

KfK 3524
März 1983

Folgen eines verstärkten Kohleeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland

Studienleiter: R. Coenen
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

Materialienband II: Technische Konzepte, Emissionsaspekte und mittelfristige Einsatzmöglichkeiten der Wirbelschichtfeuerung

Autoren:
B. Bonn, H. D. Schilling
Bergbau-Forschung GmbH, Essen

Kernforschungszentrum Karlsruhe

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M K A R L S R U H E

Abteilung für Angewandte Systemanalyse

KfK 3524

FOLGEN EINES VERSTÄRKTEN KOHLEEINSATZES IN DER
BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Studienleiter: R. Coenen

Materialienband II: Technische Konzepte, Emissionsaspekte
und mittelfristige Einsatzmöglichkeiten
der Wirbelschichtfeuerung

Autoren:

B. Bonn, H.D. Schilling
Bergbau-Forschung GmbH, Essen

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Folgen eines verstärkten Kohleeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland

Technische Konzepte, Emissionsaspekte und mittelfristige Einsatzmöglichkeiten der Wirbelschichtfeuerung

Zusammenfassung

Die Wirbelschichtfeuerung ist in den letzten Jahren wegen ihrer vorteilhaften Eigenschaften, unter denen besonders die niedrigen Schadstoffemissionen und die Unempfindlichkeit gegen Brennstoffqualitätsschwankungen hervorzuheben sind, in besonderem Maße in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Es ist zu erwarten, daß diese Technik für den zukünftig verstärkten Einsatz von Kohle eine herausragende Rolle spielen wird, da sie es gestattet, auch kleinere und mittelgroße Anlagen bei hoher Umweltfreundlichkeit zu betreiben, ohne daß dadurch unwirtschaftlich hohe Kosten entstehen.

In diesem Bericht werden Prinzip und unterschiedliche Bauweise der Wirbelschichtfeuerung dargestellt. Es wird ein Überblick über technische Konzepte gegeben, die bereits in in- und ausländischen Versuchsanlagen realisiert wurden. In weiteren Abschnitten des Berichtes werden Emissionsaspekte der Wirbelschichtfeuerung und mittelfristige Einsatzmöglichkeiten diskutiert. Dem Bericht ist eine Kurzfassung vorangestellt.

Consequences of an Expanded Use of Coal in the Federal Republic of Germany

Technical Concepts, Emission Aspects, and Middle-Term Possibilities for Deployment of Fluidized-Bed Combustion Technologies

Abstract

Over the past few years, Fluidized-Bed Combustion (FBC) has received special attention due to its advantageous characteristics, particularly with respect to lower emissions of sulphur dioxide and insensitivity to variations in fuel quality. It can be expected that this technology will play a leading role in a future increased use of coal since it permits small and medium-sized facilities to operate in a more environmentally compatible manner without uneconomically high cost.

In this report the principle and alternative designs of Fluidized-Bed Combustion are delineated. An overview of technical concepts is given which have already been demonstrated in domestic and foreign pilot plants. In a further part of the report, the emission aspects and middle-term possibilities for deployment of FBC technologies will be discussed. The report is preceded by a summary version.

Vorwort

Dieser Bericht entstand im Rahmen eines Unterauftrages zur Studie "Folgen eines verstärkten Kohleeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland", die mit finanzieller Unterstützung des Bundesministers für Forschung und Technologie von der Abteilung für Angewandte Systemanalyse des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt wird.

In dieser Studie werden die technisch-ökonomischen, die ökologischen und die gesellschaftlichen Auswirkungen eines verstärkten Kohleeinsatzes zur Ölsubstitution in der Bundesrepublik Deutschland untersucht. Hierbei werden folgende drei Kohleeinsatzstrategien analysiert, die sich durch die Art der Kohleumwandlung unterscheiden:

Verheizungsstrategie: Einsatz von Kohle in Heizwerken und Heizkraftwerken zur Wärme- und Stromerzeugung

Verstromungsstrategie: Einsatz von Kohle in Großkraftwerken zur Stromerzeugung

Veredlungsstrategie: Einsatz von Kohle in Veredlungsanlagen zur Erzeugung von Kohleöl und Kohlegas.

Basis für die Analysen der Folgen dieser Kohleeinsatzstrategien sind technische Analysen zu den in den Strategien zum Einsatz vorgesehenen Kohleumwandlungsanlagen und Anlagen zur Nutzung der Kohleumwandlungsprodukte. Sie sollen technisch-ökonomische und umweltrelevante anlagenspezifische Kenndaten liefern.

Bei dem vorliegenden von der Bergbau-Forschung GmbH als Unterauftrag erstellten Bericht handelt es sich um eine derartige technische Analyse für die Wirbelschichtfeuerung. Diese Technik wird im Rahmen der Kohlestudie als eine mittelfristig interessante Technik speziell für die Verheizungsstrategie angesehen, da sie vom Konzept her eine umweltfreundliche Kohlenutzung auch in kleineren und mittleren Anlagen zu wirtschaftlichen Bedingungen verspricht. Der Bericht stellt eine umfangreiche und aktuelle Materialsammlung

zum technischen Entwicklungsstand, zu den mittelfristigen Einsatzmöglichkeiten und den Emissionsaspekten dieser Technik dar.

Da diese Analyse eine in sich geschlossene systematische Bestandsaufnahme darstellt, deren Ergebnisse insbesondere vor dem Hintergrund der derzeitigen energiepolitischen Diskussion von Interesse sind, aber nur partiell in den Schlußbericht der Kohlestudie einfließen werden, wird sie als Materialienband zur Kohlestudie veröffentlicht.

Für die Betreuung des Unterauftrages (Aufgabenformulierung, Abstimmung etc.) war Herr Dr. Günter Halbritter (AFAS) verantwortlich.

Februar 1983

R. Coenen

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
Kurzfassung	I
1. Einleitung	1
2. Bisher in Versuchsanlagen realisierte technische Konzepte	11
2.1. Die Anlage Gneisenau der Ruhrkohle AG	12
2.2. Die WS-Module des Modellkraftwerkes Völklingen der Saarbergwerke AG	15
2.3. "Shallow-bed" WSF-Kessel englischer Bauart	16
2.4. Die Anlage König Ludwig der Ruhrkohle AG	20
2.5. Die Anlage Flingern der Ruhrkohle AG	23
2.6. Das WSF-Heizkraftwerk der Georgetown Universität in Washington D. C.	29
2.7. Die Prozeßwärmeanlage der Vereinigte Aluminiumwerke AG mit zirkulierender Wirbelschicht	31
3. Emissionsaspekte	35
3.1. Kohlenmonoxid-Emissionen	37
3.2. Schwefeldioxid-Emissionen	40
3.3. Emission von Stickoxiden	52
3.4. Halogenwasserstoffverbindungen	59
3.5. Polyaromatische Verbindungen	62
3.6. Staubbörmige Emissionen	67
3.7. Rückstände	74
3.7.1. Besonderheiten der WSF-Rückstände im Vergleich zu konventionellen Kohlenaschen	74
3.7.2. Weiterverwendungsmöglichkeiten der Rückstände und Deponie	77
4. Mittelfristige Einsatzmöglichkeiten und realisierbare Konzepte der Wirbelschichtfeuerung	82
4.1. Mittelgroße Feuerungsanlagen	82
4.1.1. Die Anlage Afferde der Elektrizitätswerke Wesertal AG	86

	<u>Seite</u>
4.1.2. Die Anlage der Technischen Hochschule Aachen	88
4.1.3. Mittelfristige weitere Entwicklung	90
4.2. Kleine Feuerungsanlagen	92
4.2.1. Die "shallow-Bed" WSF-Technik	93
4.2.2. Kleine WSF-Anlagen mit Sattdampfkessel	96
4.2.3. Klein-Heizkraftwerkskessel mit WSF (Anlage der Stadtwerke Lüneburg)	99
4.3. Große Feuerungsanlagen	101
4.3.1. Stationäre atmosphärische WSF-Großanlagen	101
4.3.2. Kombikraftwerkskonzepte mit Druckwirbelschichtfeuerungen	103
4.3.3. Anlagen mit zirkulierender WSF (Anlage der Stadtwerke Duisburg)	111
4.4. Verbrennungsanlagen für Rückstände und minderwertige Brennstoffe	114
5. Zusammenfassung	116
Literaturverzeichnis	121

Technische Konzepte, Emissionsaspekte und mittelfristige
Einsatzmöglichkeiten der Wirbelschichtfeuerung

Kurzfassung

Inhalt:

1. Einleitung
 - 1.1 Prinzip und unterschiedliche Bauweise von Wirbelschichtfeuerungen
 2. Bisher in Versuchsanlagen realisierte technische Konzepte
 3. Emissionsaspekte
 - 3.1 Kohlenmonoxid-Emissionen
 - 3.2 Schwefeldioxid-Emissionen
 - 3.3 Emission von Stickoxiden
 - 3.4 Halogenwasserstoff-Emissionen
 - 3.5 Polyaromatische Verbindungen
 - 3.6 Staubförmige Emissionen
 - 3.7 Rückstände
 4. Mittelfristige Einsatzmöglichkeiten und realisierbare Konzepte der Wirbelschichtfeuerung
 5. Zusammenfassung
- Literatur

1. Einleitung

Die Wirbelschichtfeuerung (WSF) ist in den letzten Jahren wegen ihrer vorteilhaften Eigenschaften, unter denen besonders die niedrigen Schadstoffemissionen und die Unempfindlichkeit gegen Brennstoffqualitätschwankungen hervorzuheben sind, in besonderem Maße in den Blickpunkt des Interesses gerückt (1, 2). Es ist zu erwarten, daß diese Technik für den zukünftig verstärkten Einsatz von Kohle eine herausragende Rolle spielen wird, da sie es gestattet auch kleinere und mittelgroße Anlagen bei hoher Umweltfreundlichkeit zu betreiben, ohne daß dadurch unwirtschaftlich hohe Kosten entstehen (3, 4). Nachdem vor allem in England und USA Entwicklung und Bau von WSF-Demonstrationsanlagen einen zeitlichen Vorsprung vor den Bemühungen in der Bundesrepublik Deutschland hatten, sind inzwischen auch bei uns erste repräsentative Anlagen in Betrieb gegangen oder noch im Bau. Die technisch-kommerzielle Erprobung dieser Feuerungstechnik läuft also gerade an. In der Tat ist seit der Fertigstellung der Langfassung dieses Berichtes der Bauentschluß für die Anlage der Stadtwerke Duisburg (vgl. Langfassung, Abschn. 4.3.3.) gefallen (5). Dieser Bericht stellt somit eine Momentaufnahme einer in raschem Fluß begriffenen Entwicklung dar. Dies gilt nicht nur für die technischen, sondern auch für die emissionsrechtlichen Aspekte: Auch der in der Diskussion befindliche Entwurf einer Großfeuerungsanlagen-VO wurde inzwischen geändert. In dieser Kurzfassung wird daher auf die vorgesehenen Emissionsgrenzwerte der neuesten Fassung (6) Bezug genommen.

1.1. Prinzip und unterschiedliche Bauweise von Wirbelschichtfeuerungen

Wirbelschichtapparate, die in manchen Bereichen der Verfahrenstechnik bereits seit einiger Zeit kommerziell großtechnisch eingesetzt werden, dienen dazu, Umsetzungen zwischen körnigen Feststoffen und Fluiden durchzuführen, wenn intensive Feststoffdurchmischung und hohe Wärmeübertragung erwünscht ist. Unterschiedlichen Bauweisen entsprechend wird bei der Wirbelschichtfeuerung von Kohle zwischen

- atmosphärischen stationären Wirbelschichtfeuerungen (AWSF)
- atmosphärischen zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen (ZWSF) und
- druckbetriebenen stationären Wirbelschichtfeuerungen (DWSF)

unterschieden. Der ebenfalls denkbare Fall einer druckbetriebenen, zirkulierenden WSF ist bisher nicht erprobt worden.

Im Bild 1 ist schematisch ein Dampfkessel mit AWSF wiedergegeben. Die Verbrennungsluft wird durch einen Luftkasten und einen Anströmboden, der die Wirbelschicht trägt und für eine gleichmäßige Luftverteilung sorgt, in eine Feststoffschüttung eingeblasen, die dadurch fluidisiert wird. Brennstoff und Zuschlagsmaterial, gewöhnlich in einer Körnung ≤ 6 mm, werden direkt in die Wirbelschicht dosiert, in der die Verbrennung bei Temperaturen von ca. 800 - 900 °C abläuft. Um diese Temperatur bei niedrigem Luftüberschuß halten zu können, wird üblicherweise ein Wärmetauscher, z. B. ein Verdampferbündel, in die WS eingebaut, die fühlbare Wärme des Rauchgases wird über nachgeschaltete konvektive Heizflächen konventionell abgeführt. Die Verbrennungsrückstände werden z. T. mit dem Rauchgas aus der Brennkammer ausgetragen und können, z. B., wenn sie noch größere Anteile unverbrannten Kohlenstoffs enthalten, in den Feuerraum zurückgeführt werden. Überschüssiges Schichtmaterial wird durch eine

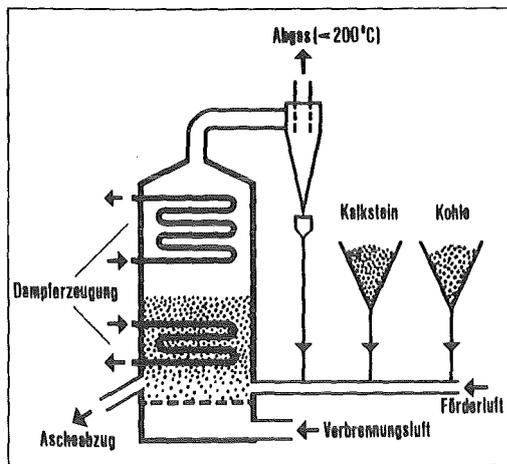


Bild 1: Schema eines Dampfkessels mit stationärer Wirbelschichtfeuerung

Ascheabzugsvorrichtung direkt aus der Brennkammer entfernt. Das Schichtmaterial hat je nach eingestelltem Luftüberschuß der Feuerung und je nach Abbrenngeschwindigkeit der Kohle einen Kohlenstoffgehalt von einigen Zehntel bis zu einigen Prozent; der Rest ist Inertmaterial (z.B. Asche, Zuschläge, Sand etc.). Die Verbrennung in einer WSF wird durch Zündbrenner initiiert, die das zunächst brennstofffreie Schichtmaterial bis über die Zündtemperatur der Kohle vorwärmen. Durch dosierte Eingabe von Brennstoff wird danach die stationäre Betriebstemperatur der WS eingestellt.

Im Gegensatz zur Rostfeuerung (Festbettreaktor) ergibt sich bei der WSF durch die intensive Feststoffbewegung eine völlig gleichmäßige Temperaturverteilung über die ganze Schicht, ohne die Ausbildung flächiger Brennzonen und ohne die Gefahr der Bildung heißer Nester. Weiterhin resultiert daraus ein wesentlich besserer Wärmeübergang, so daß durch den eintauchenden Wärmetauscher bereits ein großer Teil der erzeugten Wärme aus der Brennkammer abgeführt und mit niedrigem Luftüberschuß gefahren werden kann. Verglichen zur Staubfeuerung (Flugstromreaktor) ergibt sich ein erhebliches kleineres Feuerraumvolumen. Die aufgeheizte WS stellt darüber hinaus auch bei

schwierigen Brennstoffen die Zündung sicher, so daß Stabilitätsprobleme wegfallen und die Feuerungsüberwachung stark vereinfacht wird. Die niedrige Verbrennungstemperatur ermöglicht durch Zuschlag von Kalkstein zum Brennstoff eine einfache und kostengünstige Entschwefelung bereits in der Feuerung und bewirkt, daß kein thermisches Stickoxid entstehen kann und die Verdampfungsraten für Schadstoffe stark vermindert sind (vgl. Abschn. 3).

Die mit der Wirbelluft angebotene Sauerstoffmenge bestimmt den in der WS erreichbaren Wärmeumsatz (Flächenbelastung). Bei der in atmosphärisch stationären Anlagen häufig angewendeten Wirbelgeschwindigkeit von 1,5 m/s ergibt sich dadurch eine praktisch erreichbare Flächenbelastung von ca. $1,2 \text{ MW/m}^2$. Für Großfeuerungen führt dieser Wert zu unbequem großen und konstruktiv schlecht zu beherrschenden Anströmbodenflächen. Eine Erhöhung des spezifischen Wärmeumsatzes ist aber nur durch ein erhöhtes Sauerstoffangebot zu erreichen. Eine Möglichkeit dies zu verwirklichen ist der Druckbetrieb (DWSF), da die Wärmefreisetzungsraten proportional zum Druck steigt. Dadurch wird somit ein noch kompakterer Brennkammerbau ermöglicht, außerdem verbessern sich beim Druckbetrieb der Ausbrand und die spezifischen Emissionen. Allerdings ist der Betrieb einer Feststofffeuerung unter Druck technisch und vom Betrieb her wesentlich aufwendiger als der atmosphärische Betrieb.

Eine andere Möglichkeit, die Flächenbelastung der Feuerung anzuheben, besteht in der Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit. Dies bewirkt jedoch, daß die Schicht stark expandiert, sehr viel Material ausgetragen wird und schließlich der gesamte Reaktor von Staubstrahlen erfüllt wird. Um hier noch zu einem befriedigenden Ausbrand zu gelangen, muß die Brennkammerhöhe stark vergrößert werden. Der Gasberuhigungsraum fällt weg und ein integrierter

Rückführzyklon wird nachgeschaltet, der den Materialaustrag in Grenzen halten soll und eine Zirkulation des gesamten Brennkammerinhaltes ermöglicht. Mit diesem Konzept der zirkulierenden WSF (ZWSF) (Bild 2) sollen bis zu fünfmal höhere Flächenbelastungen als bei der stationären atmosphärischen WSF erreicht werden.

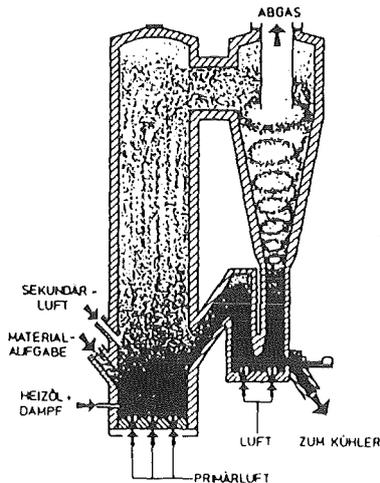


Bild 2: Zirkulierende Wirbelschicht

Die Wärmeabfuhr muß bei der ZWSF aber in einem separaten nachgeschalteten Schichtmaterialkühler und einem konventionellen Abhitze-kessel erfolgen. Diese Entkopplung von Verbrennungsraum und Wärmeübertragungssystem bietet allerdings eine vereinfachte Teillastregelung. Darüber hinaus ermöglicht die ZWSF eine problemlose Brennstoffverteilung über den gesamten Brennraum und die einfache Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft für die Stufenverbrennung.

2. Bisher in Versuchsanlagen realisierte technische Konzepte

Die bisher in der Bundesrepublik Deutschland gebauten WSF-Anlagen sind überwiegend Versuchs- oder Demonstrationsanlagen, die der Erprobung bestimmter technischer Konzepte dienen sollten. Je nach

dem zur Verfügung stehenden Brennstoff kann man ganz grob unterscheiden zwischen Bauarten, die vorwiegend für ballastreiche, schwierige, oft als Schlamm vorliegende, z.T. anderweitig nicht einsetzbare Brennstoffe konzipiert sind und bei denen die Wärmeerzeugung neben der Konditionierung dieser Produkte für die Weiterverwendung oder Deponie eine geringere Rolle spielt und solchen, bei denen die Wärmeerzeugung eindeutig der Hauptzweck der Anlage ist.

Die zuerst genannten Anlagen sind aus WS-Öfen, wie sie in der konventionellen Abfallverbrennung eingesetzt werden, weiterentwickelt worden. Als Beispiele für diese Bauweise seien die Anlagen "Gneisenau" der Ruhrkohle AG (7) und die WSF-Module im Modellkraftwerk Völklingen der Saarbergwerke AG (8) genannt. Kennzeichnend für diese Anlagen ist der sehr große ausgemauerte, ungekühlte Nachverbrennungsraum, in dem die aus der WS ausgetragenen, gezündeten Brennstoffteilchen ausreagieren können. Der Einsatzbrennstoff dieser Anlagen besteht aus Abgängen der Kohleaufbereitung, d.h. überwiegend sehr feinkörnigem Material mit mehr als 70 % Ballastgehalt (Asche und Feuchtigkeit). Da die Brennstoffkosten bei Anlagen dieser Art von untergeordneter Bedeutung sind, können die spezifischen Investitionen höher sein, wodurch die erforderliche aufwendige Bauweise mit einzeln stehender, voluminöser Brennkammer und nachgeschaltetem konventionellem Abhitzekessel erst möglich ist.

Feuerung dieser Art haben aber wegen des hohen Ballastanteils des Brennstoffes einen erheblich eingeschränkten Teillastbereich und eignen sich wegen der keramischen Auskleidung weniger für häufige Starts und Stops, so daß sie hauptsächlich im Grundlastbetrieb eingesetzt werden müssen. Sie sind ferner auf reviernahe Standorte beschränkt.

Als Beispiele für WSF-Bauweisen, die für die Wärmeerzeugung universell eingesetzt werden können, seien die Anlagen "König Ludwig" und "Flingern" der Ruhrkohle AG (9 - 13) und die Anlage der Vereinigte Aluminiumwerke AG in Lünen (14 - 16) aufgeführt. Die beiden erstgenannten sind atmosphärische stationäre WSF-Anlagen mit einer thermischen Leistung von 6 bzw. 35 MW, die dritte Anlage hat eine zirkulierende, atmosphärische WSF, die eine thermische Leistung von 77 MW aufweist.

Während die Anlage König Ludwig im Jahre 1979 als Prozeß- und Heizwärmeerzeugungsanlage im industriellen Maßstab ganz neu erstellt wurde, ist die Anlage Flingern, ebenfalls 1979, durch Umbau und entsprechende Erweiterung eines vorhandenen Wanderrostkessels älterer Bauart in ein bestehendes kommunales Kraftwerk integriert worden. Mit beiden Anlagen wurde inzwischen ein umfangreiches Versuchsprogramm abgewickelt, das wertvolle Erfahrungen zum Betriebsverhalten, Auslegungsdaten für künftige Anlagen und die Überprüfung zuvor in kleineren Anlagen erhaltener Erkenntnisse erbracht hat. Die mit vereinfachtem Genehmigungsverfahren als Versuchsanlage zugelassene Anlage Flingern wurde nach insgesamt erfolgreichem Abschluß der Versuche 1981 wieder stillgelegt, die Anlage König Ludwig ist noch weiterhin in Betrieb.

Beide Anlagen zeigten ein günstiges Betriebsverhalten und ließen sich in weitem Bereich wechselnder Last anpassen. Durch Variation der Schichttemperatur und -höhe (d.h. der Eintauchtiefe des Wärmetauscherbündels) und Stilllegen einzelner Brennkammersektionen konnte in der Anlage König Ludwig ein Lastbereich von 28 - 100 % abgefahren werden; die Anlage Flingern konnte bis herunter zu 15 % Teillast betrieben werden.

