeption einer Kleinanlage zur energetischen Verwertung, die zur Sammlung von Betriebserfahrungen und Weiterentwicklung der Anlagentechnik dienen soll. Gleichzeitig soll sie wirtschaftlich betrieben werden und die Wettbewerbsfähigkeit der Kleinanlagentechnik unter Beweis stellen. Dadurch erhält die Anlage den Charakter einer Demonstrationsanlage.

Als Standort für die geplante Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung bietet das Forschungszentrum Karlsruhe eine Reihe von Vorteilen. Der größte Vorteil besteht darin, daß durch das im Forschungszentrum vorhandene F+E-Personal eine kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung des Anlagenbetriebs und eine Unterstützung der Auswertung der Betriebsergebnisse möglich ist.

Der erste Schritt zur Konzeption einer Demonstrationsanlage zur energetischen Verwertung bestand in einer Recherche der für den Größenbereich unter 50.000 t/a verfügbaren Verbrennungsverfahren. Die in Frage kommenden Verfahren liegen zum Teil auch auf Seiten der Anlagenhersteller nur im Konzeptstadium vor. Die verfügbaren Verfahren wurden einem verfahrenstechnischen Vergleich unterzogen. Ein wichtiger Gesichtspunkt bestand darin, daß auch Abfälle mit hohen Heizwerten eingesetzt werden können. Um die Wirtschaftlichkeit der Verfahren abschätzen zu können, wurden Richtpreisangebote eingeholt.

Als unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten am besten geeignetes Verbrennungsverfahren wurde die Verbrennung auf dem Rost angesehen. Als Rosttyp wurde ein Wirbeldüsenrost ausgewählt. Der Wirbeldüsenrost besteht aus Luftkästen, auf die eine Vielzahl von Düsen aufgeschweißt ist. Die Verbrennungsluft tritt mit einer Geschwindigkeit von bis zu 120 m/s vertikal aus den Düsen aus und sorgt damit für eine gute Durchmischung von Verbrennungsluft und Brennstoff. Der Raum zwischen den Düsen ist mit einer schlackeabweisenden, hochfeuerfesten Stampfmasse ausgekleidet.

Durch seine keramische Oberfläche besitzt der Wirbeldüsenrost das Potential zur Verbrennung hochkalorischer Abfälle zur Verwertung, die einen Heizwert von mindestens 11 MJ/kg besitzen müssen, um den gesetzlich festgelegten Status „Abfall zur Verwertung“ zu erreichen. In der Praxis weisen Abfälle zur Verwertung eher Heizwerte zwischen 11 MJ/kg und 20 MJ/kg auf. In den Investitionen liegt der Wirbeldüsenrost unter den Investitionen für andere Rostsysteme, die für hohe Heizwerte ausgelegt sind, z. B. wassergekühlte Vorschubroste.

In realisierten Anlagen mit Wirbeldüsenrost wird bisher nur Gebrauchtholz eingesetzt. Viele Abfälle zur Verwertung, insbesondere kunststoffhaltige, weisen im Vergleich dazu höhere Chlor- und Flouranteile auf, die einen chemischen Angriff der keramischen Oberfläche verursachen können. Daher besteht ein wesentliches Ziel der Untersuchungen an einer Demonstrationsanlage, die Standzeiten des Wirbeldüsenrostes bei der Verbrennung chlor- und flourhaltiger Abfälle zu ermitteln. Ggf. müssen für die Weiterentwicklung des Anlagenkonzeptes Materialuntersuchungen durchgeführt werden.

Die Energienutzung soll durch Dampferzeugung in einem Rauchrohrkessel erfolgen. Mit dem Dampf wird eine zweistufige Turbine mit den zwei Möglichkeiten zur Kondensation oder Erzeugung von Fernwärme betrieben. Dieses Konzept zur Energienutzung ermöglicht eine effiziente Einbindung der Demonstrationsanlage in die bestehende Struktur der Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung im Forschungszentrum Karlsruhe. Unabhängig von der momentanen Wärme- oder Stromnachfrage kann die Demonstrationsanlage über einen möglichst langen Zeitraum pro Jahr mit Vollast betrieben. Dabei wird ein Energienutzungsgrad von 65 % erreicht. Dieser hohe Nutzungsgrad bildet eine wesentliche Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb.