Von besonderem Vorteil erwies sich die hohe Wärmekapazität der Schicht, die im nicht fluidisierten Zustand für ein sehr langsames Abkühlen sorgt. In beiden Anlagen konnte nach mehrstündigem Ab-

schalten (z. B. über Nacht) innerhalb weniger Minuten in einem sog. Warmstart ohne Zuhilfenahme von Fremdenergie (Zündbrenner) der Betrieb wieder aufgenommen werden. Für kleinere Anlagen mit Großraumwasserkessel ergibt sich daher der Ein-Aus-Betrieb als zusätzliche Regelmöglichkeit, in gleicher Weise wie für größere Anlagen das Stilllegen einzelner Sektionen bereits erprobt und bewährt ist.

Es wurden in den beiden Anlagen Kohlen mit Aschegehalten von 3 - 45 % verfeuert, wobei unterschiedliche Einspeisesysteme verwendet wurden. Während in Flingern eine pneumatische Einblasung in die Schicht mit insgesamt 24 Aufgabepunkten erprobt wurde, ist in der Anlage König Ludwig eine Schneckenförderung eingesetzt, bei der die Kohle nicht getrocknet zu werden braucht. Ein Optimum für die Brennstoffaufgabe ist aber noch nicht gefunden und die jeweils günstigste Technik hängt von der Anlagengröße, Brennstoffbeschaffenheit und weiteren Randbedingungen ab, deren Einflüsse z. Z. noch getestet werden.

Weiterhin hat der Betrieb der beiden Anlagen gezeigt, daß die Entschwefelung mit Kalkstein in der WS einwandfrei auch im größeren

Maßstab durchzuführen ist. Allerdings ist hier noch keine Optimierung hinsichtlich Zuschlagsart, -körnung, -aufgabestelle etc. erfolgt. Die erwarteten niedrigen NO_x -Emissionen bestätigten sich ebenfalls bei diesen Feuerungen.

Um bei der AWSF einen befriedigenden Ausbrand der Kohlen zu erzielen, muß die in Umlenkungen der nachgeschalteten Rauchgaszüge und in dem Vorabscheidezyklon anfallende Flugasche in die Feuerung zurückgeführt werden. Gegenwärtige Bemühungen zielen darauf ab, den mit dieser Rückführung verbundenen apparativen Aufwand zu verringern, bzw. durch entsprechende Einbauten oder feuerungstechnische Maßnahmen den Austrag unverbrannten Flugkokes zu vermindern.

Die ZWSF-Anlage der VAW in Lünen ist erst Mitte 1982 in Betrieb gegangen, so daß es noch zu früh ist, über Betriebsergebnisse zu berichten. Um in ZWSF eine hohe Zirkulationsrate zu erreichen, muß der Brennstoff aber feiner aufgemahlen werden als bei der AWSF. In Lünen soll eine aus der konventionellen Kohlekraftwerkstechnik bekannte Mahltrocknungsanlage eingesetzt werden, die die vorgesehene Ballastkohle (35 - 65 % Asche) auf 50 - 250 μm zerkleinert und trocknet. Die ZWSF -Anlage ist für die Erhitzung einer Salzschnmelze (Prozeßwärme) vorgesehen. Dazu wird das im Rückführzyklon anfallende Schichtmaterial ganz oder teilweise zunächst in einen WS-Kühler geleitet, der als Salzerhitzer dient, dann, auf ca. 400 °C abgekühlt, wieder zurück in den Feuerungsreaktor.

Von den in USA errichteten WSF-Anlagen dürfte das Heizkraftwerk der Georgetown Universität in Washington D.C. die bekannteste sein. Diese Anlage, deren Dampfleistung 45 t/h beträgt (17) und die im Jahre 1979 in Betrieb ging, ist mit einer atmosphärischen, stationären WSF ausgestattet; anders als bei den Anlagen der Ruhrkohle AG, wird aber ausschließlich Vollwert-Nußkohle eingesetzt, die von oben auf die Schicht geworfen wird. Diese viel einfachere Brennstoffzuteilungstechnik muß aber mit ungünstigerem Ausbrand bzw. wesentlich höherer Flugstaubrückführungsrate und hohem Kalksteinbedarf für eine ausreichende Entschwefelung erkauft werden. Da aber Nußkohlen dieser Qualität in der Bundesrepublik Deutschland nur in unzureichender Menge zur Verfügung stehen, scheint diese Variante für uns auch nur von begrenzter Bedeutung.

Ähnliches gilt für die in England entwickelte sog. "shallow-bed"-Technik, bei der auf einer fluidisierten Sandschicht von ca. 15 - 25 cm Höhe stückige aschearme Kohlen verbrannt werden. Um in einer shallow-bed-WSF eine wirksame Entschwefelung zu erzielen, sind wesentlich höhere Kalksteinmengen erforderlich als bei den

bei uns oder auch in USA favorisierten WSF mit 1 - 1,5 m Schichthöhe. Da die in England geförderten Kohlen andere rohstoffliche Eigenschaften haben und auch die Absatzstruktur des britischen Kohlemarkts von der in der Bundesrepublik deutlich abweicht, ist dort Nußkohle in viel größerer Menge als bei uns verfügbar. Da weiterhin dort nicht entschwefelt zu werden braucht, bieten sich die "shallow-bed"-WSF in England, besonders für kleinere Anlagen, als einfache zuverlässige Feuerungen an, die aber bei uns nur vereinzelt einsetzbar sein dürften.

Aufgrund der mit diesen Versuchsanlagen gemachten Erfahrungen sind größere bzw. fortgeschrittene Demonstrationsanlagen zur Strom- und Wärmezeugung mit Wirbelschichtfeuerungen im Bau oder in Planung. Druckbetriebene Wirbelschichtversuchsanlagen gibt es bisher bei uns noch nicht. Allerdings ist die Bundesrepublik Deutschland zu einem Drittel an der im Rahmen der IEA in Grimethorpe, England, errichteten und betriebenen DWSF-Großversuchsanlage beteiligt. Diese Anlage, an der vor allem der DWSF-Dampferzeugerbetrieb studiert werden soll, ist jedoch noch in stetiger Weiterentwicklung begriffen, so daß noch kein endgültiges Konzept vorliegt.

3. Emissionsaspekte

Bei der Verbrennung von Kohle mit dem Sauerstoff der Luft entstehen, unabhängig vom gewählten Feuerungssystem, in geringem Maße Nebenprodukte, die teilweise in die Umwelt emittiert werden. Im Gegensatz zum gewöhnlich einfachen technischen Aufbau einer Feuerung ist jedoch die Verbrennung selbst ein äußerst komplexer Vorgang mit vielen beteiligten chemischen Reaktionen, die oftmals durch geringfügige Änderungen am Feuerungssystem entscheidend in ihrem Ablauf beeinflußt

werden können. Die theoretische Erfassung der Schadstoffbildungsmechanismen ist daher eine besonders schwierige Aufgabe, die auch erst - jedenfalls bei der WSF - ansatzweise gelöst ist. Aus diesem Grunde wird hier nur auf bisher veröffentlichte Meßergebnisse zur Höhe der Schadstoffemissionen Bezug genommen, wobei besonders auf die Randbedingungen in der Bundesrepublik Deutschland eingegangen wird.

3.1. Kohlenmonoxid-Emissionen

Kohlenmonoxid ist ein Produkt unvollständiger Verbrennung, das bei Luftmangel entsteht, oder wenn die Verbrennung bei niedrigen Temperaturen und ungenügender Verweilzeit abläuft. In der WSF können reduzierende Zonen innerhalb der WS bei der Verfeuerung von hochflüchtigen Kohlen oder sehr feinkörnigem Brennstoff und ungenügender Verteilung in der WS auftreten (18). Jedoch wird schon wegen der schädlichen Auswirkungen solcher Bedingungen auf die metallischen Werkstoffe durch konstruktive und betriebliche Maßnahmen der Entstehung von Zonen mit Sauerstoff-Defizit vorgebeugt. Auch bei der Nachverbrennung aus der Schicht ausgetragenen Flugkokes in den kälteren Bereichen der Rauchgaswege entsteht CO, das evtl. nicht mehr bis zum CO₂ ausbrennt (19). Auch diesem Vorgang versucht man dadurch zu begegnen, daß der Gasberuhigungsraum noch auf möglichst hoher Temperatur gehalten und der Austrag an unverbranntem Flugkoks durch niedrige Wirbelgeschwindigkeiten oder auch durch Einbauten etc. gering gehalten wird. Obwohl hier noch nicht alle Möglichkeiten erprobt sind, zeigen die Ergebnisse der Versuchsanlagen, daß die gesetzlichen Auflagen zum Umweltschutz beim Normalbetrieb eingehalten werden können. Beim Kaltstart einer WSF können vorübergehend jedoch höhere CO-Emissionen auftreten; allerdings liegen noch zu wenig Meßwerte vor, um hier über Höhe und Dauer dieser Emissionen genauere Aussagen zu machen.

Der Referentenentwurf der Großfeuerungsanlagenverordnung (6) sieht vor, daß WSF-Anlagen nicht mehr als 250 mg CO/m^3 Abgas emittieren dürfen, wobei das Abgasvolumen auf Normalbedingungen und 5 % Sauerstoffgehalt zu beziehen ist. Der derzeitige Stand der Technik bei WSF dürfte durch den Wertebereich $180 - 250 \text{ mg CO/m}^3$ (bez. auf 5 % O_2) korrekt beschrieben sein.

3.2. Schwefeldioxid-Emissionen

Kohle enthält gewöhnlich organisch wie auch anorganisch gebundenen Schwefel, die beide bei der Verbrennung zu SO_2 (und evtl. zu SO_3) oxidiert werden. Der organisch gebundene Schwefel stammt aus der pflanzlichen Ursubstanz der Kohle und läßt sich dementsprechend auch durch intensive aufbereiterische Maßnahmen nicht vollständig entfernen. Der anorganische Schwefel ist in den Kohlebegleitmineralien enthalten (wichtigstes Mineral: Pyrit), die bei der Kohlenwäsche je nach Verwachsungsgrad mehr oder weniger entfernt werden. Das bei der Verbrennung der Kohle entstehende SO_2 wird in der WSF z.T. an alkalische Bestandteile des Schichtmaterials unter Bildung von (nicht flüchtigem) CaSO_4 gebunden. Um jedoch eine ausreichende Menge an Calcium in der WS zu haben, wird gewöhnlich Kalkstein oder Dolomit dem Brennstoff zugeschlagen, die in der Feuerung zunächst kalziniert werden. Dabei bildet sich das eigentlich SO_2 -bindende Sorbens CaO , das dann mit dem SO_2 unter Sauerstoffaufnahme zu CaSO_4 weiterreagiert.

Es hat sich gezeigt, daß die schwefelbindende Aktivität der Zuschlagsmaterialien von vielen Parametern in verwickelter Weise abhängt, von denen neben Druck, Temperatur und Verweilzeit in der Schicht vor allem Korngröße, Porosität und Festigkeit des Sorbens ausschlaggebend sind (19 - 27). Die erreichte Entschwefelung wird i. a. in Ab-

hängigkeit des molaren Ca/S-Verhältnisses angegeben, bei dem die Calciummenge üblicherweise nur des Zuschlagsmaterials ins Verhältnis zur im Brennstoff enthaltenen Schwefelmenge gesetzt wird. Im praktischen Betrieb ist das Massenverhältnis zwischen Zuschlagsmittel und Kohle einfacher zu handhaben. Für die Umrechnung gilt:

$$\frac{(\text{Ca/S-Verhältnis}) \cdot (\% \text{ S})}{31,25} = \frac{(\text{t Sorbens/CaCO}_3\text{-Gehalt})}{\text{t Einsatzkohle}}$$

d.h. bei einer Kohle mit 1,6 % S benötigt man für ein gewünschtes Ca/S-Verhältnis von 2 einen 10 Gew.-%igen Kalksteinzuschlag pro Tonne Kohle.

Für die Anlage König Ludwig wird an einer Stelle (10) ein Versuch aufgeführt, bei dem bei einer Ballastkohle mit 1,29 % S (wf) unter Zusatz von relativ grobem Kalkstein (ca. 5-10fache Körnung der Austragsgrenze) bei einem Ca/S-Verhältnis von 2 eine Entschwefelung von 76 % erreicht wurde. In anderen Versuchsreihen (12) wurden teilweise auch etwas niedrigere Entschwefelungswerte gefunden. Jedoch ist bei den bisherigen Versuchen noch keine Optimierung der Wahl des Zuschlags erfolgt, da bisher noch betriebliche Belange im Vordergrund der Untersuchungen standen. Durch Auswahl eines aktiveren Kalksteines und Verwendung einer genau angepaßten Körnung läßt sich aber eine noch wirksamere SO₂-Rückhaltung bei gleichem Ca/S-Verhältnis erreichen, wie vor allem in kleineren halbertechnischen oder Laborversuchen gezeigt werden konnte (24 -26). Durch Zusatz von mehr Kalkstein läßt sich zwar i. a. ebenfalls eine weitergehende Entschwefelung erreichen, jedoch fallen dann neben höheren Kalksteinkosten vor allem auch größere Rückstandsmengen an, die entsorgt werden müssen. Aus diesem Grunde ist die möglichst vollständige Kalksteinnutzung anzustreben.

Bei Verwendung von fein aufgemahlenem Kalkstein und Rückführung aus der WS ausgetragenen Materials in die Schicht, wie es z. B. in der ZWSF in verstärktem Maße geschieht, kann eine hohe Kalksteinnutzung erreicht werden. In einer ZWSF-Versuchsanlage wurde bei der Verwendung einer Ballastkohle mit 40,8 % Asche und 1,31 % S bei einem Ca/S-Verhältnis von nur 1,5 ein Entschwefelungsgrad von 85 % erzielt (28). Die mittlere Korngröße des Brennstoff/Kalksteingemisches betrug dabei 237 μm . Für die amerikanische WSF-Anlage Georgetown sind dagegen recht hohe Werte für den Kalksteinbedarf genannt worden (17). Um bei einer Kohle mit ca. 2,1 % S eine Entschwefelung von 86,6 % zu erzielen, mußte ein Ca/S-Verhältnis von 3,75 angewendet werden. Bei der verwendeten Kohle (14,5 % Asche) bedeutet das, daß das Schichtmaterial überwiegend aus Sorbensmaterial besteht. Der Hauptgrund für die weniger wirksame Schwefeleinbindung bei dieser Feuerung dürfte in der Art der Kohleaufgabe liegen. Durch das Aufwerfen von Kohle und Kalkstein von oben auf die Schicht ergibt sich nur eine kurze Verweilzeit für das zunächst entstehende SO_2 im Bereich der WS, in dem die Einbindung stattfindet.

Der neue Entwurf der Großfeuerungsanlagenverordnung (6) sieht vor, daß Feststofffeuerungen mit einer Feuerungswärmeleistung von 50 bis einschließlich 400 MW nicht mehr als $2000 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ (iN) Abgas emittieren dürfen, wobei SO_2 und SO_3 gemeinsam als SO_2 zu rechnen sind und auf 5 % O_2 im Abgas zu beziehen ist. Das bedeutet, daß soweit zu entschwefeln ist, als ob eine Vollwertkohle mit ≤ 1 % S (wf) eingesetzt worden wäre.

Für Anlagen > 400 MW Feuerungswärmeleistung soll die maximal zulässige SO_2 -Emission auf 400 mg/m^3 begrenzt werden. Bei einer Vollwertkohle mit 1,4 % S (wf) würde das eine ca. 85 %ige Entschwefelung erfordern, die durch Kalksteinzuschlag in der WSF zu erreichen ist. Bei ballastreichen Kohlen oder solchen, mit wesentlich höherem Schwefelgehalt könnte diese Auflage aber dazu führen, daß evtl. sehr hohe Sorbenszuschläge erforderlich werden, daher sieht die Verordnung vor, daß die Auflagen als erfüllt gelten, wenn das Massenverhältnis von Brennstoff zu Calcium den Wert 20 erreicht hat.

3.3. Emission von Stickoxiden

Stickoxide treten bei Verbrennungsreaktionen als Nebenreaktion zwischen Luftsauerstoff und Stickstoff auf. Bei rein thermischer Anregung der Stickoxidbildung spricht man von "thermischem NO", das aber bei den niedrigen Temperaturen der WSF nicht auftritt. Dies ist der Grund für die von Hause aus niedrigen Stickoxidemissionen von WSF. Da Stickoxide grundsätzlich in Bereichen hoher lokaler Sauerstoffaktivität entstehen, ist für eine niedrige Emissionsrate eine nahstöchiometrische, genau geführte Verbrennung anzustreben. Dies gilt für die WSF ebenso wie für andere Feuerungstechniken, dementsprechend wird bei steigendem Luftüberschuß auch in der WSF eine Zunahme der NO-Emission beobachtet (10, 12, 19, 21). Die bisherigen Erfahrungen zeigen jedoch, daß bei einem Luftüberschuß entsprechend 5 % O_2 im Abgas und einer Verbrennungstemperatur von 850°C die NO-Emission einer atmosphärischen stationären WSF typisch bei ca. $400 - 500 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3$ Abgas liegt, wobei die Schwankungsbreite je nach Kohle und Betriebsweise bei ca. $250 - 800 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3$ Abgas liegt. Eine Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft führt nochmals zu einer deutlichen Senkung der NO-Emissionen (21, 22, 12, 28), ist aber technisch noch sehr aufwendig und bringt die Gefahr reduzierender Zonen in der WS mit sich. Für die ZWSF scheint die Realisierung dieser

Art der Luftsteuerung einfacher zu sein, dort werden von entsprechenden Versuchen mit einer kleineren Anlage Emissionswerte von ca. $200 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3$ berichtet (28). Welche Werte letztlich im technischen Betrieb zu erreichen sein werden, ist für beide Bauarten noch nicht ausreichend erprobt worden. Auch für die DWSF liegen noch keine typischen Zahlenwerte vor; es kann aber bereits festgestellt werden, daß der Druckbetrieb zu einer Senkung der spez. NO-Emission führen wird (22, 29).

Der Vorentwurf der Großfeuerungsanlagen-VO (6) sieht, in Erweiterung der bestehenden Vorschriften, einen maximal zulässigen Emissionsgrenzwert auch für Stickoxide vor, der für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe mit $800 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3$ Abgas (entsprechend einer Volumkonzentration von 390 vpm) beziffert wird, wobei für WSF wieder auf 5 % O_2 im Abgas zu beziehen ist. Nach den vorliegenden Erfahrungen konnte dieser Wert bisher beim Betrieb von WSF eingehalten werden.

Bild 3 zeigt in einer Übersicht die Wirkung verschiedener Einflußparameter auf die spezifischen Emissionen, wobei je nach Steilheit und Form des Pfeils die Größe und der Verlauf der Auswirkung einer

Parameter Bereich (Standard)	MW m^2	%C- Verlust	mgCO $\text{m}^3(\text{N})$	mgSO ₂ $\text{m}^3(\text{N})$	mgNO ₂ $\text{m}^3(\text{N})$
Druck 1 - 4,5 bar (1,1 bar)	↗	↘	↘	↘	↘
Temperatur 750 - 950°C (850°C)	→	↘	↘	↘	↗
Luftüberschuß 0,5 - 12% O_2 Abgas (5%)	↘	↘	→	→	↗
Anströmgeschwindigkeit 0,3 - 15 m/sec (1 m/sec)	↗	↗	→	↗	↘
Schichthöhe (fluidisiert) 0,2 - 1,2 m (0,8 m)	→	↘	↘	↘	→
Sekundärluft 0 - 66 % (0)	→	↘	↘	↘	↘
Ca/S 0 - 3 mol/mol (1)	→	→	→	↘	→
Korngröße Kohle 0 - 2 mm (0,1 mm)	→	↘	↘	→	→
Korngröße Kalkstein 0 - 2 mm (0-0,1 mm)	→	→	→	↘	→

Bild 3: Einfluß verschiedener Betriebsparameter auf die Höhe der Emissionen. Die Konzentrationen sind jeweils auf 5 % O_2 im Abgas bezogen.

Änderung des zugehörigen Parameters qualitativ dargestellt ist (19).
Man erkennt die teilweise gegenläufigen Auswirkungen bestimmter
Parameteränderungen .

3.4. Halogenwasserstoff-Emissionen

Steinkohle enthält Halogen lediglich in der Mineralsubstanz. Fluor ist im wesentlichen strukturell in die Minerale eingebunden, Chlor liegt z.T. als Natriumchlorid vor, das adsorptiv an die Tonminerale und die Kohlesubstanz gebunden ist. Brom und Jod kommen in Kohlen praktisch nicht vor. Für die WSF ist von Bedeutung, daß auch Kalkstein und Dolomit i. a. geringe Mengen an Chlor und Fluor enthalten.

Beim Erhitzen auf 800 - 900 °C wird adsorptiv gebundenes Chlorid vollständig freigesetzt, strukturell gebundene Halogene jedoch offensichtlich nur z.T. abgegeben (30, 21). Die Gegenwart von Wasserdampf (als Verbrennungsprodukt und aus Brennstoffeuchte) führt zu einer Pyrohydrolyse unter Bildung von flüchtigem Halogenwasserstoff. Durch Einflüsse verschiedener Art kommt es jedoch zur partiellen Wiederbindung der Halogenwasserstoffverbindungen, z.T. bereits in der Feuerung, besonders aber an das unverbrauchte, ausgetragene CaO in den kälteren Teilen des Rauchgaskanals.

Das tatsächliche Ausmaß der Rückhaltung ist jedoch nicht allgemein angebar und selbst die Einflußparameter sind noch nicht alle bekannt. Erste Einzelmessungen (11, 19, 32, 33) bestätigen allerdings, daß von dem in den Einsatzstoffen enthaltenen Chlor und Fluor bereits ohne zusätzliche Maßnahmen nur ein Teil emittiert wird.

Im Referentenentwurf für die Großfeuerungsanlagen-VO (6) ist vorgesehen, für die Verfeuerung von festen Brennstoffen jetzt auch Grenzwerte für die Halogenwasserstoffemissionen festzulegen. Und zwar sollen

bei Anlagen bis zu 400 MW (th) höchstens 200 mg HCl und 30 mg HF je Kubikmeter Abgas (5% O₂-Gehalt) zugelassen werden, bei größeren Anlagen soll nur jeweils die halbe Konzentration als Grenzwert festgelegt werden. Unter der Annahme, daß die Gesamtmenge an Halogen als Halogenwasserstoff emittiert würde, wäre durch die vorgeschlagene Regelung eine Obergrenze für den zulässigen Chlorgehalt der eingesetzten Kohlen von 0,2 % und beim Fluorgehalt von 330 ppm für kleine Anlagen ohne Rückhaltemaßnahmen festgeschrieben. Für größere Anlagen würden dementsprechend die halben Werte gelten. Bei den in Deutschland verfeuerten Vollwertkohlen liegen die Gehalte an F und Cl i. a. niedriger als 300 ppm bzw. 0,2 %. Bei Ballastkohlen können jedoch höhere Werte auftreten, hier wäre im Einzelfall zu prüfen, wie hoch die tatsächliche Emission bei der Verfeuerung in einer WSF-Anlage ist. Wenn sich aber die ersten Erfahrungen bestätigen und verallgemeinern lassen, dürften die zulässigen Werte bei der WSF i. a. ohne zusätzliche Maßnahmen einzuhalten sein. Für eine endgültige Aussage reichen die heute verfügbaren Kenntnisse jedoch noch nicht aus.

3.5. Polyaromatische Verbindungen

Polyaromatische Verbindungen - häufig verkürzt PAH (polynuclear aromatic hydrocarbons) genannt - sind Pyrolyseprodukte, die unvollständig verbrannt sind. Da einige dieser Verbindungen carcinogene Eigenschaften haben, kommt ihrer Entstehung und Verbreitung besonderes Interesse zu.

Die Analytik polyaromatischer Verbindungen ist außerordentlich schwierig, einmal weil es eine sehr große Zahl solcher Verbindungen gibt, die gemeinsam auftreten, aber recht unterschiedlich in ihrer Wirkung sind; zum anderen, weil diese Verbindungen in äußerst geringer Konzentration vorliegen und es bereits bei der Probenahme und Voranreicherung leicht zu Verfälschungen kommen kann. Die bisher

vorliegenden Meßergebnisse bzgl. organischer Substanzen im Abgas von WSF stammen ausnahmslos aus USA (34-37). Da die Emissionen aber von der Art der Kohle, der WSF-Konstruktion und den Betriebsbedingungen der Feuerung abhängen, lassen sich die Ergebnisse nicht dem Zahlenwert nach, sondern lediglich dem Trend entsprechend auf deutsche Verhältnisse anwenden. Danach kann festgestellt werden:

- Polyaromatische Verbindungen werden aus WSF keinesfalls in größerer Menge emittiert als aus großen kohlenstaubgefeuerten Anlagen. Die Emissionshöhe liegt bei $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Summe PAH)
- Mehr als 90 % der emittierten org. Substanz liegt in der Gasphase vor, der Rest ist auf Staub kondensiert
- Bio-assays ergaben keine mutagene Wirkung bei den als Gase emittierten Substanzen, schwach mutagene Wirkung bei den an Stäube adsorbierten Verbindungen aber keinerlei carcinogene Wirkungen
- Im Anfahrbetrieb sind die Emissionen höher als im Normalbetrieb, aber immer noch sehr niedrig

Die TA-Luft wie auch der Entwurf der Großfeuerungsanlagen-VO machen keine expliziten Angaben zu einer Emissionsbegrenzung für organische Substanzen. Jedoch ist für CO-Emissionen ein Höchstwert festgelegt, der eine Kontrolle der unvollständigen Verbrennung ermöglicht. Indirekt wird dadurch auch die Emission polyaromatischer Verbindungen so niedrig wie möglich gehalten.

3.6. Staubförmige Emissionen

Die Emission staubförmiger Partikel aus WSF-Anlagen ist nicht prinzipiell anders als die aus konventionellen Anlagen. Die Stäube selbst unterscheiden sich von denen anderer Kohlenfeuerungen aber sowohl hinsichtlich ihrer Zusammensetzung infolge des Sorbenszuschlages als auch morphologisch, da sie nicht glasig verschmolzen sind (38). Inwieweit diese anderen Eigenschaften sich günstig oder

ungünstig auswirken, ist noch nicht geklärt. Im Tierversuch erwiesen sich die lungengängigen Staubfraktionen aus WSF-Abgasen als unbedenklich und verhielten sich inert (36).

Der Entwurf der neuen Großfeuerungsanlagen-VO sieht als oberen Grenzwert für die staubförmigen Emissionen unabhängig von der Anlagengröße 50 mg/m^3 Abgas vor (wiederum bezogen auf 5 % O_2). Da die üblicherweise starke Entschwefelung der Rauchgase von WSF eine Erhöhung des elektrischen Staubwiderstandes mit sich bringt, eignen sich konventionelle Elektroentstauber weniger gut für derartige Rauchgase. Durch den Einsatz von Gewebefiltern oder Hochtemperatur-elektroentstauber, die beide eine gute Abscheidewirksamkeit auch für Feinstäube haben, lassen sich die geforderten Reingasreststaubgehalte jedoch zuverlässig einhalten.

Aus der Untersuchung konventioneller Kraftwerksstäube ist bekannt, daß im Reingasstaub einige flüchtige Spurenelemente der Kohle, zu denen auch potentiell schädliche Schwermetalle gehören, angereichert sind. Für die WSF sind derartige systematische Untersuchungen noch nicht im breiten Rahmen durchgeführt worden. Ersten amerikanischen Untersuchungen (36) zufolge ist die Verteilung der Spurenelemente in den Stäuben von WSF-Anlagen aber nicht grundsätzlich anders als bei konventionellen Feuerungen, jedoch scheint die Höhe der Anreicherung im Flugstaub geringer zu sein. Untersuchungen an in Deutschland verfeuerten Kohlen lassen ähnliche Schlüsse zu (38, 39). Auch bei Mutagenitätstests (36) wurden keine signifikanten Unterschiede zu anderen Kraftwerksstäuben gefunden.

3.7. Rückstände

Die bei der Verbrennung von Kohle in WSF-Anlagen verbleibenden Rückstände bestehen aus der Kohlenasche, vermischt mit den

Reaktionsprodukten des Sorbensmaterials (Kalkstein oder Dolomit) und unverbranntem Flugkoks. Die Rückstände fallen einmal als überschüssiges WS-Material an und sind dann in Zusammensetzung und Körnung mit dem Schichtmaterial gleich, zum anderen in feinkörniger Form als Flugasche in den Umlenkungen der Rauchgaswege und im Zyklon, sowie in mehlfeiner Körnung als Flugstaub im Filter. Die jeweiligen Mengenverhältnisse hängen sehr stark von den Eigenschaften der Einsatzmaterialien sowie von der Konstruktion und Betriebsweise der WSF ab und können daher beträchtlich schwanken.

Zur Entsorgung der Rückstände bieten sich die Weiterverwendung und die Deponie an; zu beiden Alternativen liegen allerdings erst ansatzweise Erfahrungen vor. Der Einsatz von WSF-Rückständen in der Bauindustrie liegt besonders wegen des Gehaltes an Branntkalk nahe, allerdings stört in diesem Bereich häufig der relativ hohe Kohlenstoff- und Sulfatgehalt der WSF-Produkte, so daß diese voraussichtlich verschnitten werden müssen. Bei der Verbrennung von Kohlenaufbereitungsabgängen sieht die Situation wegen des sehr hohen Aschegehaltes des Brennstoffes und damit der günstigeren Relation von Asche zu Sulfat besonders vielversprechend aus (40, 41). Andere Verwendungsmöglichkeiten sind erst sporadisch erprobt worden.

Unabhängig von den Möglichkeiten einer evtl. Weiterverwendung wird wohl in jedem Falle auch ein Teil der WSF-Rückstände deponiert werden müssen. Insbesondere in USA sind zur Auslaugung von Schadstoffen aus WSF-Rückständen Untersuchungen angelaufen (42, 43). Die ersten Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen, daß die meisten Schwermetalle und andere Spurenelemente infolge des basischen Charakters der WSF-Materialien nur in sehr geringem Maße ausgelaugt werden und z. B. dadurch eine Gefährdung des Trinkwassers nicht besteht. Es hat sich weiter gezeigt, daß die Rückstände sich leicht verdichten lassen und

auf diese Weise die Wasserdurchlässigkeit einer Deponie um mehrere Zehnerpotenzen verringert werden kann. Allerdings fehlen für die Bundesrepublik Deutschland entsprechende Untersuchungen; eine Behandlung als Sondermüll wird aber auch bei uns nicht gefordert.

4. Mittelfristige Einsatzmöglichkeiten und realisierbare Konzepte der Wirbelschichtfeuerung

Grundsätzlich kann man 4 Bereiche unterscheiden, in denen WSF-Anlagen in entsprechend angepaßter Form eingesetzt werden können. In der Entwicklung am weitesten und somit als erste im kommerziellen Einsatz sind:

- mittelgroße Anlagen (ca. 100 - 500 GJ/h $\hat{=}$ 28-139 MW_{th} Feuerungsleistung) für den Betrieb in Wärmezentralen, Heizkraftwerken, Kraftwerken, industriellen Dampfzentralen oder Prozeßwärmeanlagen und
- kleinere Anlagen (< 100 GJ/h $\hat{=}$ 28 MW_{th} Feuerungsleistung) zur Dampferzeugung in Kleinindustrie und Gewerbe, zur Wärmeerzeugung für Verwaltungsgebäude, Nahwärmesysteme, Kleinheiz(-kraft-)zentralen etc.

Zu einem späteren Zeitpunkt werden auch

- Großkraftwerke (> 500 GJ/h $\hat{=}$ 138 MW_{th} Feuerungsleistung), die voraussichtlich modular aufgebaut sein werden, einsatzbereit sein.

Sonderfälle werden die

- Verbrennungsanlagen für Rückstände

bleiben, bei denen die Beseitigung oder Konditionierung von minderwertigen Brennstoffen neben der Nutzung des Energieinhaltes eine

wesentliche Rolle spielt.

Durch den Betrieb der bisher errichteten Versuchsanlagen, insbesondere der Anlagen König Ludwig und Flingern, konnte gezeigt werden, daß sich Wirbelschichtfeuerungen technisch vernünftig realisieren lassen, ein gutbeherrschbares Betriebsverhalten aufweisen und eine niedrige Schadstoffemission ohne, bzw. mit nur geringem zusätzlichem Aufwand zu erreichen ist (9-13). Es fehlt jedoch noch eine Optimierung dieser Technik einmal in apparatetechnischer Hinsicht, aber auch in bezug auf die betrieblichen Belange. Aufgrund der Tatsache, daß über sehr lange Zeit in der Bundesrepublik Deutschland keine kleinen Kohlenfeuerungen mehr gebaut worden sind und entsprechendes know how im Kohlehandling teilweise neu erlernt werden mußte, bzw. entsprechende Apparate für die hier benötigten geringen Durchsätze nicht verfügbar waren, bietet der gegenwärtige Stand der WSF-Technik noch ein beachtliches Rationalisierungspotential. Die Handhabung der Feststoffe (Kohle, Kalkstein, Rückstände) muß noch erheblich vereinfacht werden und die Baugrößen von Feuerungen und Peripheriegeräten müssen standardisiert und damit verbilligt werden, um dieser Technik zum Durchbruch zu verhelfen. Die noch fehlenden Langzeiterfahrungen und der noch unzureichende Automatisierungsgrad der Anlagen sind ebenfalls noch Hindernisse bei der z. Z. anlaufenden Markteinführung. Kostenvorteile der WSF, die sich durch die Möglichkeit billige Brennstoffe auch wechselnder Qualität einzusetzen und durch den Wegfall zusätzlicher Umweltschutzmaßnahmen ergeben, werden durch die oben erwähnten noch bestehenden Unzulänglichkeiten aufgewogen. Hinzu kommt, daß auch der Ausbrand von WSF-Anlagen noch nicht immer die Werte konventioneller Feuerungen erreicht.

Daher ist es notwendig, um die Einführung der WSF zu beschleunigen bzw. ihren Einsatzbereich zu erweitern, daß außer weiteren intensiven Grundlagenuntersuchungen der Einflußgrößen der Schadstoffbildung und -rückhaltung sowie der Verbesserung der Verbrennung zusätzlich die apparativen Komponenten insbesondere auch der kleineren WSF-Anlagen weiterentwickelt und z. T. ganz neu konstruiert werden. Betreiber und Hersteller werden ihrerseits durch Sammeln von Langzeiterfahrungen, Vereinfachung des Betriebsablaufes, Optimierung der Betriebszustände und Standardisierung von Baureihen zu Verbesserungen und Kostensenkungen beitragen.

Erste kleine und mittlere Anlagen in atmosphärisch stationärer Betriebsweise sowie mit zirkulierender Wirbelschicht werden bereits unter kommerziellen Bedingungen errichtet bzw. betrieben (12, 13). Für atmosphärische Großanlagen liegen bisher allerdings erst Ingenieurstudien vor (44-48). Die größte bisher in Auftrag gegebene Anlage stellt das Heizkraftwerk der Stadtwerke Duisburg (5, 28, 33) dar, das mit einer ZWSF ausgerüstet werden soll.

Die DWSF hat vor allem noch mit dem ungelösten Problem der Heißgasreinigung zu kämpfen. Der Druckbetrieb lohnt sich nur, wenn durch Entspannung der Rauchgase mindestens die aufzuwendende Verdichtungsarbeit wiedergewonnen werden kann. Da für die Entstaubung des heißen, unter Druck stehenden Rauchgases bis auf Turbinenreinheit bisher noch kein großtechnisch realisierbares Verfahren zur Verfügung steht und auch die Fragen des dynamischen Zusammenspiels von Gasturbine und DWSF sowie von Verschmutzung, Erosion und Korrosion von Gasturbinen beim Betrieb mit DWSF-Abgasen noch völlig offen sind (49, 50),

ist mit dem kommerziellen Betrieb eines Gas-/Dampfturbinen-Kombikraftwerks mit DWSF nicht mehr in diesem Jahrzehnt zu rechnen. Allerdings könnte in der kürzlich begonnen Entwicklung eines DWSF-Prozesses mit Abgasturbolader (51, 52) ein erster erfolgversprechender Ansatz in dieser Richtung eingeleitet worden sein.

5. Zusammenfassung

Die Wirbelschichttechnik bietet für Hochleistungsfeuerungen eine Reihe von bedeutenden Vorteilen, besonders die niedrige Schadstofffreisetzung und Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen der Brennstoffqualität. In ersten Anlagen hat die WSF-Technik ihren Eignungstest erfolgreich bestanden. Es haben sich aber auch Bereiche gezeigt, die auch in Zukunft gezielt weiterentwickelt werden müssen. Es sind dies vor allem der Ausbrand, das Feststoffhandling und das Teillastverhalten.

Verschiedene Bauweisen von WSF wurden erprobt, deren spezifische Vorteile z. T. in bestimmten Anlagengrößenbereichen, z. T. bei bestimmten Brennstoffkörnungen zum Tragen kommen. Einige der im Ausland propagierten Varianten können in der Bundesrepublik Deutschland aus rohstofflichen und umweltpolitischen Gründen nur in Sonderfällen eingesetzt werden.

Die bisherigen Erkenntnisse zum Emissionsverhalten von WSF sind bisher unvollständig und bedürfen weiterer Ergänzung durch intensive Forschung. Jedoch kann festgestellt werden, daß bereits mit dem jetzt Erreichten die Anforderungen des Umweltschutzes erfüllt werden können, z. T. ohne besonderen zusätzlichen Aufwand.

Das Einsatzpotential der WSF ist besonders für mittlere und kleinere Feuerungsanlagen wegen des breiten Brennstoffspektrums und der hohen Umweltfreundlichkeit sehr groß. Es muß jedoch noch eine weitere Vereinfachung und Standardisierung der Anlagen und des Betriebsablaufes erreicht werden, wozu die Neu- oder Weiterentwicklung von Anlagenkomponenten erforderlich ist. Für Großanlagen und Kombianlagen mit DWSF sind auch weiterhin umfangreiche ingenieurwissenschaftliche Arbeiten erforderlich. Besonders für die zuletzt genannte Variante wird in diesem Jahrzehnt noch nicht mit dem großtechnisch-kommerziellen Einsatz zu rechnen sein.

Literaturverzeichnis

1. H.-D. Schilling: Glückauf 114 (1978) 142
2. H.-D. Schilling: Chem. Ing. Techn. 51 (1979) 184
3. H.-D. Schilling et al.: Erdöl u. Kohle 34 (1981) 386
4. W. Peters u. H.-D. Schilling: Energy Exploration & Exploitation 1 (1982) 111
5. Rhein. Post v. 29.10.1982
Westd. Allgem. Zeitung, Ausgabe Duisburg v. 29.10.1982
6. Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungsanlagen) 13. BImSchV Referentenentwurf, Stand 24. Sept. 1982
7. V. Asche: VDI-Ber. 322 (1978) 7
8. H.K. Petzel: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S. 357
9. H.G. Krischke: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S. 395
10. H.G. Krischke, J. Langhoff: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2.11.1981
11. H.G. Krischke, J. Langhoff: VGB-Kraftwerkstechn. 62(1982) 119
12. W. Voß: Fachkongreß "Kohle konkret", Düsseldorf, 17./18. März 1982
13. P. Steller: Fachkongreß "Kohle konkret", Düsseldorf, 17./18. März 1982
14. V. Petersen et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.2, S.212, US Dept. of Energy, CONF-800 428
15. L. Plaß et al.: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2. Nov. 1981

16. G. Wargalla: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S.456
17. R.L. Gamble: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.2, S.307, US Dept. of Energy, CONF-800 428
18. W. Poersch et al.: Brennstoff-Wärme-Kraft 31 (1979) 18-25
19. H. Münzner, H.-D. Schilling: VDI-Ber. 423 (1981) 195
20. H. Münzner: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2. Nov. 1981
21. H. Münzner, VDI-Ber. 286 (1977) 97
22. B. Bonn, H. Münzner: VDI-Ber. 322 (1978) 103
23. M. Hartmann, R.W. Coughlin: AIChE-J. 22 (1976) 490
24. B. Bonn, H. Münzner: Fluidised Combustion: Systems and Applications, Paper V 3, 3.-5. Nov. 1980, London, Inst. of Energy Symp. Series No. 4
25. J. Shearer et al.: Proc. 5th Int'l Conf. Fluidized Bed Combustion, Vol.II, S.776, US Dept. of Energy, Mitre Corp. M 78-68
26. H. Münzner: VDI-Ber. 346 (1979) 319
27. R.C. Hoke et al.: EPA-Report 600/7-78-069
28. W. Wein et al.: Fachkonferenz "Coal Technology Europe 81", 9.-12. Juni 1981, Köln, Berichtsband, Vol. 1, S.211
29. F.J. Pereira et al.: Fluidised Combustion: Systems and Applications, Paper V 4, 3.-5. Nov. 1980, London, Inst. of Energy Symp. Ser. No. 4
30. R. Beising, H. Kirsch: VGB-Kraftwerkstechn. 54 (1974) 268
31. H. Kirsch et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 61 (1981) 482
32. A. Raschka: Fachkongreß "Kohle konkret", Düsseldorf, 17./18. März 1982
33. W. Wein: VGB-Kraftwerkstechn. 62 (1982) 185

34. I. Johnson et al.: Argonne Nat'l Lab. Ann. Report Oct.1979-Sept. 1980, ANL/CEN/FE-80-21
35. C.H. Hobbs et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.III, S.1274, US Dept. of Energy, CONF-800 428
36. C.H. Hobbs, R.L. Carpenter: Inhalation Toxicology Res. Inst., Status Rep. for US Dept. of Energy, Albuquerque, July 1980, LMF-83
37. P.F. Fennelly: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol. III, S. 1236, US Dept. of Energy, CONF- 800 428
38. H. Kirsch et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 61 (1981) 482
39. K. Kautz et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 55 (1975) 672
40. D. Leininger, Th. Schieder: Forschungsbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaften EUR-5960 DE (1978)
41. D. Leininger, Th. Schieder: Glückauf-Forsch. H.41(1980)1
42. C.C. Sun, C.H. Peterson: Proc. 6th Int'l Conf. Fluidized Bed Comb., Vol.III, S.900, US Dept. of Energy, CONF-800 428
43. T.W. Grimshaw et al.: ibid. S. 925
44. K.A. Reed, G.G. Cervenka: Proc. 5th Int'l Conf. Fluidized Bed Comb., Vol.II, S.285, US Dept. of Energy, Mitre Corp. M 78-68
45. P.F. Lipari, T.G. Well, Jr.: ibid. S. 313
46. R.B. Covell: ibid. S. 326
47. W.J. Bradley: ibid. S. 343
48. D.N. Garner et al.: ibid. S. 355
49. DOE/EPRI, PFBC Workshop, Jan. 17-20,1982, N. Orleans, La., Panel D Report
50. B.Bonn: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8.Okt.1980, Jülich, S. 527
51. P. Wengefeld, E. Wied: VDI-Ber. 431 (1981) 111
52. VGB-Kraftwerkstechnik 62 (1982) 816

1. Einleitung

Die Wirbelschichtfeuerung ist in den letzten Jahren wegen ihrer vorteilhaften Eigenschaften, unter denen besonders die niedrigen Schadstoffemissionen, der kompakte Bau und die Unempfindlichkeit gegen Brennstoffqualitätsschwankungen hervorzuheben sind, in besonderem Maße in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Es ist zu erwarten, daß diese Technik für den zukünftig verstärkten Einsatz von Kohle eine herausragende Rolle spielen wird, da sie es gestattet, auch kleinere und mittelgroße Anlagen bei hoher Umweltfreundlichkeit zu betreiben, ohne daß dadurch unwirtschaftlich hohe Kosten entstehen. In den folgenden Ausführungen wird der Stand der Technik der Wirbelschichtfeuerung sowie der bisherige Kenntnisstand der Emissionsaspekte aufgezeigt.

Da die Emissionen einer Feuerstätte nicht nur von den verwendeten Einsatzstoffen, sondern auch in hohem Maße von den konstruktiven und betrieblichen Parametern abhängen, sollen nach einer kurzen, generellen Erörterung der WSF-Technik, zunächst die bisher realisierten Konzepte beschrieben, danach die Emissionen behandelt und schließlich ein Ausblick auf die realistisch zu erwartende technische Weiterentwicklung gegeben werden.

Im Bild 1 ist schematisch ein Dampfkessel mit Wirbelschichtfeuerung wiedergegeben. Die Verbrennungsluft wird durch einen Luftkasten und einen Anströmboden, der die Wirbelschicht trägt und der für eine gleichmäßige Luftverteilung sorgt, in eine Feststoffschüttung eingeblasen, die dadurch fluidisiert wird. Brennstoff und Zuschlagsmaterial werden direkt in die Wirbelschicht dosiert, in der die Verbrennung bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen abläuft.