Zur Reduktion von Stickstoffoxiden ist die Eindüsung von Ammoniak in die Nachbrennkammer vorgesehen (SNCR-Verfahren). Dem Kessel nachgeschaltet ist ein Sprühkühler, in dem die Rauchgase konditioniert werden. In den konditionierten Rauchgasstrom wird ein Gemisch aus Kalkhydrat und Aktivkoks eingeblasen. Das Kalkhydrat dient zur Abscheidung der sauren Schadgase HCl, SO<sub>2</sub> und HF. Am Aktivkoks werden organische Schadstoffe, vor allem die hochtoxischen Dioxine und Furane, sowie Schwermetalle adsorbiert. Die mit dem Rauchgas mitgeführten Additive und mitgetragener Flugstaub werden an einem nachgeschal-

teten Gewebefilter abgeschieden. Auf der Filteroberfläche bildet sich eine Filterhilfsschicht aus, die die Reinigungswirkung des Filters unterstützt. Die Reaktionen der Schadstoffe mit den Additiven läuft überwiegend in der Filterhilfsschicht ab.

Mit dieser sog. konditionierten Trockensorption können die Grenzwerte der 17. BImSchV sicher eingehalten werden, sofern die Temperatur der Rauchgase im Gewebefilter und der Feuchtegehalt der Rauchgase richtig eingestellt werden. Gute Erfahrungen wurden in bestehenden Anlagen mit Rauchgastemperaturen im Gewebefilter von 142 °C bis 145 °C gemacht.

Um wirtschaftlich arbeiten zu können, muß der Anlagenbetrieb soweit wie möglich automatisiert werden. Dies umfaßt die Brennstoffbeschickung, für die ein System aus Schubböden und Förderbändern vorgesehen ist. Damit in der Brennstoffbeschickung möglichst wenig Störungen auftreten, darf die Kantenlänge des Brennstoffs 10 cm bis maximal 20 cm nicht überschreiten. Soll ein Abfall zur Verwertung verfeuert werden, der diese Spezifikationen nicht erfüllt, muß der Abfall beim Lieferanten zerkleinert werden. Ggf. sind noch weitere Behandlungsschritte nötig, die den Abfall zum Ersatzbrennstoff für eine Kleinanlage aufwerten.

Durch die Automatisierung wird ein Betrieb der Anlage mit einer Person pro Schicht möglich. Die Aufgaben bestehen im wesentlichen in der Überwachung der Anlage mit Hilfe eines PC-gestützten Prozeßleitsystems und in der Behebung kleiner Störungen, die sich vor allem in der Brennstoffbeschickung nicht vollständig vermeiden lassen. Bei der für die Tagesschicht vorgesehenen Anlieferung des Brennstoffs besteht zusätzlicher Personalbedarf. Weiterer Personalbedarf besteht bei der Behebung von Störungen, die nicht vom Betriebspersonal selbst behoben werden können. Geht man für die beiden letztgenannten Aufgaben von einem Personaleinsatz von einem Personenjahr pro Jahr aus, ergibt sich insgesamt ein Personaleinsatz von 6 Personenjahren pro Jahr.

Für den Betrieb der Anlage ist ein Betreibermodell vorgesehen. Für die Errichtung und den Betrieb der Anlage ist ein Unternehmen zuständig, das in der Entsorgungsbranche tätig ist und Contracting-Leistungen anbietet. Um den Anlagenbetrieb wirtschaftlich zu gestalten, soll während der überwiegenden Stundenzahl pro Jahr Regelbrennstoff verfeuert werden. Als Regelbrennstoff ist eine Mischung aus der hochkalorischen Fraktion einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage für Siedlungsabfälle und einer aufbereiteten Shredder-Leichtfraktion vorgesehen. Zusätzlich zum Regelbrennstoff sollen im Rahmen von Verbrennungsversuchen unterschiedliche Abfälle zur Verwertung verfeuert werden, an deren Verbrennung Interesse bei Industriebetrieben oder sonstigen Interessenten besteht.