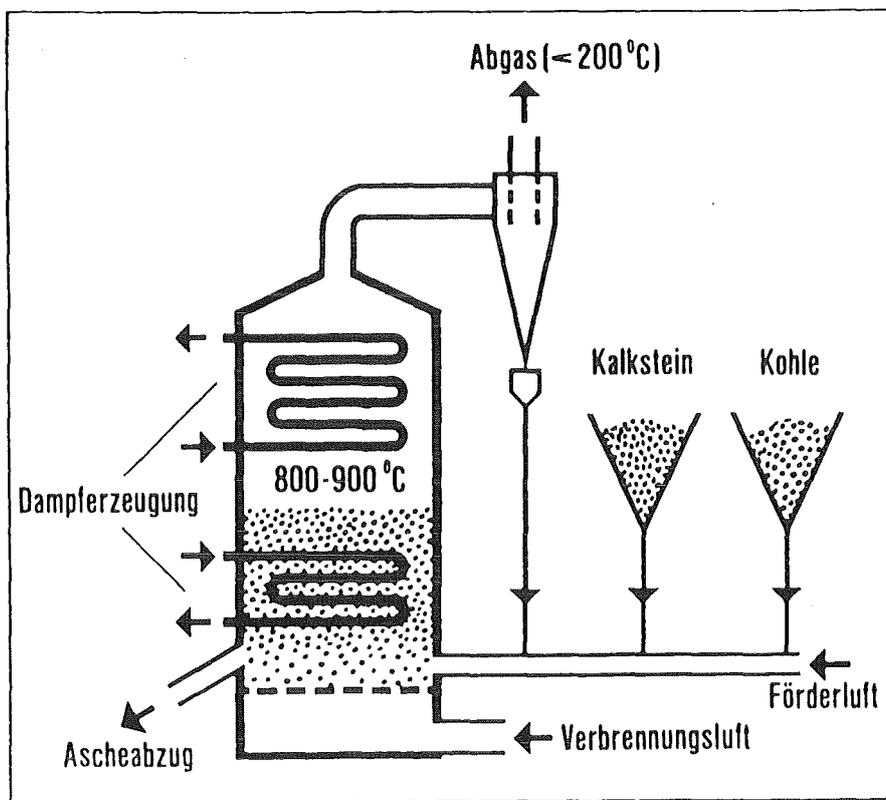


Bild 1: Schema eines Dampfkessels mit Wirbelschichtfeuerung

Zur Temperaturhaltung der Schicht wird üblicherweise ein Wärmetauscher, z.B. ein Verdampferbündel, in die WS eingebaut, die fühlbare Wärme des Rauchgases wird über nachgeschaltete konvektive Heizflächen abgeführt. Die Verbrennungsrückstände werden z. T. mit dem Rauchgas aus der Brennkammer ausgetragen und können, z.B. wenn sie noch größere Anteile unverbrannten Kohlenstoff enthalten, zurückgeführt werden. Überschüssiges Schichtmaterial wird durch eine Ascheabzugsvorrichtung direkt aus der Brennkammer entfernt. Um die Brennkammer mit Sicherheit bei Feuerungsbedingungen, d. h. Luftüberschuß, zu betreiben, darf der Kohlenstoffgehalt der WS nicht zu groß sein, je nach eingestelltem Luftüberschuß und je nach Abbrenngeschwindigkeit der

Kohle beträgt er üblicherweise nur einige Zehntel bis einige Prozent, der Rest ist Inertmaterial. Die Verbrennung in einer WSF wird durch Zündbrenner initiiert, die das zunächst brennstofffreie, inerte Schichtmaterial auf eine Temperatur oberhalb der Zündtemperatur des Brennstoffes vorwärmen. Durch die nachfolgende Eindosierung des Brennstoffes wird dann die stationäre Betriebstemperatur der WS eingestellt.

Im Gegensatz zur Rostfeuerung ergibt sich bei der WSF durch die intensive Feststoffbewegung eine völlig homogene Temperaturverteilung über die ganze Schicht, ohne die Gefahr der Bildung heißer Nester und weiterhin ein wesentlich besserer Wärmeübergang, so daß durch den eintauchenden Wärmetauscher bereits ein großer Teil der erzeugten Wärme aus der Brennkammer abgeführt werden kann. Verglichen zur Staubfeuerung ergibt sich ein wesentlich kleineres Feuerraumvolumen. Die aufgeheizte WS stellt darüber hinaus auch bei schwierigen Brennstoffen die Zündung sicher, so daß Stabilitätsprobleme wegfallen und die Feuerungsüberwachung stark vereinfacht wird. Die niedrige Verbrennungstemperatur bewirkt, daß kein thermisches Stickoxid entstehen kann.

Es war schon erwähnt worden, daß im Gegensatz zur Kohlevergasung in der WS bei der Verbrennung das Schichtmaterial nur einen geringen Anteil an Kohlenstoff enthält. Die durch einen WS-Apparat durchsetzbare Luftmenge wird durch die Forderung nach guter Fluidisierung des Feststoffes, ohne exzessiven Feinstgutaustrag bestimmt. Angesichts der Tatsache, daß beim Einsatz von Kohle das Feststoffkorn im Laufe der Zeit kleiner wird (im Gegensatz etwa zu Katalysatorkörnern), hat man bei WSF-Anlagen immer ein Kornspektrum vorliegen, das vom durch das Aufgabematerial

bestimmten Maximalkorn bis zur durch die pneumatische Austragung festgelegten Minimalkorn reicht. Um Entmischungen (Segregation) und damit ungleichmäßige Fluidisierung zu vermeiden, darf das Kornspektrum nicht zu breit gewählt werden. Daraus ergibt sich, daß beim Einsatz grobstückiger Kohle, die keinen oder nur wenig Staub enthält i. a. eine höhere Wirbelgeschwindigkeit gewählt werden kann, als beim Einsatz von Kohlenstaub oder anderen staubförmigen Brennstoffen. Für die Auslegung einer WSF wird man hier die Eigenschaften der vorgesehenen Einsatzkohle berücksichtigen, insbesondere das Körnungsband und die Brenngeschwindigkeit (Reaktionsfähigkeit). Für gewaschene Ruhrgebietsfeinkohle mit ca. 25 - 30 % < 0,5 mm Feinstanteil wird man für eine stationäre WSF eine Wirbelgeschwindigkeit von z. B. 1,5 m/s wählen. Die Austragungsgrenze liegt dann bei ca. 0,2 - 0,3 mm und die obere Grenze des Körnungsbandes sollte nicht höher als ca. 6 mm gewählt werden. Das erfordert i. a. eine Nachzerkleinerung der angelieferten Kohle, die in der Zeche i. a. bei 10 mm abgesiebt wird.

Bei der gewählten Wirbelgeschwindigkeit erreicht man bei einer Schichthöhe von ca. 1 m (im gewirbelten Zustand) eine Gasverweilzeit von knapp 1 s, die ausreicht, um den Sauerstoff vollständig (oder im gewünschten Maße) umzusetzen. Auch für den allerfeinsten Brennstoffstaub wird diese Verweilzeit für einen befriedigenden Ausbrand ausreichen. Brennstoffpartikel im Korngrößenbereich von ca. 30 μ m bis zur Austragungsgrenze haben aber eine zu geringe Verweilzeit in der heißen Brennkammer um ausreichend zu verbrennen; sie müssen daher i. a. einer Nachverbrennung zugeführt werden. Diese kann entweder in einer separaten Kammer oder Sektion erfolgen, oder durch Rückführung in die Schicht eingeleitet werden.

Da der mit der Wirbelluft angebotene Sauerstoff in der WS aufgebraucht wird, bestimmt die Luftgeschwindigkeit den erzielbaren Wärmeumsatz. Bei der oben erwähnten Wirbelgeschwindigkeit von ca. 1,5 m/s ergibt sich daraus für atmosphärische Anlagen eine praktisch erreichbare Flächenbelastung von ca. 1,2 MW/m². Wie Bild 2 zeigt, ist dieser Wert unabhängig von der Körnung der Einsatzkohle. Auch in Großversuchsanlagen ist dieser Wert gefunden worden. Er ist von gleicher Größe wie die Flächenbelastung bei einer Rostfeuerung, dort muß aber stückige Kohle eingesetzt werden.

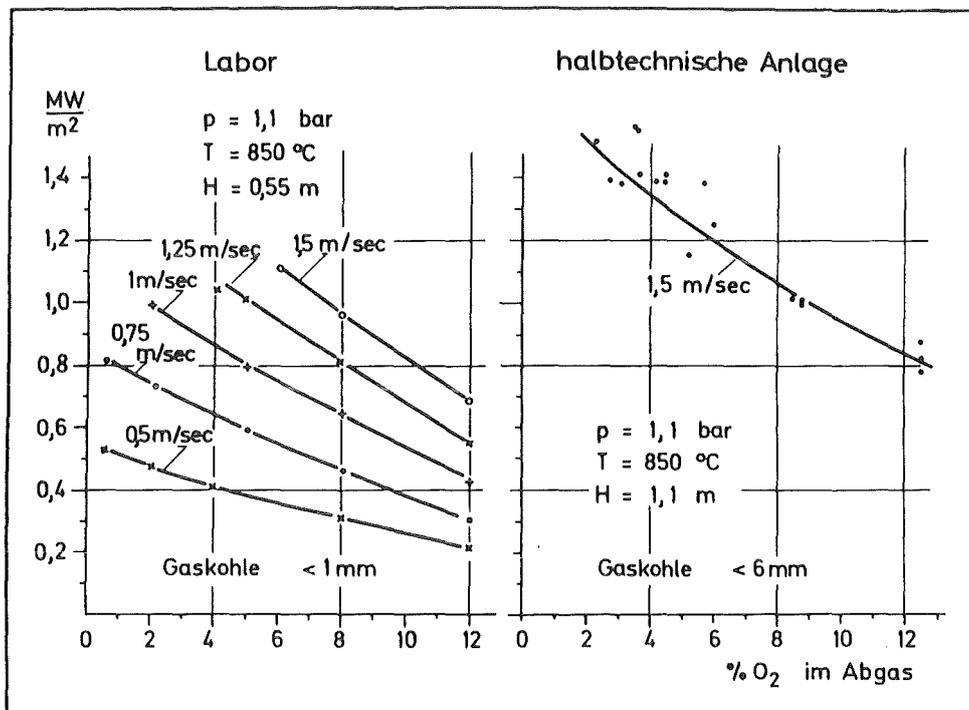


Bild 2: Thermische Belastung von Wirbelschichtfeuerungen

Bei der Planung von Großfeuerungen führt der erreichbare Wert der Flächenbelastung zu unbequem großen und konstruktiv schlecht zu beherrschenden Anströmbodenflächen. Eine Erhöhung des

spezifischen Wärmeumsatzes ist aber nur durch ein erhöhtes Sauerstoffangebot zu erreichen. Eine Möglichkeit, dies zu verwirklichen, ist der Druckbetrieb. Die Wärmefreisetzungsrates steigt direkt proportional zum Druck. Dadurch wird somit ein noch kompakterer Brennkammerbau ermöglicht, außerdem verbessern sich beim Druckbetrieb der Ausbrand und die spezifischen Emissionen. Allerdings ist der Betrieb einer Feststofffeuerung unter Druck technisch und vom Betrieb her wesentlich aufwendiger als der atmosphärische Betrieb.

Eine andere Möglichkeit, die Flächenbelastung der Feuerung zu verbessern, besteht in der Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit. Dies bewirkt jedoch, daß die Schicht sehr stark expandiert, sehr viel Material ausgetragen wird und schließlich der gesamte Reaktor von Staubstrahlen erfüllt wird. Um hier noch zu einem befriedigenden Ausbrand zu gelangen, muß die Brennkammerhöhe stark vergrößert werden. Der Gasberuhigungsraum fällt weg und ein integrierter Rückführzyklon wird nachgeschaltet, der den Materialaustrag in Grenzen halten soll und eine Zirkulation des gesamten Brennkammerinhaltes ermöglicht. Mit diesem Konzept der zirkulierenden WSF (Bild 3) sollen bis zu fünfmal höhere Flächenbelastungen als bei der stationären atmosphärischen WSF erreicht werden können. Vorteile dieses Systems sind darüber hinaus die problemlose Brennstoffverteilung und die mögliche Entkopplung von Verbrennungsraum und Wärmeabfuhrsystem, das eine einfachere Teillastregelung verspricht.

Es war bereits zuvor auf die verhältnismäßig niedrige Verbrennungstemperatur hingewiesen worden, bei der WSF-Anlagen betrieben werden. Der übliche Bereich liegt zwischen etwa 800 und 950 °C,

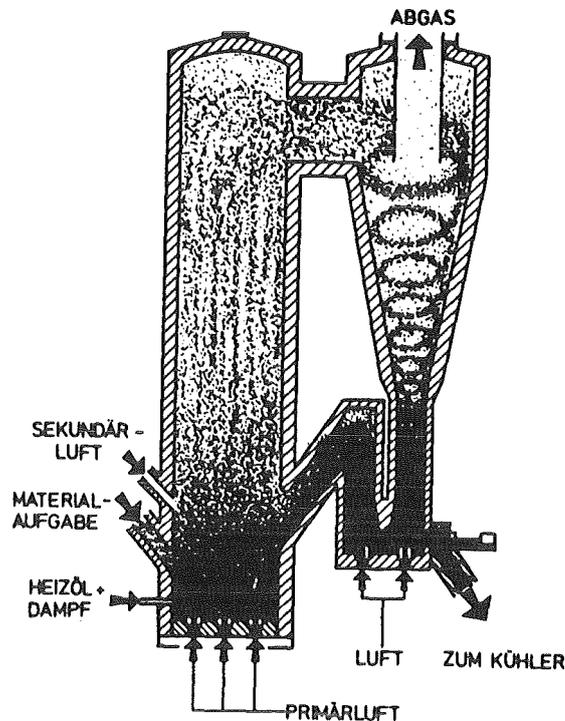


Bild 3: Verbrennung in zirkulierender Wirbelschicht (Quelle: Lurgi)

wobei die untere Grenze durch die Forderung nach ausreichender Verbrennungsgeschwindigkeit und niedrigen CO-Emissionen festgelegt ist, die obere durch die Notwendigkeit, sicher unterhalb des Ascheerweichungspunktes zu bleiben. Ein Zusammensintern der Schichtmaterialpartikeln führt zu groben Agglomeraten, die nicht mehr aufgewirbelt werden können und schließlich zum Kollaps der WS führen können. Die für einen bestimmten Anwendungsfall optimale stationäre Betriebstemperatur wird man nach den Gegebenheiten des Brennstoffes und den besonderen Betriebsumständen wählen müssen. So wird man für einen ausgesprochen reaktions-trägen Brennstoff, wie z. B. Anthrazit, eine Betriebstemperatur von 900 °C oder darüber vorsehen müssen, um hin-

reichend schnelles Ansprechen auf Regelungseingriffe zu gewährleisten und um den Ausbrand ausreichend hoch zu halten.

Die niedrige Feuerraumtemperatur bringt eine ganze Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Schadstoffemissionen mit sich. Die Abwesenheit von thermischem Stickoxid war bereits erwähnt worden. Darüber hinaus ist die Verdampfungsrate insbesondere für Alkaliverbindungen, die zur Heizflächenverschmutzung führen können, aber auch für andere Substanzen, die z. B. als Rauch im Abgas auftreten können, stark temperaturabhängig und bei den niedrigen Feuerraumtemperaturen der WSF sehr niedrig. Von besonderer Wichtigkeit ist jedoch, daß in diesem Temperaturbereich Calciumoxid, das bei der Verbrennung des Brennstoffschwefels entstehende Schwefeldioxid bindet und sich dadurch eine einfache und zuverlässige Methode zur Senkung der SO_2 -Emissionen eröffnet. Durch Zuschlag von Kalkstein zum Brennstoff wird in der Feuerung das eigentliche Sorbens Calciumoxid gebildet, dessen Reaktionsprodukt Calciumsulfat in der Asche verbleibt und mit dieser aus der Brennkammer ausgetragen wird.

Zusammenfassend lassen sich die Besonderheiten der Wirbelschichtfeuerung nennen:

- Hoher Wärmeübergang innerhalb der Schicht und von der Schicht auf die Wände ermöglicht kompakte Bauweise, genaue Verbrennungstemperaturführung ohne heiße Nester und macht das gesamte Schichtvolumen zur Verbrennungszone.
- Die niedrige Verbrennungstemperatur verhindert die Bildung von thermischem Stickoxid und die unerwünschte Verdampfung

von Alkaliverbindungen. Ascheverklebungen an den Heizflächen treten nicht auf und Rußbläser können evtl. entfallen.

- Die Entschwefelung der Rauchgase erfolgt bereits in der Feuerung durch Bindung des SO_2 an Brennstoffasche und besonders auch an dem Brennstoff zugemischtem Kalkstein oder Dolomit. Wegen dieser einfachen, wirkungsvollen und kostengünstigen Entschwefelung können auch Brennstoffe mit hohem Schwefelgehalt umweltfreundlich in der WSF verbrannt werden.
- Da die WS im wesentlichen aus Inertmaterial besteht, das bis auf die Feuerungstemperatur aufgeheizt ist, wird die Zündung des aufgegebenen Brennstoffes durch die hohe Wärmekapazität der Schicht auch bei schlecht zündendem Material sichergestellt. Selbst starke Schwankungen, z. B. im Ballastgehalt, die die Zündwilligkeit entsprechend beeinflussen, werden durch die Eigenschaften der WS gut ausgeglichen, so daß auch Kohlen wechselnder Herkunft ohne vorherige Vergleichmäßigung verfeuert werden können.
- Die kompakte Bauweise im Zusammenwirken mit der hohen Zündstabilität machen die WSF-Technik auch für den Druckbetrieb besonders geeignet. Für Anlagen bis zu mittlerer Größe lassen sich Brennkammern in transportfähigen Abmessungen vollständig in der Werkstatt fertigen; größere Anlagen müßten evtl. aus Einzelmodulen erstellt werden.
- Da die WSF-Technik nicht an eine bestimmte Größe gebunden ist, wird die untere Grenze der Baugröße vom wirtschaftlich tragbaren Aufwand für Bau und Betrieb der Anlage bestimmt.

Unter den heutigen wirtschaftlichen und technischen Gegebenheiten dürfte für die BRD die derzeit kleinste noch lohnende Einheit bei ca. 3 MW_{th} liegen.

- Das verhältnismäßig schmale Temperaturband, in dem die WSF betrieben werden muß, macht für den Teillastbetrieb neue, noch nicht vollständig erprobte Vorgehensweisen erforderlich. Durch Variieren der Schichttemperatur im genannten Bereich, Verändern der Schichthöhe (Reaktionsvolumen) oder vorübergehendes Stilllegen einzelner Schichtsektionen lassen sich jedoch ausreichende Regelungsbereiche erzielen.
- Die WS muß vor Kohleaufgabe i. a. durch Fremdenergie (Gas- oder Ölbrenner) auf Temperaturen oberhalb der Kohlezündtemperatur aufgeheizt werden. Bei kürzeren Betriebsunterbrechungen (je nach Schichtabmessungen bis zu ca. 10 h) bleibt das Schichtmaterial jedoch, wenn es nicht angewirbelt wird, genügend warm, so daß bei Wiederaufnahme des Feuerungsbetriebes unmittelbar wieder Brennstoff zugegeben werden kann und ein großer Teil der Nennleistung praktisch momentan wieder zur Verfügung steht (Ein/Aus-Betrieb). Wird die Schicht jedoch ohne Brennstoff weitergewirbelt, kann sie z. B. in Notfällen sehr schnell abgekühlt werden.
- Die aufwärtsgerichtete Bewegung der Verbrennungsluft durch die Schicht bewirkt, daß auch für die Feststoffpartikeln die vorherrschende Bewegungsrichtung nach oben oder nach unten ist. Quervermischung findet dagegen i. a. nur relativ langsam statt. Daher ist es notwendig, den Brennstoff möglichst gleichmäßig über den WS-Querschnitt zu verteilen. Bei pneumatischer Aufgabe von unten

durch den Anströmboden rechnet man mit ca. 1 Aufgabe-
stelle/m². Grobstückige Kohle kann aber von oben auf die
Schicht geworfen werden. Wegen ihrer langen Verweilzeit
in der Schicht hat sie ausreichend Zeit sich gleichmäßig
zu verteilen.

Aus dem Dargelegten wird ersichtlich, daß mit der WSF-Technik
zwar alle brennbaren Substanzen verfeuert werden können, es be-
darf aber im Einzelfalle doch einer gewissen Anpassung der Aus-
führung der Anlage an den einzusetzenden Brennstoff, bzw. das
Brennstoffband. Daher sind verschiedene Bauformen und Konzepte
vorgeschlagen und z. T. bereits in Anlagenrealisiert worden. Die
wichtigsten dieser Konzepte sollen im folgenden beschrieben
werden mit besonderer Berücksichtigung ihrer Eignung für den
Einsatz in der Bundesrepublik Deutschland.

2. Bisher in Versuchsanlagen realisierte technische Konzepte

Die bisher gebauten größeren WSF-Versuchsanlagen wurden i. a.
für die Erprobung bestimmter technischer Konzepte gebaut, mit
denen konkrete Aufgabenstellungen gelöst werden sollten. Ganz
grob kann man dabei unterscheiden zwischen Bauarten, die für
grobstückige Kohle geeignet sind, solchen, die für den Einsatz
von Feinkohlen konzipiert sind und solche, die staubförmige Brenn-
stoffe (i. a. als Schlämme) durchsetzen sollen. Die zuletzt ge-
nannten Brennkammern sind als Abwandlungen der aus der kon-
ventionellen WS-Technik bekannten Öfen und Abfallverbrennungs-
anlagen anzusehen. Der Brennstoff wird von oben auf die Schicht
gegeben und liegt i. a. in mit Wasser angeteigter Form vor. Da-
durch wird die Handhabung vereinfacht und der sofortige Austrag mit

dem Rauchgas vermieden. Als Beispiel für diese Bauart sei die Anlage "Gneisenau" der Ruhrkohle AG vorgestellt, die z. Z. in Betrieb genommen wird (1, 2).

2.1. Die Anlage Gneisenau der Ruhrkohle AG

Kennzeichnend für diese Anlage (Bild 4) ist der sehr große Nachverbrennungsraum, in dem die aus der WS ausgetragenen gezündeten Brennstoffteilchen ausreagieren können. Der Einsatzbrennstoff dieser Anlage besteht aus Flotationsbergen der Kohleaufbereitung und Teichschlamm aus abgebagerten Absetzteiche. Das Gemisch wird auf Siebbandpressen mechanisch entwässert und enthält noch 30 % Feuchtigkeit und ca. 40 % Asche; der Heizwert (wf) liegt bei ca. 13 000 kJ/kg und der Anteil des Feinstkorns mit Korngrößen unter $63 \mu\text{m}$ liegt bei über 65 % der Trockensubstanz.