Während der Verbrennungsversuche, zum Teil auch während des Anlagenbetriebs mit Regelbrennstoff, soll der Anlagenbetrieb wissenschaftlich begleitet werden. Diese Aufgaben können vom F+E-Personal des Forschungszentrums Karlsruhe vorgenommen werden. Der

Betrieb der Anlage mit Regelbrennstoff bietet insbesondere den Vorteil, daß Langzeituntersuchungen vorgenommen werden können.

Ziel der Versuche ist, das Betriebsverhalten der Anlage in Abhängigkeit vom Brennstoff kennenzulernen und soweit wie möglich zu verbessern. Dadurch soll das Spektrum der Abfälle, die sich zur energetischen Verwertung in Kleinanlagen eignen, sukzessive erschlossen werden. Aus den zu sammelnden Betriebserfahrungen sollen die Grundlagen zur verbesserten Auslegung von Kleinanlagen zur energetischen Verwertung abgeleitet werden. Dazu soll das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Programmsystem TOSCA eingesetzt werden. Diese Aufgabe erfordert eine enge Kopplung des Anlagenbetriebs, der Versuchsdurchführung und der Weiterentwicklung des Programmsystems.

Neben diesen anwendungsorientierten Untersuchungen können für eine festzulegende Stundenzahl pro Jahr grundlagenorientierte Untersuchungen vorgenommen werden. Beispielsweise können die Möglichkeiten zur und die Effektivität der gestuften Verbrennung zur  $\text{NO}_x$ -Minderung unter Praxisbedingungen untersucht werden, die am Forschungszentrum Karlsruhe bereits in anderen Verbrennungsanlagen untersucht wird.

Für die geplante Demonstrationsanlage mit einem Jahresdurchsatz von 16.500 t/a wurde im Rahmen eines Richtpreisangebotes eine erforderliche Investition von 10,6 Mio. DM angegeben. Infolge der wesentlich einfacheren Auslegung und Ausstattung der Demonstrationsanlage liegen die spezifischen Investitionen mit rund 650 DM/t um einen Faktor 2 bis 3 unter den spezifischen Investitionen für Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle.

Die Erlösstruktur zeigt, daß der größere Teil der Erlöse durch die Energieerzeugung erwirtschaftet wird. Auf die Stromeinspeisung entfallen der 32 % der Erlöse, auf die Wärmeeinspeisung 26 % der Erlöse und auf die Vergütung für den Ersatzbrennstoff 42 % der Erlöse. Die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs reagiert am sensibelsten auf eine Variation der Vergütung für den Ersatzbrennstoff. Als erzielbar wird eine Vergütung von 100 DM pro Tonne Ersatzbrennstoff angesehen. Eine um 20 % niedrigere Vergütung läßt den Anlagenbetrieb wirtschaftlich uninteressant werden. Der Grenzpreis, ab dem die Erlöse die Kosten übersteigen, liegt bei 71 DM pro Tonne Ersatzbrennstoff.

Auf der Kostenseite reagiert die Wirtschaftlichkeit am sensibelsten auf eine Variation der Investitionen. Bei einer Erhöhung um 1 Mio. DM bleibt der Anlagenbetrieb wirtschaftlich, bei einer Erhöhung um 2 Mio. DM wird der Anlagenbetrieb wirtschaftlich uninteressant. Ein anderer wesentlicher Kostenfaktor ist der Personaleinsatz. Eine Erhöhung des Personaleinsatzes von im Referenzfall angesetzten 6 auf 7 oder 8 Personenjahre pro Jahr verhindert einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb nicht.

Als Ergebnis dieser Studie läßt sich festhalten, daß Kleinanlagen zur energetischen Verwertung ab einer Kapazität von rund 16.500 t/a wirtschaftlich betrieben werden können. Dazu müssen die Auslegung und Ausstattung der Kleinanlage im Vergleich zu einer Großanlage zur Siedlungsmüllverbrennung vereinfacht werden. Die vorliegende Studie zeigt, daß Vereinfachungen möglich sind, die die Investition für eine Kleinanlage senken, aber die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen zur Abfallverbrennung, insbesondere der 17. BImSchV, nicht in Frage stellen. Diese Vereinfachungen setzen voraus, daß der Brennstoff nicht zu grobstückig ist. Für eine Reihe von Abfällen ist daher vor der Verbrennung in einer Kleinanlage eine externe Behandlung erforderlich, die eine Zerkleinerung und ggf. weitere Schritte umfaßt. Die Kosten für diese Behandlungsschritte sind nicht in den hier aufgeführten Verbrennungskosten enthalten.

Für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb ist auf Seiten der Erlöse ein hoher Energienutzungsgrad erforderlich, der im vorliegenden Fall durch eine zweistufige Dampfturbine mit zwischengeschalteter Dampfentnahme zur Kraft-Wärme-Kopplung erreicht wird. Die Erzeugung von Endenergie aus Abfällen mit hohem Nutzungsgrad ist nicht nur aus betriebswirtschaftlicher Sicht interessant, sondern auch aus umweltpolitischer Sicht, da dadurch ein Beitrag zu dem von der Bundesregierung angestrebten Ziel der CO<sub>2</sub>-Minderung erreicht wird. Ein weiterer umweltpolitischer Vorteil von Kleinanlagen zur energetischen Verwertung liegt in der im Konzept angestrebten räumlichen Nähe von Abfallerzeuger und –verwertungsanlage. Dadurch wird ein „Mülltourismus“ vermieden, der auf zunehmende Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung stößt, und es wird zur Verkehrsvermeidung beigetragen.

Neben einem hohen Energienutzungsgrad muß für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb eine ausreichende Vergütung für die Verbrennung von Ersatzbrennstoff erzielt werden. Für die Konzeption der Anlage wurde davon ausgegangen, daß Erlöse um 100 DM/t erzielt werden können. Eine Orientierung an einem Marktpreis ist nicht möglich, da noch kein funktionierender Markt für Ersatzbrennstoff existiert. Daher können keine Prognosen über die zukünftige Entwicklung der Vergütung gemacht werden. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, daß, bedingt durch die Fristen der TA Siedlungsabfall, in Zukunft neue Entsorgungspfade für viele Abfälle zur Verwertung gefunden werden müssen, die heute noch Wege gehen, die nicht im Einklang mit der TA Siedlungsabfall stehen. Die energetische Verwertung der Abfälle in Kleinanlagen bietet eine Entsorgungsoption, die in Einklang mit der TA Siedlungsabfall steht und die Vorgaben des Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetzes erfüllt, das eine Verwertung – unabhängig davon, ob stofflich oder energetisch – über die Beseitigung stellt.

Diese Überlegungen setzen die Existenz leistungsfähiger Kleinanlagen zur energetischen Verwertung voraus. Der nächste Schritt zur Entwicklung einer leistungsfähigen und wettbewerbsfähigen Kleinanlagentechnik besteht in der Realisierung und dem Betrieb einer Anlage, wie sie in dieser Studie konzipiert worden ist.



## 7 Literatur

Akustat et al. 1998

M. Akustat et al.: Neue Daten zur Kostenstruktur der thermischen Abfallbehandlung. In: Thermische Abfallbehandlung. Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Nr. 137, Technische Universität München 1998.

Bayer 1995

W. Bayer: Optimale Auslegung und wirtschaftlichste Betriebsform der Abfallverbrennung durch Computersimulation. In: Thermische Abfallbehandlung. VDI-Berichte 1192. VDI-Verlag, Düsseldorf 1995.

Boeckh 1999

M. Boeckh: Methanol aus Müll. Umwelttechnik, Heft 6, 1999.

Born 1996

M. Born: Möglichkeiten und Grenzen der thermischen Abfallbehandlung in dezentralen Anlagen. Abfallwirtschaftsjournal 12/96, S. 11.

Born, Seifert 1998

M. Born ; P. Seifert: Thermodynamische Berechnungen zur chlorinduzierten Korrosion an Heizflächen von Feuerungsanlagen. VGB Technische Wissenschaftliche Berichte 214, Essen 1998

Darmstadt 1998

Verein zur Förderung des Institutes Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt und Raumplanung der TU Darmstadt (Hrsg.): Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen. Tagungsband des 54. Darmstädter Seminars Abfalltechnik, Darmstadt 1998.

DE19736003A1

Offenlegungsschrift DE 197 36 003 A 1 des deutschen Patentamtes vom 26.02.98 (Offenlegungstag). Recherchierbar unter <http://www.depanet.de>

Friedel, Urban 1998

M. Friedel ; A. Urban: Ökologische Aspekte beim Einsatz aufbereiteter Abfälle in thermischen Anlagen. In: Thermische Abfallbehandlung. Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Nr. 137, Technische Universität München 1998.