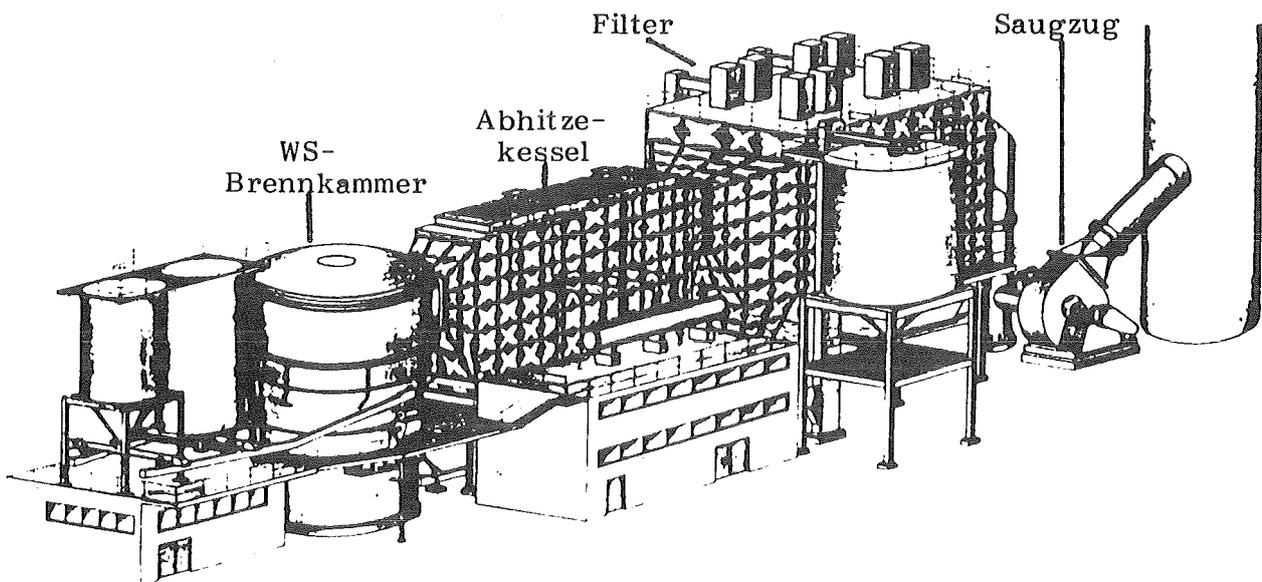


Bild 4: Gesamtansicht der Anlage Gneisenau (1)

Da die Anlage 8 000 h im Jahr betrieben werden soll, muß der Brennstoff für die Nacht und für Feiertage zwischengebunkert werden. Er wird vom Bunker über Dosierschnecken und Trogkettenförderer, in dem auch der zur Entschwefelung eingesetzte Kalkstein zugemischt wird, zwei Wurfbeschickern zugeleitet, die die Mischung großflächig verteilt auf die WS werfen. Die Brennkammer selbst (Bild 5) ist rund, ausgemauert und hat einen hohen, erweiterten Gasberuhigungsraum. Die Schichthöhe beträgt im fluidisierten Zustand ca. 1,20 m. Durch eintauchende Kühlelemente wird ca. 1/4 der Gesamtwärmeleistung von ca. 35 MW abgeführt. Wegen des hohen Feuchtigkeitsanteils im Brennstoff und der intensiven Nachverbrennung im Gasberuhigungsraum ergibt sich dieser vergleichsweise geringe Wärmeanteil, der aus der WS direkt abgeführt werden kann. Der Anströmboden hat eine Fläche von 30 m^2 , so daß sich eine Querschnittsbelastung von ca. $1,15 \text{ MW/m}^2$ ergibt.

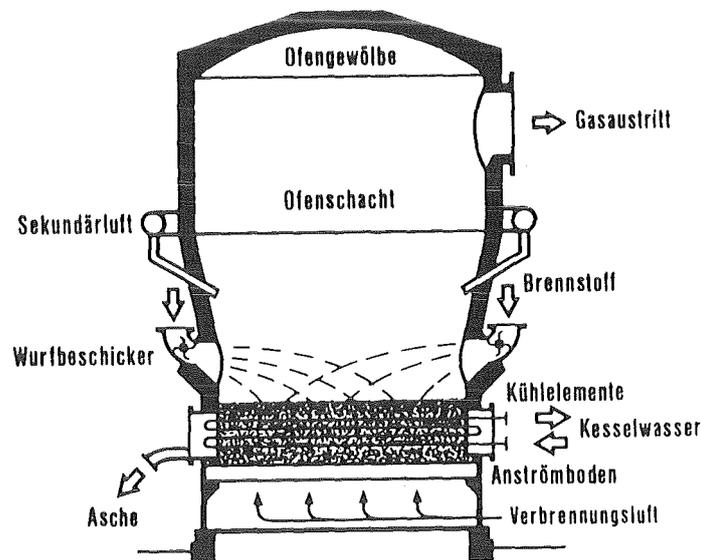


Bild 5: Brennkammer der Anlage Gneisenau (1)

Zur Intensivierung der Nachverbrennung wird ein Teil der Gesamtverbrennungsluftmenge oberhalb der Schicht eingeblasen, um eine bessere Durchmischung der Gase zu bewirken und den äußeren Stoffübergang bei der Verbrennung in der Zweiphasenströmung zu verbessern.

Da der Nachverbrennungsraum warm gehalten werden muß, ist er unberohrt geblieben; die fühlbare Wärme der Rauchgase wird erst in einem nachgeschalteten Abhitzeessel genutzt. Wegen des sehr hohen Anteils an Feinstkorn im Brennstoff wurden senkrechte Rohrbündel für den Abhitzeessel gewählt, die wenig Rückhaltefläche für Flugstaub bieten; und außerdem wurden besonders niedrige Rauchgasgeschwindigkeiten gewählt, um Erosion vorzubeugen.

In Vorversuchen ist für diese Anlage ein molares Calcium - Schwefelverhältnis von ca. 4 : 1 als notwendig ermittelt worden, um eine ausreichende Entschwefelung zu erzielen. Dies dürfte u.a. auf die Aufgabe des Brennstoffes von oben und den erheblichen Anteil an Nachverbrennung zurückzuführen sein, bei dem der Kontakt zwischen Sorbens und Schwefeldioxid wesentlich schlechter ist als bei der Brennstoffaufgabe unmittelbar oberhalb des Anströmbodens. Ergebnisse aus der Anlage Gneisenau selbst liegen allerdings noch nicht vor.

Die Inbetriebnahme einer WSF für derartig feuchte Brennstoffe erfordert eine besonders hohe Vorheizung der Schicht. Daher ist in der Anlage Gneisenau zum Aufheizen sowohl die direkte Befeuerung der Schicht durch Ölbrenner von oben, als auch die Vorwärmung der Anströmluft (ebenfalls durch Ölbrenner) vorgesehen. Die erforderliche Vorwärmtemperatur von Schicht und Brennkammerwänden beträgt ca. 800 °C.

2.2. Die WS-Module des Modellkraftwerkes Völklingen der Saarbergwerke AG

Eine ähnliche Bauweise wird im Modellkraftwerk Völklingen realisiert (3, 4). Hier sind zwei WSF-Module (Bild 6) von je 80 m^2 Anströmbodenfläche einem konventionellen kohlenstaubgefeuerten Kessel vorgeschaltet. Die Module sind ebenfalls gemauerte Brennkammern mit erweitertem, ungekühltem Oberteil, in dem eine Nachverbrennung stattfinden soll. Der Einsatzbrennstoff mit einem Heizwert von nur $10\,000 \text{ kJ/kg}$ enthält bis zu 55% Asche, allerdings ist der Wassergehalt mit 18% deutlich niedriger als bei der Anlage Gneisenau. Die Wirbelschichten sind mit luftgekühlten eintauchenden Wärmetauschern versehen. Auch bei dieser Anlage erfolgt die Brennstoffaufgabe mittels Wurfbeschicker, wobei jeder Modul 4 Aufgabestellen hat. Die Nutzung der Abwärme erfolgt in dieser Anlage im nachgeschalteten konventionellen Kessel.

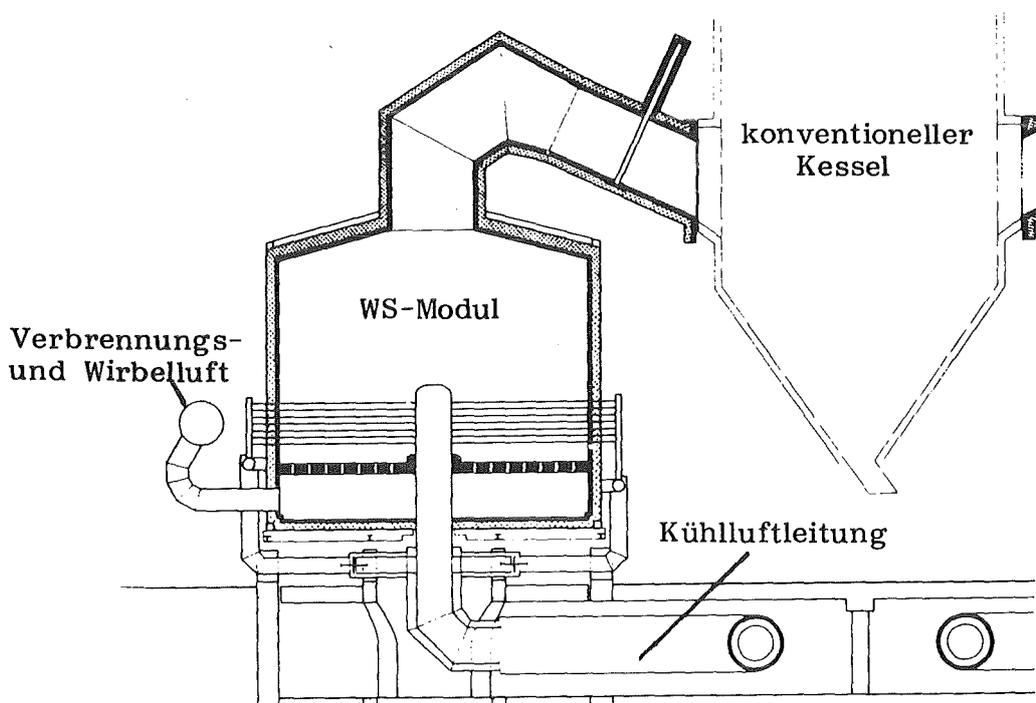


Bild 6: Wirbelschichtfeuerungsmodul des Modellkraftwerkes Völklingen (4, 12)

Die relativ voluminöse und damit aufwendige Bauweise der Brennkammern für die Anlagen Gneisenau und Völklingen wurde gewählt, um die Nachverbrennung oberhalb der Schicht zu forcieren und auf eine Flugstaubrückführung verzichten zu können. Da es sich bei beiden Anlagen um solche handelt, die hoch ballasthaltige Brennstoffe verfeuern, die anderweitig kaum verbrannt werden können, sind die Brennstoffkosten für die Gesamtbilanz von untergeordneter Bedeutung und die spez. Investitionen solcher Anlagen können höher sein als bei Wärmeerzeugungsanlagen, die höherwertige Brennstoffe einsetzen. Die vollständig ausgemauerten Brennkammern dürften sich auch weniger für Teillastbetrieb mit häufigen Starts und Stops eignen, da die Aufwärmzeiten relativ lang sind und Temperaturwechsel von gekühlten Metallwänden besser vertragen werden. Für die reine Dampferzeugung werden daher überwiegend gekühlte Brennkammern eingesetzt, wobei je nach Baugröße unterschiedliche Bauarten bevorzugt werden.

2.3. "Shallow-bed" WSF-Kessel englischer Bauart

Für den Sonderfall, daß stückige Kohlen ohne nennenswerten Feinanteil zur Verfügung steht und daß weiterhin auf die Entschwefelung verzichtet werden kann, sind in England einfache Bauformen von Dampf- oder Heißwasserkesseln entwickelt worden und inzwischen auch in Betrieb, die aber in der BR Deutschland nicht allgemein einsetzbar sind (5, 6). Der Vollständigkeit halber sei eine typische derartige sog. "shallow bed"-Feuerungsanlage beschrieben, der 10 MW Kessel (17 bar Sattedampf), der vom englischen National Coal Board entwickelt wurde und bei der Fa. Rists Ltd., Newcastle-under-Lyme, seit 1978 installiert ist. Es handelt sich um einen Zweizug-Rauchrohr-Großwasserraumkessel mit in der Mitte liegender WS-Brennkammer und zwei außen liegenden Umlenkammern (Bild 7).

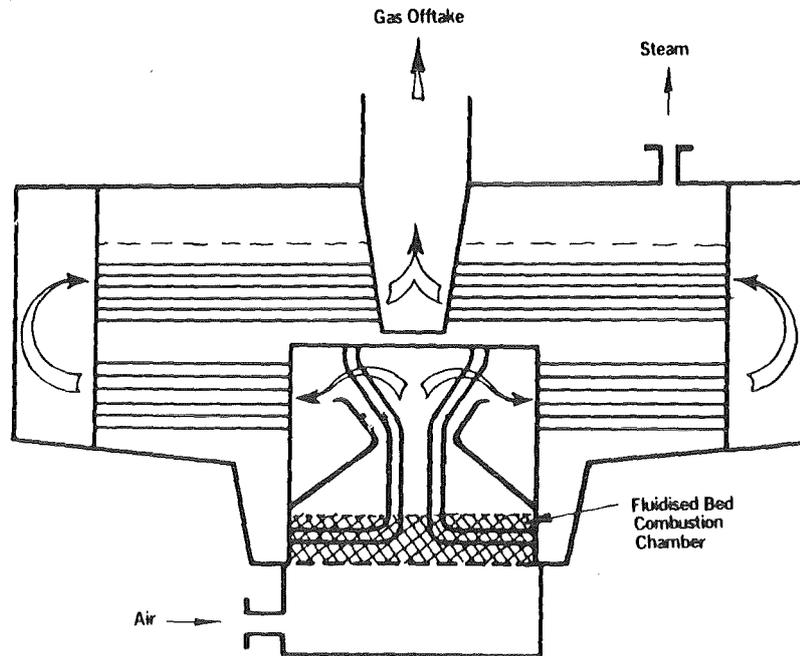


Bild 7: 10 MW Kessel, NCB-Entwicklung (5)

Der Rauchgasabzug ist wiederum in der Mitte. Der Kessel liefert Prozeßdampf und versorgt die Heizungsanlage des Werkes. Eingesetzt werden "washed singles", d.h. Vollwertkohlen im Kornbereich von ca. 12 - 25 mm. Da diese Kohlen leicht zuzuteilen und zu dosieren sind, werden sie ohne nochmalige Aufbereitung oder Trocknung verwendet. Der Kessel hat auf beiden Seiten je einen Vorlagebunker, die pneumatisch aus dem Vorratsbunker nachgefüllt werden. Die Dosierung erfolgt über Zellenradschleusen, die unmittelbar in schwach geneigte Fallrohre entleeren. Diese münden in Kohleeinblaserohre, durch die die Kohle auf die WS geblasen wird. Dabei wird die Luftmenge so abgestimmt, daß eine gute

Verteilung über die WS-Oberfläche erreicht wird. Die WS selbst besteht aus aufgewirbeltem Sand, die Schichthöhe beträgt ca. 20 cm. Die höhere Dichte von Sand gegenüber dem Brennstoff bewirkt, daß die Kohlenstücke auf der WS "schwimmen" und dort abbrennen. Da die Kohle wenig Asche enthält (5 - 10 %) reichert sich die Schicht kaum mit Aschebestandteilen an. Der Sand wird lediglich einige Male pro Jahr durch Absieben von groberen Aschepartikeln befreit. Die hohe Dichte des Sandes und die Stückigkeit der Kohle lassen eine Wirbelgeschwindigkeit von ca. 3 m/s zu, so daß eine Querschnittsbelastung von ca. $1,6 \text{ MW/m}^2$ in dieser Anlage erreicht wird. Durch Rücknahme der Anströmluftmenge (und natürlich der Brennstoffmenge) läßt sich ein Teillastverhältnis von 1 : 3 realisieren.

Die Anlage wird durch einen Ölbrenner vorgeheizt, der in den Anströmboden eingebaut ist und die Wirbelluft auf ca. 900°C vorheizt. Nach Erreichen einer Sandtemperatur von etwa 550°C wird vorsichtig Kohle eingespeist und ab ca. 700°C WS-Temperatur der Ölbrenner abgeschaltet. Die Anlage ist mit einem Frischlüfter mit Ansaugdrossel zur Luftmengenregelung und einem Saugzuggebläse mit Wirbelstromkupplung versehen. Im Feuerraum wird ein mäßiger Unterdruck eingestellt. Das Abgas muß bei dieser Anlage durch Tuchfilter entstaubt werden, kleinere Industriekessel dürfen in U.K. i. a. mit Zyklonen als Entstauberaggregat betrieben werden. Eine Entschwefelung durch Zuschlag von Kalkstein oder Dolomit wird nicht durchgeführt.

Um in einer shallow-bed WSF eine Entschwefelung zu erzielen, sind wesentlich höhere Sorbensmengen erforderlich, als bei den bei uns und auch in USA favorisierten WS-Anlagen mit 1 - 1,5 m Schichthöhe. Der Grund dafür ist, daß die Kontaktzeit von Sorbenspartikeln

und primär entstandenen SO_2 viel kürzer ist (vgl. Abschnitt 3). Da zudem in der Bundesrepublik u.a. wegen der anders gearteten rohstofflichen Eigenschaften Kohlen der in England handelsüblichen Sortierung nur in unzureichender Menge zur Verfügung stehen und daher mit einem höheren Feinanteil bei der Einsatzkohle gerechnet werden muß, der die Handhabung und den Ausbrand entscheidend beeinflusst, dürfte diese Bauweise bei uns nur in Sonderfällen **einsetzbar sein**.

Für einen in der Bundesrepublik universell einsetzbaren Dampfkessel mit WSF muß gefordert werden, daß er insbesondere die folgenden Bedingungen wirtschaftlich erfüllen kann:

- gewaschene Feinkohle wechselnder Qualität muß einsetzbar sein
- Auflagen des Umweltschutzes müssen problemlos erfüllbar sein
- rasche Lastwechsel und kurze An- und Abfahrzeiten müssen gewährleistet sein
- günstiges Teillastverhalten
- automatisierbarer Betrieb

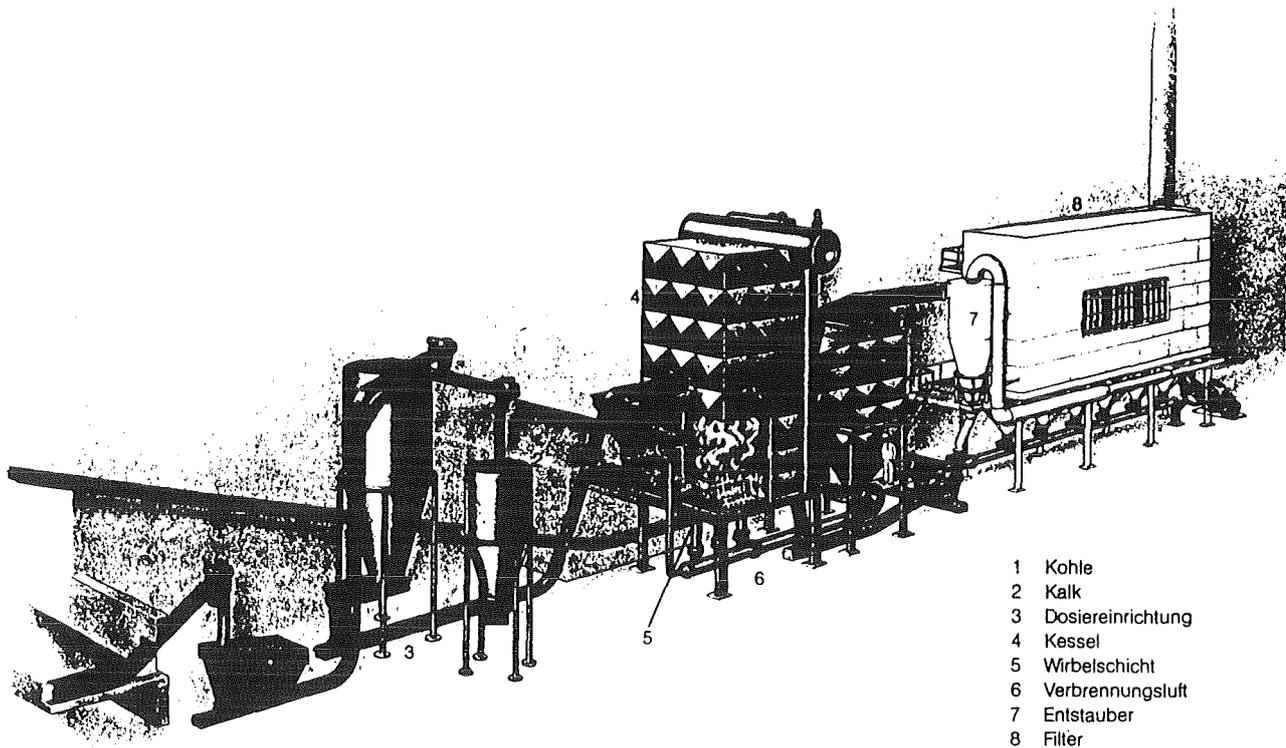
Die üblichen Forderungen, wie gute Brennstoffausnutzung und hoher Wirkungsgrad etc., brauchen hier nicht besonders betont zu werden. Es ist bereits gesagt worden, daß zumindest einige dieser Forderungen von den zuvor beschriebenen WSF-Bauformen für Abfallbrennstoffe oder grobstückige Kohlen nicht erfüllt werden können. Als Beispiele für Bauweisen, mit denen auch die oben genannten Anforderungen erfüllt werden können, seien die Anlagen "König Ludwig" und "Flingern" der Ruhrkohle AG und die im Bau befindliche Anlage der Vereinigte Aluminiumwerke AG in Lünen näher

beschrieben. Die beiden erstgenannten Anlagen sind atmosphärische, stationäre WSF-Anlagen mit 6 bzw. 35 MW thermischer Leistung, in der zuletzt genannten Anlage wird eine atmosphärische, zirkulierende WSF installiert, die eine therm. Leistung von 84 MW haben wird.

Die beiden Anlagen "König Ludwig" und "Flingern" (7 - 12) wurden im Jahre 1979 als Demonstrationsanlagen in Betrieb genommen und sind für bestimmte Anwendungsbereiche konzipiert worden. Die 6 MW Anlage soll den Einsatz der WSF im Industriebereich zur Prozeß- und Heizwärmeerzeugung demonstrieren, kann in dieser Größenordnung aber auch als Beispiel für eine Anlage zur dezentralen Wärmeversorgung im kommunalen Bereich angesehen werden. Die größere 35 MW Anlage ist dagegen als Dampferzeugereinheit für größere Heizkraft- und Heizwerke konzipiert.