IPSEpro 1999

Simulation Technology GmbH, Graz: Software-Paket IPSEpro, Version 3.0, Stand 1999.

Kaimer, Schade 1998

M. Kaimer ; D. Schade (Hrsg.): Bewertung der thermischen Abfallbehandlung. Bericht der Akademie für Technikfolgenabschätzung, Stuttgart 1998

F. Mark 1999

F. Mark: Energy Recovery from Automotive Shredder Residue through Co-combustion with municipal solid waste. Collected Papers of the R`99 world congress. ISBN 3-905555-17-4.

Mark et al. 1998

F. Mark ; M. Brunner ; R. Ackermann ; C. Wirz: Charakterisierung und Entfrachtung von Reststoffen aus Autosshredderanlagen. Müll und Abfall 12/98, S. 45

Maselli 1999

J. Maselli: Status quo und mittelfristige Entwicklung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung von Siedlungsabfällen. Müll und Abfall 7, 1999, S. 435.

Mensing, Mayer, Pauli 1997

A. Mensing ; B. Mayer ; B. Pauli: Energetische Verwertung von Holzresten mit der Wirbel-düsenrostfeuerung. In: Marutzky, R. (Hrsg.): Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 1997.

Metschke et al. 1997

J. Metschke ; J. Krüger ; R. Karpf ; R. Siebert: Einstufige konditionierte trockene Rauchgasreinigung. Abfallwirtschaftsjournal 11/97, S. 17

Mickel 1996

K. Mickel: Thermische Reststoffverwertung mit Wärmenutzung am Beispiel einer 1,3 MW Verschwelungs-/Hochtemperaturverbrennungsanlage. In: Thermische Behandlung in dezentralen Anlagen. Tagungsband XLVII. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Bergakademie Freiberg. Freiberg 1996

Neukirchen, Jung 1996

B. Neukirchen ; H. Jung: Die Kosten der thermischen Abfallbehandlung. VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 10, S. 829

Peters 1996

B. Peters: Efficient software development and use for engineering applications with TOSCA (Tools of object oriented software for continuum mechanics applications). In: CFD 96, Fourth Annual Conference of the CFD Society of Canada, Ottawa, Ontario, Canada 1996.

Peters 1997

B. Peters: Application de la conception objet orientée à la modelisation de l'incinération de déchets municipaux. In: Informatique pour l'Environnement 97, Strasbourg 1997.

Schäfers, Schuhmacher, Zwahr 1997

W. Schäfers ; W. Schuhmacher ; H. Zwahr: Die Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg. VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997), Heft 9, S. 738

Seier, Albert 1999

J. Seier, F. Albert: Optimierung der energetischen Nutzung von Abfällen in Müllheizkraftwerken durch die Anwendung der Fremdüberhitzung. In VDI-Berichte 1457. Düsseldorf 1999

Seier et al. 1998

J. Seier, J. Vehlow, A. Mensing, P. Weisser, H. Blume: Medium Sized Incineration Facilities for Korea. Forschungszentrum Karlsruhe 1998. ISBN 3-923704-21-6

Spanke 1998

V. Spanke: Aufbereitung der Shredderleichtfraktion aus der Altautoverwertung. Entsorgungspraxis 5/98, S. 26

Thyssen 1999

Thyssen Still Otto Anlagentechnik GmbH (Hrsg.): Das MultiCom<sup>®</sup>-Konzept. Informationsschrift der Thyssen Still Otto Anlagentechnik GmbH, Stand 1999.

Voß 1998

W. Voß: KWK-Anlage mit Holzverbrennung in Wismar. Vortrag auf dem VDI-Seminar "Stand der Feuerungstechnik für Holz, Holzabfälle und Biomasse" im Dezember 1998 in Salzburg

Walter 1998

C. Walter: Umweltfreundliche Energieerzeugung mit Holz-Heizkraftwerken. Brennstoff-Wärme-Kraft 50 (1998), Nr. 10, S. 20

ZAK 1998

ZAK Energie GmbH (Hrsg.): Das neue Holzheizkraftwerk. Prospekt der ZAK Energie GmbH, Kempten, 1998