2.4. Die Anlage König Ludwig der Ruhrkohle AG

Für die Anlage König Ludwig (Bild 8 und 9) war ursprünglich nur der Einsatz von Vollwertkohlen in der Körnung 0 - 30 mm vorgesehen worden, inzwischen sind jedoch auch Mittelgutkohlen (bis 40 % Aschegehalt) und gewaschene Feinkohlen erfolgreich erprobt worden. In dieser Anlage wird auf eine eigene Kohlenaufbereitung verzichtet, die Kohle wird mittels Radlader in den Tagesbunker gegeben, von dort wird sie in kontrollierter Menge abgezogen, mit der erforderlichen Menge Kalkstein vermischt und in den unmittelbar am Kessel angebrachten Vorlagebunker überführt. Die Einspeisung in die WS erfolgt mit Hilfe von Schneckenförderern, die das Gemisch kurz oberhalb des Anströmbodens seitlich in den Verbrennungsraum dosieren. Als Schichtmaterial war ursprünglich Sand vorgesehen, daher bekamen die Wände der Brennkammer und der Boden eine Auskleidung mit Stampfmasse als Erosions-



- 1 Kohle
- 2 Kalk
- 3 Dosiereinrichtung
- 4 Kessel
- 5 Wirbelschicht
- 6 Verbrennungsluft
- 7 Entstauber
- 8 Filter

Bild 8: Gesamtansicht der Anlage König Ludwig
(Quelle: Thyssen Engineering GmbH)

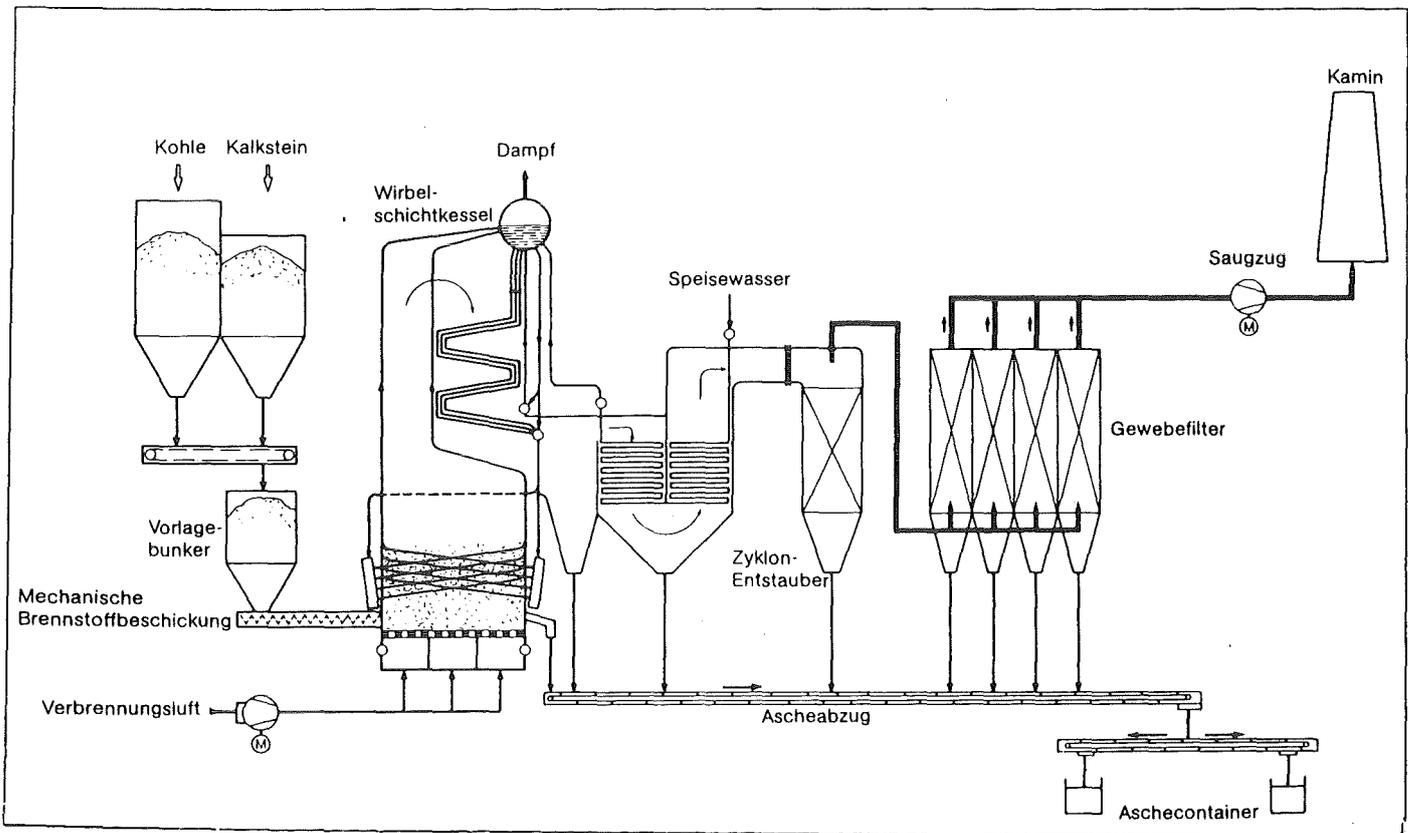


Bild 9: Fließschema der Demonstrationsanlage König Ludwig
(Quelle: Thyssen Engineering GmbH)

schutz. Aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen soll bei Folgeanlagen auf die Ausstampung verzichtet werden und Feinschamotte oder Kohlenasche als Wirbelmaterial verwendet werden.

Die Brennkammer dieser Anlage ist oberhalb der WS etwas konisch erweitert; in diesen Raum wird zur Intensivierung der Nachverbrennung Sekundärluft eingeblasen. Die Rauchgase werden durch (nicht bestampfte) Strahlungsheizflächen im ersten Zug und Nachschaltheizflächen im zweiten Kesselzug abgekühlt, die Speisewasservorwärmung erfolgt im dritten Zug. Zur Entstaubung der Rauchgase dient ein Schlauchfilterhaus, dem ein Multizyklon vorgeschaltet ist.

Der Kessel ist als Wasserrohrkessel mit Naturumlauf ausgeführt. Betriebsversuche haben ergeben, daß die Last im Bereich von 100 % bis 28 % zuverlässig variiert werden kann. Dies geschieht durch Verändern der WS-Temperatur, Änderung des Luftüberschusses, Variation der Schichthöhe, d. h. der Eintauchtiefe des Wärmetauscherbündels und Abschalten einzelner Förderschnecken und Luftkastensegmente (Der Luftkasten unterhalb des Anströmbodens ist in drei einzeln angeströmte Kammern unterteilt. Durch Abschalten einer Kammer wird der darüberliegende Teil der WS - mit hinreichender Abgrenzung - defluidisiert.).

Das Aufheizen der Schicht bei Inbetriebnahme geschieht durch von oben auf das leicht fluidisierte Material feuernde Gasbrenner. Nach Erreichen der Kohlezündtemperatur von ca. 550 - 600 °C wird vorsichtig Kohle eindosiert und ab ca. 750 °C die Gasfeuerung abgestellt.

Um den Ausbrand zu verbessern - bisher wurde ein feuerungstechnischer Wirkungsgrad von ca. 93 % erreicht - soll die Flugasche demnächst in die Brennkammer zurückgeführt werden.

Die Zeitverfügbarkeit der Anlage war bereits in der Anlaufphase - trotz Errichtung als Versuchsanlage - überraschend gut (Bild 10). Der Anlagenbetrieb ist inzwischen so weitgehend automatisiert, daß die Zulassung für Betrieb mit nur teilweiser Beaufsichtigung nach TRD 602 beantragt worden ist.

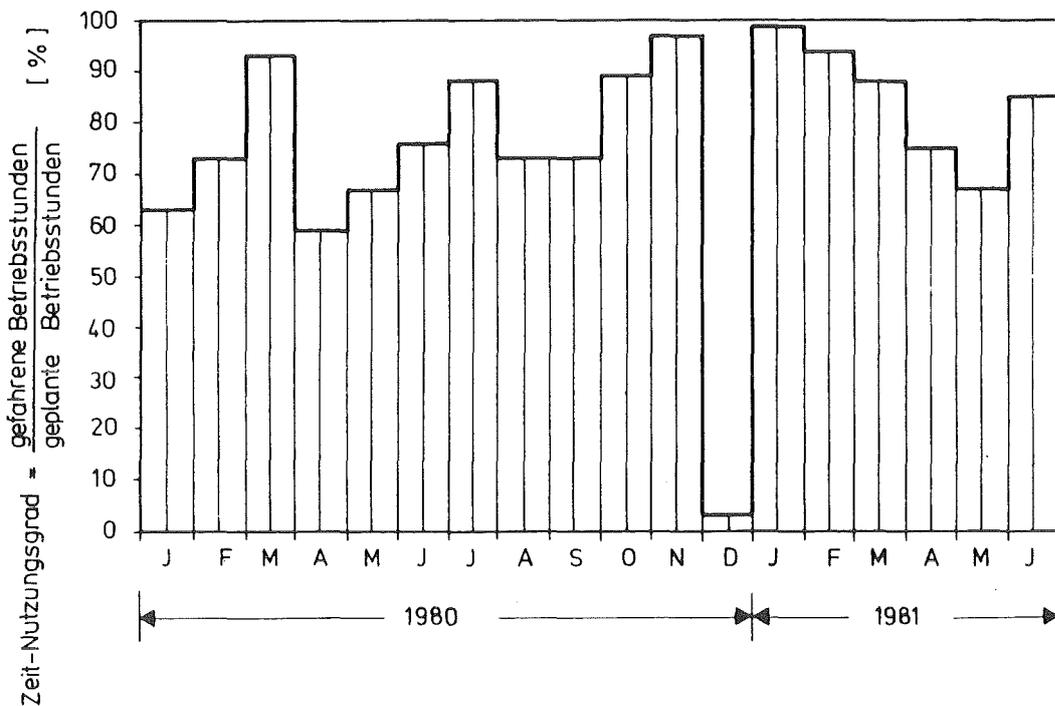


Bild 10: Verfügbarkeit der Anlage König Ludwig (11)

2.5. Die Anlage Flingern der Ruhrkohle AG

Bei der Anlage "Flingern" (Bilder 11 und 12) handelt es sich im Gegensatz zur Anlage "König Ludwig" nicht um einen Neubau, sondern es wurde ein alter Wanderrostkessel in eine WS-Anlage umgebaut.

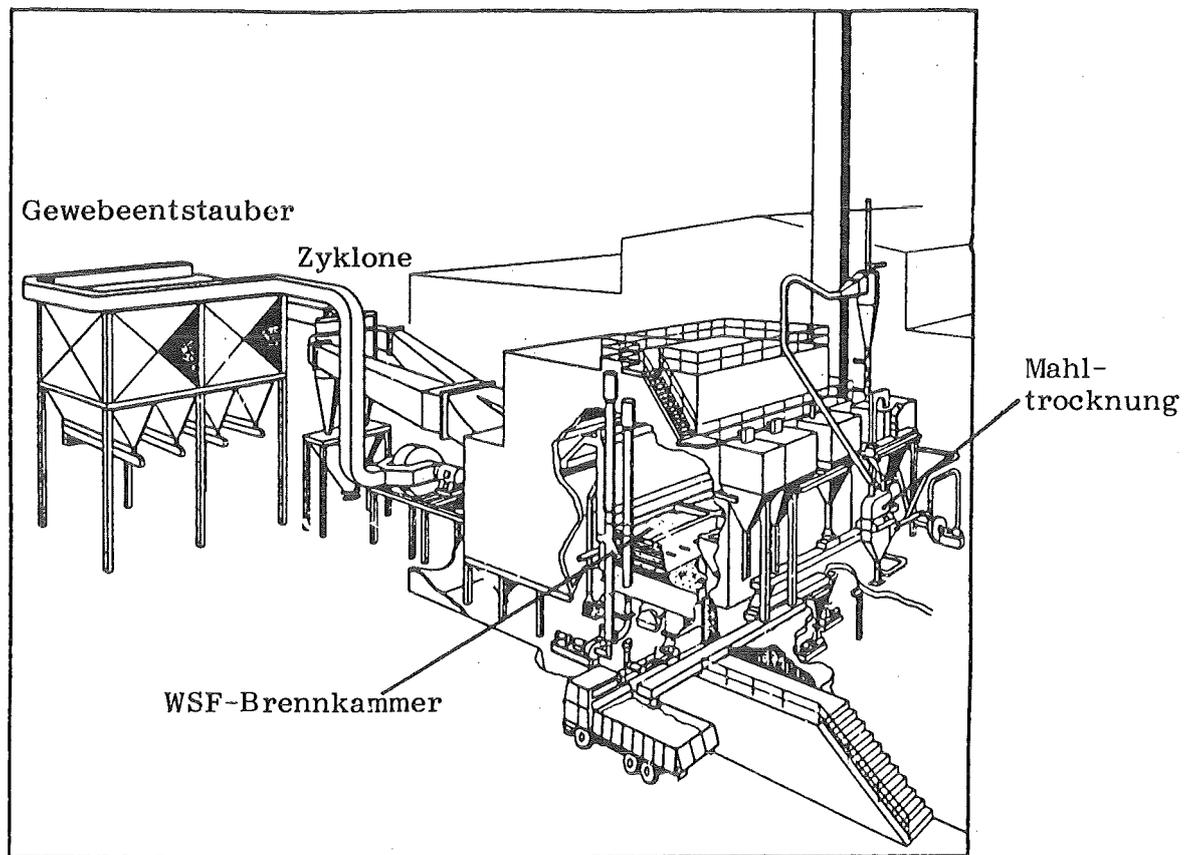
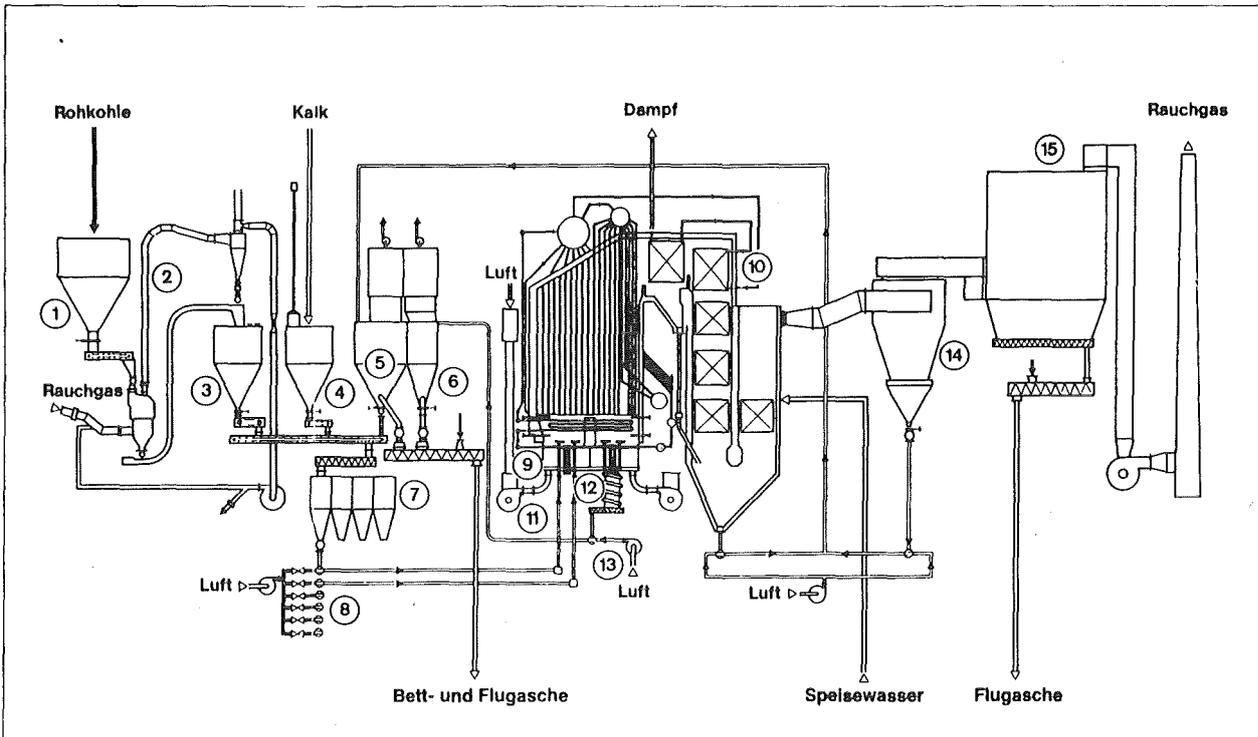


Bild 11: Gesamtansicht der Anlage Flingern (7)

Der durch den Umbau erforderliche Kompromiß brachte es mit sich, daß der Kessel nicht optimal entsprechend dem (damaligen) Stand der Kenntnisse gestaltet werden konnte. Er wurde daher auch nur als Versuchsanlage betrieben und - mit vereinfachtem Genehmigungsverfahren - zugelassen. Nach insgesamt erfolgreichem Abschluß der Versuche wurde die Anlage im Frühjahr 1981 wieder stillgelegt.



- | | | |
|------------------------|--|-----------------------------------|
| 1 Rohkohlebunker | 6 Bettaschebunker | 11 Verbrennungsluft |
| 2 Mahltrocknungsanlage | 7 Gemengebunker | 12 Bettascheablauf mit Kühler |
| 3 Feinkohlebunker | 8 Gemenge-transport zur Wirbelbettfeuerung | 13 Bettasche-transport zum Bunker |
| 4 Kalkbunker | 9 Wirbelbett-Ofen mit Wärmetauscher | 14 Zyklon-Abscheider |
| 5 Flugaschebunker | 10 Kessel | 15 Gewebe-Entstauber |

Bild 12: Fließschema der Anlage Flingern (7)

Der im Kraftwerk Flingern vorhandene Dreizug-Wasserrohrkessel für 50 t/h Dampf (400 °C, 17 bar) wurde nach Entfernen des Wanderrotes und der Entschungseinrichtungen mit einer untergehängten WSF-Brennkammer mit vierfach unterteiltem Luftkasten versehen. Zusätzlich wurden die Kohleaufbereitung und pneumatische Einspeisung, die Aschekühlung und die Entstaubung durch Zyklone und Gewebefilter neu installiert.

Zur Verfeuerung wurde Ballastkohle 0 - 20 mm eingesetzt, die in einem Prallbrecher auf eine Korngröße ≤ 6 mm gebrochen und gleichzeitig mit 400°C heißem, aus dem Kessel abgesaugten Rauchgas auf eine Restfeuchte von ca. 4 % getrocknet wurde. Die zwischengebunkerte Kohle wurde in geregelter Menge über eine Dosierbandwaage in die Vorlage einer pneumatischen Fördereinrichtung überführt. In diese Vorlage wurden auch der zugeschlagene Kalkstein in definierter Menge und rückgeführte Flugasche eingefördert. Das Kohle-Kalkstein-Asche-Gemisch wurde über 24 Brennstoffeintragsdüsen (1 Düse je m^2 Anströmbodenfläche) in die WS eingeblasen.

Die WS war durch ein Mauerkreuz in vier gleich große Segmente aufgeteilt, die individuell fluidisiert werden konnten. Durch Abschalten einzelner Segmente konnte die Teillast in groben Stufen geregelt werden, außerdem brauchte zum Inbetriebnehmen nur ein Segment mit Gas aufgeheizt zu werden. Der Anströmboden und die Umfassungswände der WS-Brennkammer waren als (unbestampfte) verschweißte Membranrohrwände ausgeführt.

Das in die WS eintauchende, durch die Trennmauern geführte Wärmetauscherbündel war als Verdampferfläche geschaltet, die im Zwangsdurchlauf betrieben wurde.

Die die WS-Segmente verlassenden Rauchgasströme wurden im Freiraum oberhalb der Schichten vereinigt, im konventionellen Teil des Dreizugkessels auf ca. 180°C abgekühlt, durch zwei parallele Zykclone geführt und dann dem Gewebefilter zugeleitet. Der Zyklonstaub und der in der Umlenkung zwischen dem 2. und 3. Zug anfallende Flugstaub wurde pneumatisch in den Aschevorlagebunker gefördert, aus dem er dann wieder teilweise dem Brennstoffgemisch zudosiert werden konnte.

Die überschüssige Schichttasche konnte segmentweise abgezogen und in speziellen Wärmetauschern indirekt mit Wasser gekühlt werden. Sie wurde ebenfalls in den Aschenvorlagebunker überführt. Als WS-Material wurde Kohlenasche verwendet; da Ballastkohle (25 - 38 % Asche) verfeuert wurde, brauchte kein zusätzliches Schichtmaterial eingesetzt zu werden.

Die Anlage "Flingern" war ursprünglich für eine Wirbelgeschwindigkeit von 2,6 m/s ausgelegt worden, jedoch wurden im Verlaufe der Versuche i. a. niedrigere Geschwindigkeiten bevorzugt; dennoch konnte die Dampfnennleistung des Kessels auch mit den niedrigeren Anströmgeschwindigkeiten sicher erreicht werden.

Teillast der Anlage Flingern wurde, wie in der Anlage König Ludwig, durch Variation der Schichttemperatur, des Luftüberschusses und der Schichthöhe erzielt. Grobabstufungen wurden durch Stilllegen von Segmenten, wie erwähnt, realisiert. Bei längerem Stillstand eines Segmentes kam es vor, daß nicht vollständig ausgebrannte Partikeln aus noch in Betrieb befindlichen Segmenten über die Trennmauern auf die ruhende Schicht geschleudert wurden, dort nachglimmten und agglomerierten. Diese Störung konnte durch periodisches kurzzeitiges Wiederanwirbeln stillgelegter Sektionen problemlos beseitigt werden. Die Anlage konnte im Leistungsbereich von 100 % bis 15 % sicher gefahren werden.

Das Aufheizen zur Inbetriebnahme der kalten Anlage geschah, etwas anders als in der Anlage König Ludwig, durch Gas, das durch den Anströmboden in die Schicht geleitet wurde. Ein oberhalb der Schicht befindlicher Sicherheitsbrenner stellte den vollständigen Ausbrand des Gases bei kalter Schicht sicher. Das Aufheizgas

brannte zunächst oberhalb der WS, mit wachsender Schichttemperatur verlagerte sich die Verbrennung immer weiter in die Schicht hinein und heizte dadurch sehr intensiv. Die Kohlezündtemperatur von ca. 600°C wurde auf diese Weise in etwa 20 Minuten erreicht, nach weiteren 15 - 30 Minuten konnte bereits Dampf abgegeben werden. Bei einem Warmstart (Wiederinbetriebnahme einer vorübergehend defluidisierten Feuerung) entfällt die Aufheizperiode (Bild 13), wenn die Schichttemperatur noch nicht zu stark abgesunken ist. In Flingern wurde gefunden, daß die nicht fluidisierte Schicht nur um ca. $20^{\circ}\text{C}/\text{h}$ abkühlt (Bild 14), so daß nach einem nächtlichen Stillstand ($\sim 8\text{ h}$) noch ein Warmstart möglich war. Andererseits konnte durch einfaches Abstellen der Kohlezufuhr die Schicht mit der Wirbelloft bei Bedarf auch sehr schnell kaltgeblasen werden (im fluidisierten Zustand).

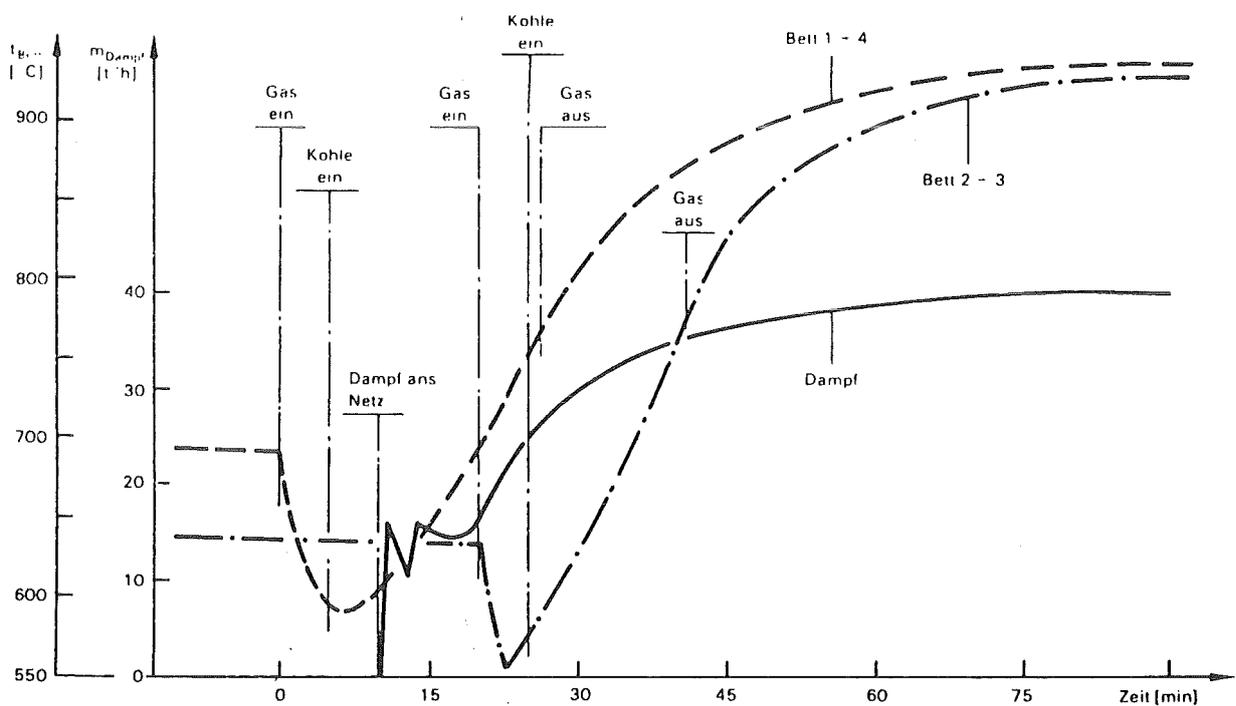


Bild 13: Beispiel eines Anfahrvorganges der Anlage Flingern (10)

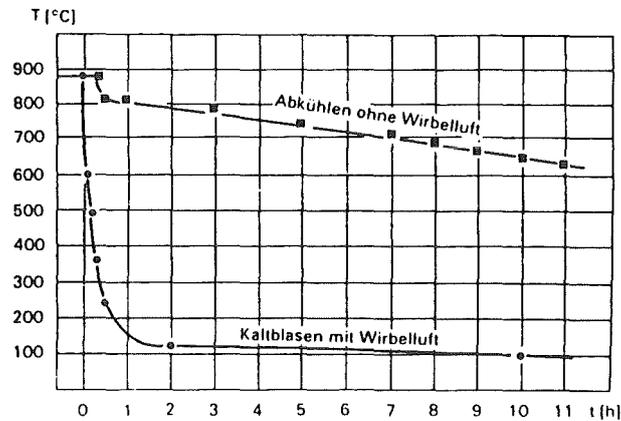


Bild 14: Abkühlverhalten der Wirbelschicht in der Anlage Flingern (10)

Der praktische Betrieb beider Anlagen hat gezeigt, daß WSF-Anlagen dieser Art problemlos zu beherrschen sind, Schwankungen der Brennstoffqualität ohne Schwierigkeiten akzeptieren, sehr einheitliche Temperaturverteilungen in der WS aufweisen, ohne daß es zu Klinkerbildung kommt, keine besonderen Erosionen auftreten und daß auch eine Verschmutzung der konvektiven Heizflächen nicht zu befürchten ist. In beiden Anlagen brauchten die installierten Rußbläser nicht betätigt zu werden.

2.6. Das WSF-Heizkraftwerk der Georgetown Universität in Washington D.C.

Ähnlich wie die hier beschriebenen beiden Anlagen der Ruhrkohle AG sind die in USA mit atmosphärischer, stationärer Wirbelschichtfeuerung gebauten Feuerungsanlagen konzipiert. Die bekannteste und am weitesten entwickelte Anlage dieser Art dürfte das WSF-Heizkraftwerk der Georgetown Universität in Washington D.C. sein (Bild 15), dessen Dampfleistung 45 t/h beträgt (13, 14). Anders als in Flingern wird hier aber ausschließlich Nußkohle eingesetzt, die mittels Wurfbeschicker von oben auf die Schicht geworfen wird.

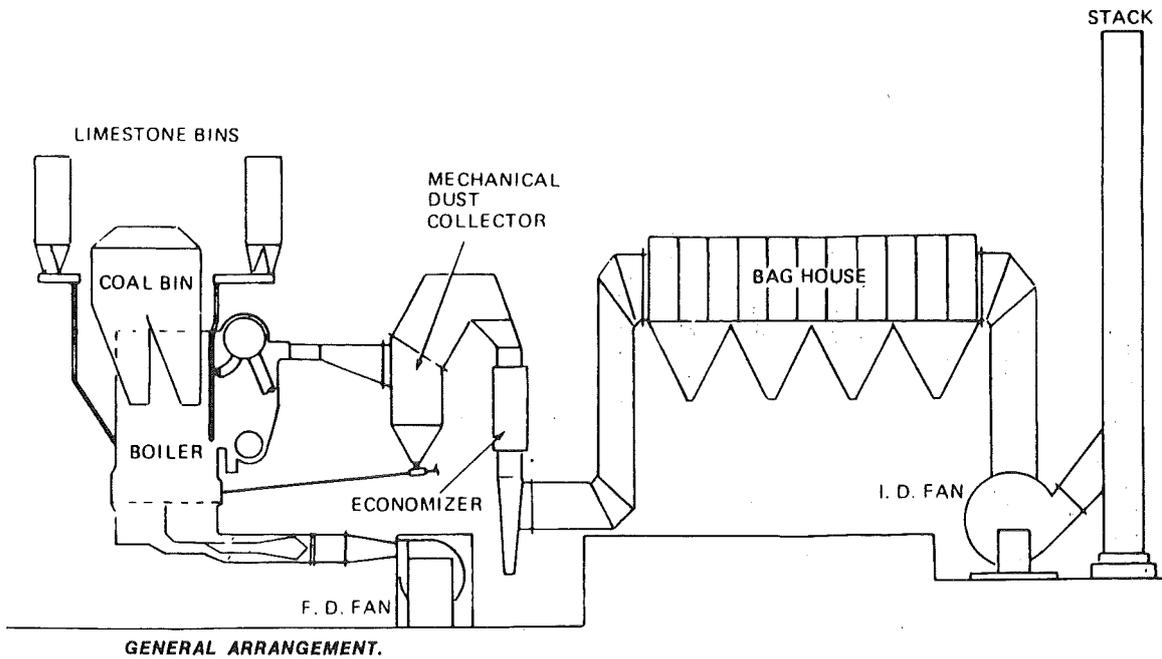


Bild 15: Heizkraftwerk der Georgetown Universität, Washington D.C. (13, 14)

Die Brennkammer ist durch eine Membranwand in zwei Sektionen aufgeteilt (Bild 16), die einzeln betrieben werden können, allerdings

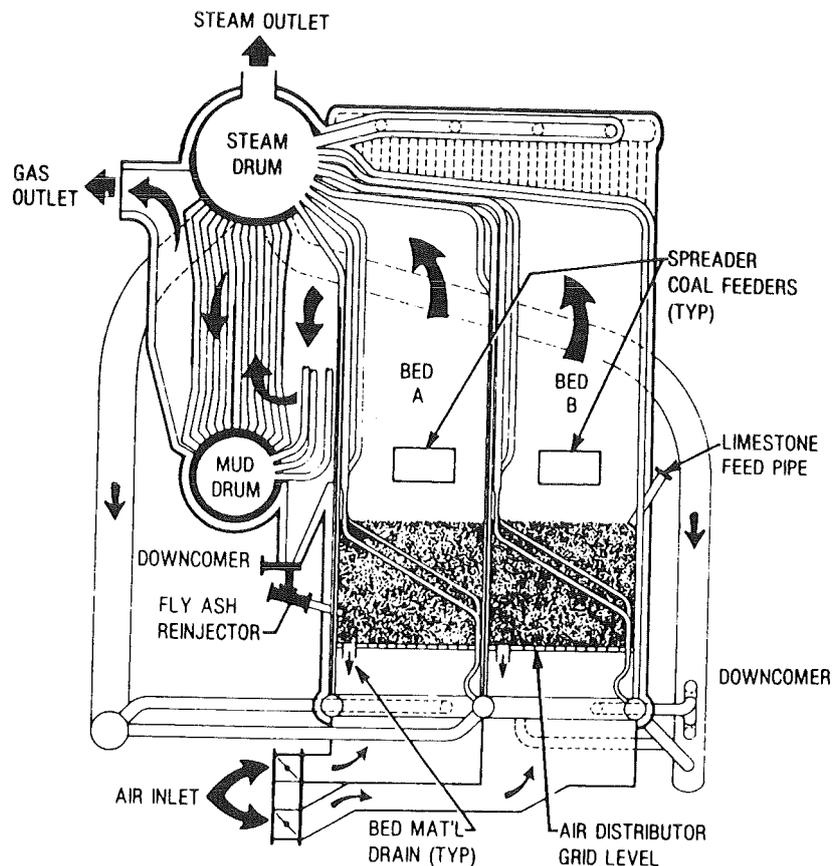


Bild 16: Kessel des Heizkraftwerkes der Georgetown Universität (13, 14)

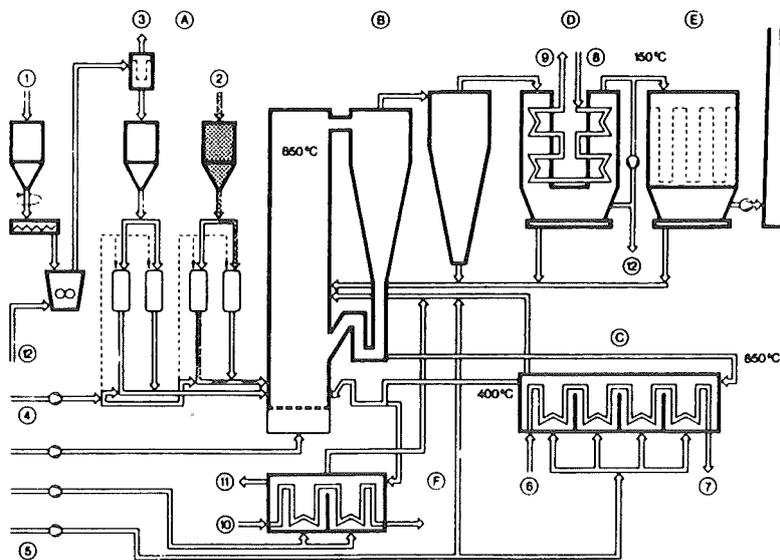
erfolgt die Ascherückführung nur in eine dieser Sektionen. Da die detaillierte Beschreibung dieser Anlage für den Einsatz der WSF in der Bundesrepublik keine wesentlichen neuen Aspekte bringt, soll darauf nicht weiter eingegangen werden.

2.7. Die Prozeßwärmanlage der Vereinigte Aluminiumwerke AG mit zirkulierender Wirbelschicht

Von gänzlich anderer Art sind jedoch die sogenannten zirkulierenden Wirbelschichtapparate (15, 16, 17), die in der Aluminiumoxid-kalzination bereits kommerziellen Eingang in die Technik gefunden haben, die aber für die Kohlefeuerung bisher noch nicht verwendet wurden. Eine Demonstrationsanlage für die Erzeugung von Dampf und Prozeßwärme mit einer therm. Leistung von 84 MW ist z. Z. im Bau bei den Vereinigten Aluminiumwerken (VAW) in Lünen (Bild 17) (16, 17, 18).

Wie bereits im ersten Abschnitt erläutert, wird bei der zirkulierenden WSF die Anströmgeschwindigkeit wesentlich höher gewählt als bei der stationären Variante. Dadurch wird die eigentliche WS in ein nicht mehr klar zu trennendes Feststoff-Gas-Zweistoffsystem überführt: der gesamte Reaktor ist von Staubstrahlen - mit nach oben hin abnehmendem Feststoffgehalt - erfüllt (Bild 3). Um den starken Materialaustrag aus der Brennkammer zu kompensieren ist ein Rückführzyklon nachgeschaltet, dessen Ablauf in einen sog. Tauchtopf mündet, aus dem der Feststoff entweder direkt oder zunächst durch einen (Wirbelschicht-) Wärmetauscher in den WSF-Reaktor zurückgeführt werden kann.

Für die ZWSF wird eine mittlere Partikelgröße von 200 - 300 μm angestrebt, die Wirbelgeschwindigkeit beträgt ca. 6 - 8 m/s. Aufgrund der sehr starken Auflockerung der Schicht ist die Feststoffdichte um etwa eine Größenordnung niedriger als bei der stationären



- | | |
|--|------------------------------|
| A Kohle/Kalkstein-Lagerung,
Mahlung, -Dosierung | 1 Kohle |
| B Wirbelschicht-Verbrennung | 2 Kalkstein |
| C Wirbelschicht-Salzerhitzung | 3 Trocknungsgas zum
Kamin |
| D Dampferzeugung | 4 Förderluft |
| E Abgasreinigung | 5 Verbrennungsluft |
| F Ascheabkühlung | 6 HT-Salz (344° C) |
| | 7 HT-Salz (425° C) |
| | 8 Speisewasser (108° C) |
| | 9 HD-Dampf 65 bar (480° C) |
| | 10 Kühlwasser |
| | 11 Asche (80° C) |
| | 12 Trocknungsgas (260° C) |

Bild 17: Fließbild der zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungsanlage der Vereinigte Aluminiumwerke AG, Lünen (17)

WS, dadurch ergibt sich der Druckverlust des Reaktors und damit die erforderliche Gebläseleistung nur von etwa gleicher Größe wie bei der stationären WS.

Für die Lünener VAW-Anlage wird der Einsatz von Ballastkohle vorgesehen mit Aschegehalten von 35 - 65 %, ≤ 2 % Schwefel und einem Heizwert von 10 000 - 18 000 kJ/kg. Die Kohle wird in einer Mahltrocknungsanlage mit rezirkuliertem Rauchgas getrocknet und auf eine Korngröße von 50 - 250 μm aufgemahlen. Auch der Kalkstein muß auf diese Korngröße aufgemahlen werden. Kohle und Kalkstein werden separat pneumatisch in die WSF-Brennkammer eindosiert. Die Brennkammer hat einen Durchmesser von 4,7 m, ist ausgemauert und enthält keine Kühlflächen. Der nachgeschaltete Rückführzyklon ist von ähnlichem Durchmesser und ebenfalls ausgemauert. Aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeit wird eine Flächenbelastung von 4,8 MW/m² Reaktorquerschnitt erzielt, allerdings wird die damit gegenüber stationären WSF verbundene Platzersparnis durch die größere Höhe der Brennkammer und die Notwendigkeit des Rückführzyklons zumindest teilweise wieder kompensiert.

Der Rückführzyklon leitet den abgeschiedenen Feststoff in einen Tauchtopf, aus dem in gesteuerter Menge ein Teil des WS-Materials in den nachgeschalteten WS-Wärmetauscher abgezogen werden kann, in dem eine Salzschnmelze erhitzt wird. Die Verbrennung wird bei 850 °C durchgeführt, die umlaufende Asche im Wärmetauscher auf ca. 400 °C abgekühlt. Ein Teil dieser abgekühlten Asche wird zur Konstanthaltung der Umlaufmenge abgezogen und in einem weiteren WS-Kühler auf 65 - 100 °C abgekühlt. Der größte Teil wird jedoch über einen (fluidisierten) Syphontopf in den Reaktor zurückgeführt. Zur Verminderung der NO_x-Emissionen wird ein Teil der Verbrennungsluft als Sekundärluft oberhalb der Kohleaufgabe in die Brennkammer eingegeben, auch die Aschekühlerluft wird als Sekundärluft in die Brennkammer geleitet. Die den Rück-

führzyklon verlassenden Rauchgase werden zunächst in einem weiteren Zyklon vorentstaubt, dann in einem zweizügigen Hochdruckdampf-Abhitzekessel gekühlt und schließlich in einem Gewebefilter feinentstaubt. Der erzeugte Dampf (480°C / 63 bar) wird im Prozeß verwendet. Die energetische Aufteilung von Dampferzeugung zu Prozeßwärme (Salzerhitzer) beträgt ca. 40 : 60.

Das Aufheizen der Brennkammer und des umlaufenden WS-Materials (Asche) erfolgt durch Gas oder ölgefeuerte Aufheizbrenner unmittelbar in die Schicht. Wegen der relativ großen aufzuheizenden Massen (Ausmauerung) ist jedoch mit erheblichen Aufheizzeiten zu rechnen.

Von besonderem Vorteil bei der ZWSF ist, daß wegen der hohen Auflockerung der Schicht auch eine gute Quervermischung gewährleistet ist und daher nur wenige Kohleaufgabestellen erforderlich sind. Außerdem kann wegen der intensiven Gas-Feststoff-Verwirbelung mit einem geringen Luftüberschuß gefahren werden. Die große Reaktorhöhe (~ 30 m) schließlich sorgt trotz der wesentlich höheren Gasgeschwindigkeiten für ausreichende Verweilzeiten, so daß der Ausbrand und die Entschwefelung sehr gut sind. Auf der anderen Seite muß jedoch berücksichtigt werden, daß außer der WS selbst der Tauchtopf und der WS-Wärmetauscher fluidisiert werden müssen, daß die Kohle und der Kalkstein fein aufgemahlen werden müssen und daß die verhältnismäßig voluminöse Bauweise den Vorteil der höheren Flächenbelastung wieder wett macht. Vermutlich wird sich der höhere Bauaufwand der ZWSF-Technik nur bei größeren Industrieanlagen bzw. mittelgroßen Kraftwerksanlagen lohnen.

Die bisher beschriebenen Konzepte der stationären und zirkulierenden WSF sind auch für Großkraftwerksanwendungen vorgeschlagen worden.

Die Realisierung derartiger Projekte wie auch der Druckwirbelschichtfeuerung für diesen Einsatz ist jedoch noch nicht unmittelbar abzusehen. Im Abschnitt 4 wird darauf näher eingegangen.

3. Emissionsaspekte

Bei der Verbrennung von Kohle, d. h. dem Umsatz der organischen und der anorganischen Substanz mit dem Sauerstoff der Luft entstehen, unabhängig vom gewählten Feuerungssystem, in geringem Maße Nebenprodukte, die teilweise in die Umwelt emittiert werden. Im Gegensatz zum einfachen technischen Aufbau einer Feuerung ist jedoch die Verbrennung selbst ein äußerst komplexer Vorgang. Das liegt nicht nur an der Art der beteiligten chemischen Reaktionen, die parallel und hintereinander, teils über radikalische oder andere instabile, teils über stabile Zwischenstufen ablaufen, sondern auch wesentlich an der Tatsache, daß Kohle eine stark heterogen aufgebaute Substanz ist, deren Zusammensetzung großen Schwankungen unterworfen ist. Eine weitere Erschwernis des Verständnisses der Vorgänge bildet die Art der Verbrennungsführung, bei der die meisten der beteiligten Reaktionen weitab vom Gleichgewichtszustand und in einem steilen Temperatur- und Konzentrationsgradienten bei oft sehr kurzen Verweilzeiten stattfinden. Die theoretische Erfassung der Schadstoffbildungsmechanismen ist daher eine besonders schwierige Aufgabe, die auch erst - jedenfalls bei der WSF - ansatzweise gelöst ist. Aus diesem Grunde können hier nur die bisher veröffentlichten Meßergebnisse der Höhe der Schadstoffemissionen wiedergegeben werden, wobei auf die mit dem Abgas ausgetragenen gasförmigen Verbindungen Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickoxide und Halogenwasserstoffe sowie auf polyaromatischen Verbindungen, Flugstaub, NO_x

und abgezogenes überschüssiges Schichtmaterial gesondert eingegangen wird. Hierbei werden wieder speziell die Randbedingungen in der Bundesrepublik Deutschland berücksichtigt.

Vor der Diskussion im einzelnen soll jedoch der Verbrennungsablauf im speziellen Falle der WSF zum besseren Verständnis kurz skizziert werden. Innerhalb der Brennkammer kann man qualitativ mehrere räumliche Bereiche unterscheiden, in denen die Verbrennung geschieht. Ganz grob kann man zwischen der Verbrennung innerhalb der WS und der sog. Nachverbrennung im Gasberuhigungsraum oberhalb der WS unterscheiden. Eine nähere Differenzierung ergibt sich, wenn man die Vorgänge am Kohlekorn in der WSF verfolgt: Durch den guten Wärmeübergang innerhalb der WS wird das Partikel sehr schnell aufgeheizt, dabei getrocknet und pyrolytisch entgast. Diese Vorgänge setzen bereits ein, noch während die Aufheizung des Kornes von seiner Oberfläche nach innen fortschreitet. Die freigesetzten Pyrolyseprodukte entzünden sich sofort und verbrennen noch innerhalb der WS. Dadurch entsteht um das entgasende Kohlekorn eine Sauerstoffverarmung, die bis zur Bildung reduzierender Zonen oberhalb der Kohleeintragsdüsen führen kann (bei Kohleeintrag in die unteren Bereiche der Schicht und ungenügender Verteilung der Kohle). Das verbleibende Koksstückchen ist jedoch wegen der relativ niedrigen Schweltemperatur und wegen seiner durch die Entgasung entstandenen hochporösen Struktur verhältnismäßig reaktionsfreudig und brennt schließlich auch selbst unter weiterer Aufheizung ab. Durch Kollisionen mit anderen WS-Partikeln und infolge der konvektiven Kühlung durch das Wirbelgas steigt die Oberflächentemperatur der brennenden Teilchen jedoch nicht um mehr als (geschätzte) 100 - 200 °C über die mittlere Schichttemperatur.

Bei monodispersen Schüttungen setzt die Fluidisierung bei einer bestimmten Anströmgeschwindigkeit ein (Winklerpunkt). Bei Erhöhung der Gasgeschwindigkeit über diesen Wert hinaus durchströmt ein Teil des Wirbelgases die Schicht in Form koaleszierender Blasen. Bei polydispersen Schüttungen, zu denen Kohle-Wirbelschichtfeuerungen schon deshalb gehören, weil durch den Abbrand eine mehr oder weniger breite Korngrößenverteilung entsteht, muß der Winklerpunkt auch für die größten Partikeln mindestens erreicht sein, um Segregation zu vermeiden. In diesen Systemen hat man daher immer Blasenbildung. Man unterscheidet daher in der WS zwischen der sog. Emulsionsphase einerseits mit hohem Feststoffanteil und überwiegend diffusivem Transport der gasförmigen Reaktanden, und der Blasenphase andererseits, mit niedrigem Feststoffanteil und starken konvektiven Anteilen am Transport der Gase. In diesen beiden (ortsveränderlichen) Reaktionszonen, zwischen denen natürlich ein intensiver Stoff- und Energieaustausch stattfindet, liegen naturgemäß verschiedene Verbrennungsbedingungen vor, die ein brennendes Kohle-/Kokspartikel bei seinem Weg durch die Schicht durchläuft. Im Gasberuhigungsraum schließlich treffen die ausgetragenen Koksteilchen eine Atmosphäre an, die verhältnismäßig sauerstoffarm und kohlendioxidreich ist und in der - je nach Anlage - häufig bereits niedrigere Temperaturen vorliegen.

In jedem dieser Bereiche findet Verbrennung statt, und jeder trägt auch zur Bildung oder Rückhaltung der Schadstoffe bei.

3.1. Kohlenmonoxid-Emissionen

Es war bereits erwähnt worden, daß bei ungenügender Kohleverteilung in der WS reduzierende Zonen entstehen können. Dies kann besonders leicht bei der Verfeuerung von Kohlen mit hohem Anteil an Flüchtigen oder großem Feinkornanteil geschehen. Es ist zu vermuten, daß das bei der Verbrennung primär gebildete CO nicht vollständig innerhalb der WS abbrennt, sondern erst oberhalb, im

Gasberuhigungsraum, nachverbrannt werden muß (19). Auch die Beobachtungen, daß bei hohen Wirbelgeschwindigkeiten ein Anstieg des CO-Gehaltes im Abgas auftritt, bei Erhöhung der Schichthöhe jedoch eine Verminderung (20), können in dieser Weise gedeutet werden.

Andere Beobachtungen sprechen jedoch dafür, daß die Hauptmenge der CO-Emissionen bei der unvollständigen Nachverbrennung ausge-tragenen Flugkokses entsteht (20, 21). Hinweise darauf ergeben sich aus der Beobachtung, daß die CO-Emission mit der Menge des ausgetragenen Flugkokses zunimmt, daß steigende Feuer-raumtemperatur (22) und zunehmende Korngröße der Einsatzkohle (20) die CO-Emission vermindern und daß in einer WSF-Anlage mit noch nicht auf Betriebstemperatur befindlichem Gasberuhigungs-raum und Abscheidezyklon zunächst relativ hohe Werte für CO im Abgas gefunden werden, die aber beim weiteren Aufheizen zurück-gehen (23). Die Rezirkulierung von Flugkoks in die WS scheint die Höhe der CO-Emission günstig zu beeinflussen (24); wahr-scheinlich, weil dadurch die Kohlenstoffkonzentration im ausge-tragenen Staub vermindert wird.

Leider sind Zahlenangaben über die Höhe der CO-Emissionen von größeren WSF-Anlagen nur vereinzelt zu finden, so daß man noch weitgehend auf Versuchsergebnisse mit halbtechnischen Feuerungen angewiesen ist. Das mag daran liegen, daß es in den USA bisher noch keine allgemeingültigen Emissionsgrenzwerte für CO gibt und daß die beobachteten CO-Werte gewöhnlich so niedrig liegen, daß sie in der Kohlenstoffbilanz nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Der Hauptverlustfaktor bei der WSF ist i. a. der Austrag an un-verbranntem Flugkoks. Die Bemühungen der Hersteller und Betreiber

von WSF-Anlagen richten sich daher vornehmlich auf die Verbesserung des Ausbrandes. Dabei wird jedoch automatisch auch die CO-Emission gesenkt (20).

Trotz der i. a. unterschiedlichen Betriebsbedingungen für WSF-Anlagen in England, USA und der Bundesrepublik Deutschland sind die in der Literatur angegebenen Werte vergleichbarer Anlagen ähnlich. Für die EPRI/B-W Versuchsanlage in Alliance, Ohio, werden für die Verfeuerung einer hochflüchtigen Steinkohle Werte zwischen ca. 105 und 325 vpm CO (bzw. auf 5 % O₂ im Abgas) genannt (24), wobei die niedrigeren Werte offenbar bei Flugascherezirkulation erhalten wurden. Die Wirbelgeschwindigkeit bei dieser Anlage lag mit 2,5 - 3 m/s allerdings recht hoch. An einer deutschen Versuchsanlage, in der eine hochflüchtige Mittelgutkohle ohne Flugascherezirkulation bei 1,5 m/s verfeuert wurde, wurden Werte von ca. 150 vpm (ebenfalls bez. auf 5 % O₂ im Abgas) gemessen (Bild 18) (21).

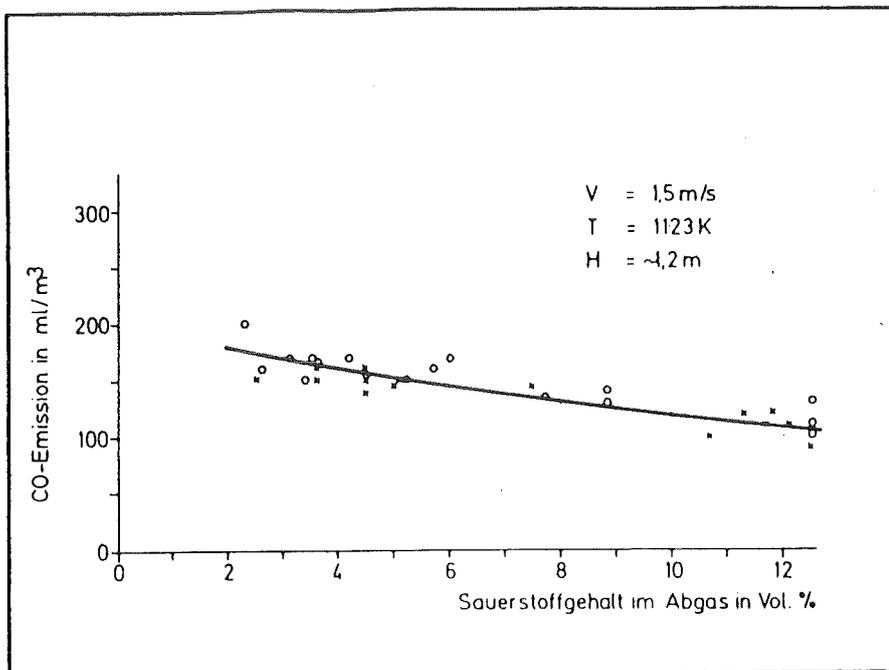


Bild 18: CO-Emission einer WSF-Versuchsanlage (21)

Die bisher erst im Vorentwurf vorliegende Neufassung der BImSchV (Verordnung über Großfeuerungsanlagen) macht erstmalig Angaben auch für Wirbelschichtfeuerungsanlagen. Nach dieser Vorschrift darf die Emission an CO im Abgas, wobei auf 5 Vol.-% O₂ im Abgas zu beziehen ist, unabhängig von der Größe der Anlage den Wert 250 mg/m³ (entsprechend etwa 195 vpm) nicht überschreiten. Bei genügender Schichthöhe, nicht zu hoher Wirbelgeschwindigkeit oder Flugascherückführung ist dieser Wert für atmosphärische Wirbelschichtfeuerung einzuhalten. Höhere Werte könnten allerdings beim Anfahren auftreten, solange die Feuerraumtemperatur und die Temperatur des Abgases der Brennkammer noch nicht ihre Betriebswerte erreicht haben. Da über diese instationären Anfahrperioden noch keine Meßwerte veröffentlicht worden sind, lassen sich keine bestimmten Aussagen über Dauer und Höhe evtl. höherer CO-Emissionen machen. Ebenso kann z. Z. noch nicht beurteilt werden, bis auf welche Werte die CO-Emission möglicherweise noch gesenkt werden kann. Der derzeitige Stand der WSF-Technik dürfte durch den Wertebereich 150 - 200 vpm CO (bez. auf 5 % O₂) korrekt erfaßt sein. Zum Vergleich: für einen neuerrichteten steinkohle-gefeuerten 700 MW-Block mit Trockenentstaubung konventioneller Bauart wird in der Literatur die Konzentration an CO im Abgas (bez. auf 6 % O₂) mit 200 mg/m³ angegeben (25), das entspricht ca. 185 vpm CO (bez. auf 5 % O₂).

3.2. Schwefeldioxid-Emissionen

Kohle enthält gewöhnlich organisch wie auch anorganisch gebundenen Schwefel, die beide bei der Verbrennung zu SO₂ (und evtl. zu SO₃) oxidiert werden. Der organisch gebundene Schwefel stammt aus der pflanzlichen Ursubstanz der Kohle und läßt sich dementsprechend

auch durch intensive aufbereiterische Maßnahmen nicht entfernen. Der anorganische Schwefel ist in den Kohlebegleitmineralien enthalten und liegt zum überwiegenden Teil als sulfidischer Schwefel vor (wichtigstes Mineral: Pyrit, FeS_2), gelegentlich finden sich jedoch geringere Mengen an sulfatischen Bestandteilen. Da die Kohlebegleitmineralien durch Aufbereitung z. T. von der organischen Kohlensubstanz abgetrennt werden, wird neben der teilweisen Entaschung auch eine mehr oder weniger große Entschwefelung bei der Kohlenwäsche erreicht. Das bedeutet umgekehrt, daß Kohlen mit hohem Ballastgehalt auch i. a. einen bez. auf den Heizwert höheren Schwefelgehalt haben. Da diese Kohlen in anderen

Feuerungsanlagen nur mit hohem Aufwand umweltneutral verbrannt werden können, werden sie besonders oft als Einsatzbrennstoff für die WSF genannt. Es versteht sich aber von selbst, daß in der WSF auch Vollwertkohlen verbrannt werden können.

Das bei der Verbrennung entstehende SO_2 wird in der WSF an alkalische Bestandteile des Schichtmaterials unter Bildung von (nicht flüchtigem) CaSO_4 gebunden. Bei Verwendung von Kohlenasche als Schichtmaterial tritt so eine mehr oder weniger starke "Selbstentschwefelung" ein (22, 26), da die Kohlenminerale unterschiedliche Mengen an Carbonatspäten enthalten (27). Unter Umständen ist dieser Effekt bei hochaschehaltigen Brennstoffen so groß, daß bereits eine SO_2 -Emissionsverminderung bis unter den vorgeschriebenen Grenzwert erreicht wird (28) .

Gewöhnlich muß jedoch zur Unterstützung der SO_2 -Einbindung Kalkstein oder Dolomit zusätzlich in die WS eingeführt werden (Bild 19). Der Kalkstein wird dabei in der WS zunächst kalziniert (entsäuert), wodurch sich erst die eigentlich aktive Komponente CaO bildet.

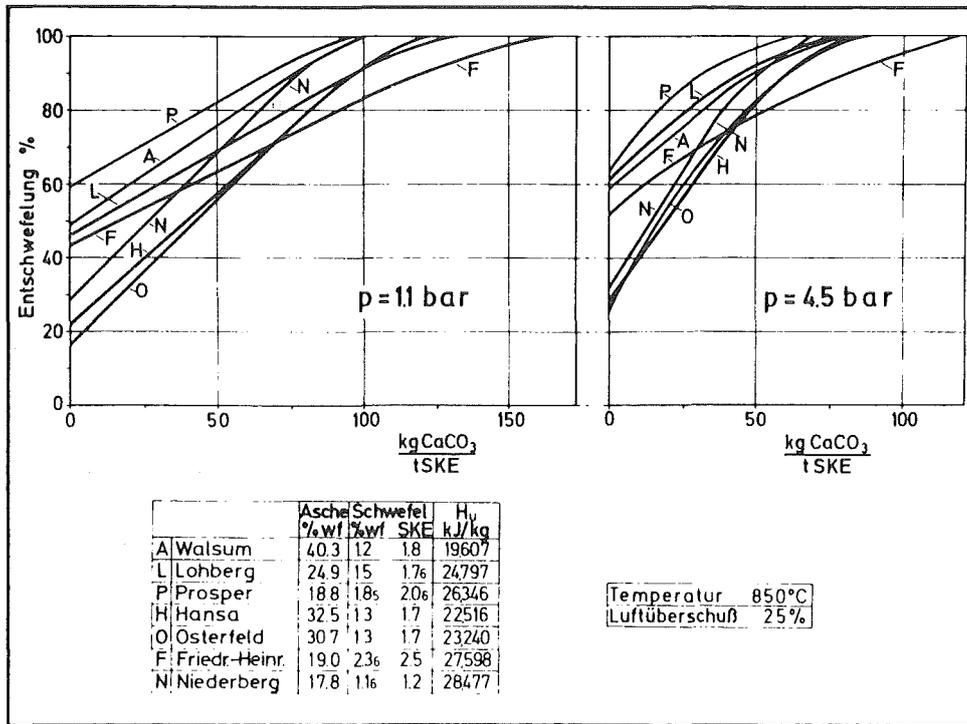


Bild 19: Entschwefelung von Ruhrgebiets-Mittelgutkohlen in Abhängigkeit von zugesetzter Kalksteinmenge und Betriebsdruck (Laborergebnisse nach 26)

Das CaO reagiert mit dem bei der Verbrennung entstandenen SO₂ unter Sauerstoffaufnahme und bildet CaSO₄. Es hat sich herausgestellt, daß die Verwendung von Kalkstein als Sorbens wirksamer ist als der unmittelbare Einsatz von Branntkalk, da dieser bei der Herstellung im Kalkbrennofen i. a. so stark erhitzt wird, daß eine Verminderung der aktiven Oberfläche eintritt. Beim Brennen des Kalksteins in der WS wird aber eine verhältnismäßig niedrige Brenntemperatur angewendet und zusätzlich eine sehr homogene Temperaturverteilung erzielt. Unter diesen schonenden Bedingungen sintert das Kalkkorn nicht, sondern behält ungefähr seine ursprüngliche (äußere) Größe, entwickelt aber ein ausgeprägtes Porensystem, das der SO₂-Sorptions zugute kommt (29, 30).

Im Bild 20 sind die Vorgänge beim Brennen und der anschließenden Sulfatierung des Kalkees schematisch dargestellt (31). Da die sich

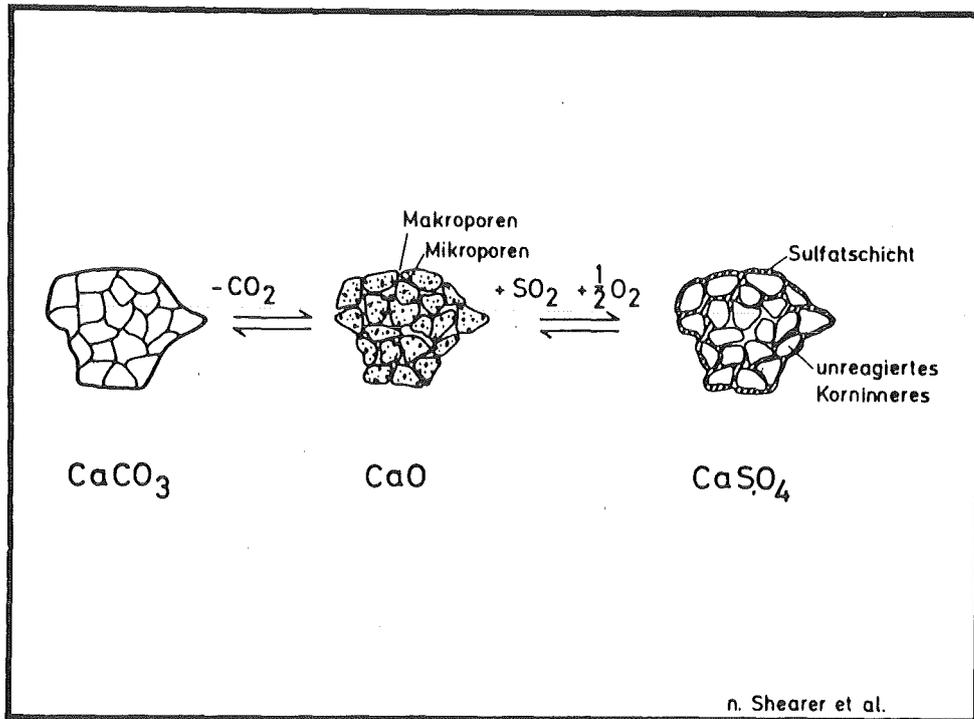


Bild 20: Schematische Darstellung der Kalzinierung und Sulfatierung eines Kalksteinkornes (31)

bildende Sulfatschicht ein größeres Molvolumen hat als das ursprünglich vorhandene CaCO₃, verstopfen die Poren des Sorbenteilchens, woraus eine unvollständige Ausnutzung des Kalksteins resultiert. Aus diesem Grunde müssen gewöhnlich überstöchiometrische Mengen an Kalkstein eingesetzt werden (Ca/S-Verhältnis > 1), um eine weitgehende Schwefeleinbindung zu erzielen. Dieser Effekt ist naturgemäß ausgeprägter bei grobem Kalkstein als bei fein aufgemahlenem Gut (32). Da jedoch feinteiliges Material mit einer Körnung unterhalb der Austragungsgrenze schnell aus der WS ausgeblasen wird, kann auch bei grobem Zuschlagsmaterial wegen der längeren

Verweilzeit in der Schicht bei geeigneter Wahl der Kalksteinkörnung eine gute Kalksteinnutzung erzielt werden (30, Bild 21).

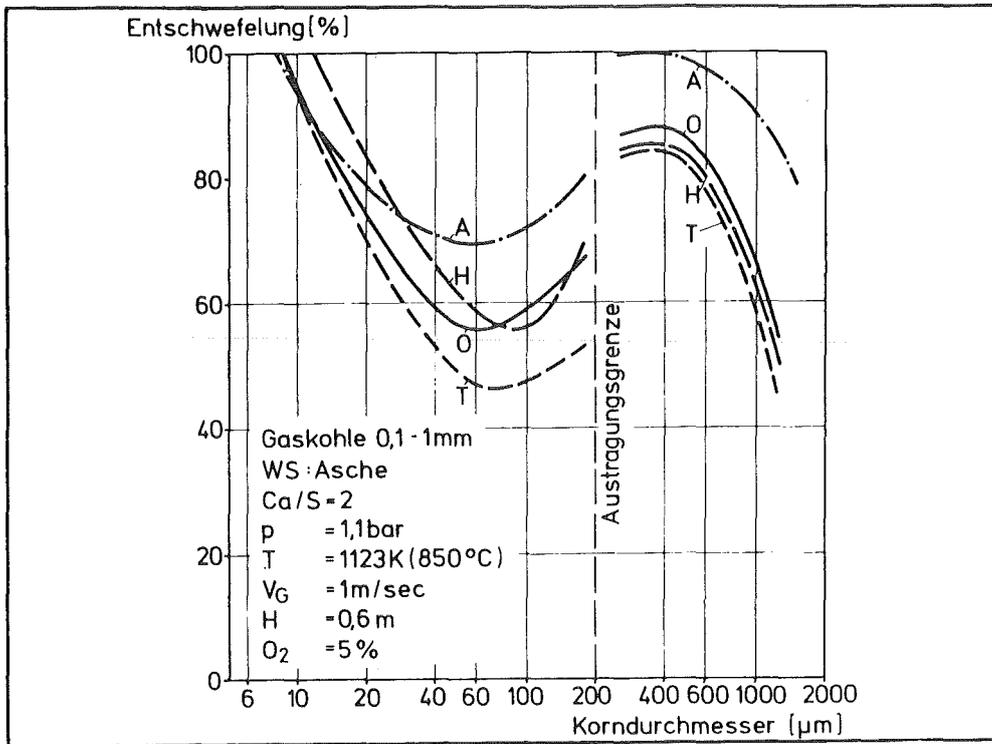


Bild 21: Abhängigkeit der Entschwefelung von der Kalksteinkörnung (30)

Die Porosität des gebrannten Kalksteins, die ein entscheidender Parameter für die Wirksamkeit des Sorbens ist, hängt aber außer von den Kalzinierungsbedingungen auch wesentlich von den Eigenschaften des ursprünglichen Kalksteins ab, insbesondere von seiner Ausgangsporosität, Reinheit und mechanischen Festigkeit (30, 32), so daß sich bei Kalksteinen unterschiedlicher Provenienz erhebliche Unterschiede im Entschwefelungsverhalten zeigen, wie dies aus dem Bild 21 hervorgeht. Auf weitere Einzelheiten dieses sehr komplexen Sachverhaltes kann hier jedoch nicht näher eingegangen werden. Es

muß aber festgehalten werden, daß die Sulfatierung des Sorbens eine verhältnismäßig langsam verlaufende Reaktion ist und daher ein intensiver und möglichst langer Kontakt zwischen Kalk und Rauchgas anzustreben ist.

Die häufig empfohlene Verwendung von Dolomit, $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, als besonders wirksames Sorbens gründet sich wohl auf die Beobachtung, daß der Dolomit leichter (d.h. bei tieferen Temperaturen) kalziniert und einige Dolomite entschwefelungsaktiver sind als manche Kalksteine. Dies gilt jedoch nicht generell (32) und liegt vermutlich daran, daß das Porensystem des gebrannten Dolomits länger offen bleibt, da das MgCO_3 zwar mitgebrannt, aber nicht sulfatiert wird (Bild 22). Bezogen auf das Ca/S-Verhältnis ergeben sich daher meist bessere Ergebnisse bei Verwendung von Dolomit; bezogen auf das in der Praxis wichtigere Massenverhältnis Zuschlag/Kohle ist dagegen die Verwendung von hochaktiven Kalksteinen i. a. günstiger.

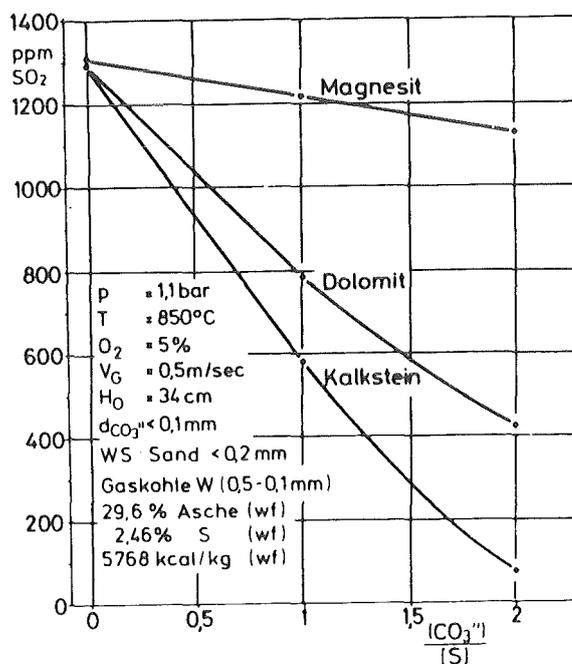


Bild 22: Vergleich der Entschwefelungswirkung von Magnesit, Dolomit und Kalkstein (26)

Die Entschwefelungswirksamkeit des Sorbens hängt jedoch außer von den Materialeigenschaften des Zuschlags selbst noch von betrieblichen Parametern und von den Eigenschaften des Brennstoffes ab. Als wichtigste betriebliche Parameter seien Druck und Temperatur der WSF genannt. Steigender Druck verbessert zwar die Sulfatierung, hemmt aber die Entsäuerung des Kalksteins. Diese gegenläufigen Effekte werden aber erst bei der druckbetriebenen WSF ausschlaggebend. Bis zu Drücken von 6 - 8 bar nimmt die Entschwefelungswirksamkeit jedenfalls erheblich mit dem Druck zu (vgl. Bild 19). Es gibt wenig verlässliche Messungen bei noch höheren Drücken, jedoch scheint zumindest beim Dolomit auch noch bis zu höheren Drücken die Entschwefelung nicht gehemmt zu sein (33). Mit steigender Temperatur durchläuft die Entschwefelungswirksamkeit von Kalkstein und Dolomit ein flaches Maximum, das bei ca. 900 °C liegt. Auch hier sind zwei gegenläufige Effekte wirksam: die Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur und die beginnende thermische Zersetzung des CaSO_4 . Da das Maximum jedoch in einem für die WSF günstigen Temperaturbereich liegt und nicht sehr stark ausgeprägt ist, braucht beim Betrieb der WSF auf die Änderung der Sorbensaktivität mit der Temperatur im interessierenden Arbeitsbereich der Feuerung i. a. wenig Rücksicht genommen zu werden.

Auch der Aufgabeort für die Kohle hat einen spürbaren Einfluß auf die erzielte Entschwefelung bei sonst fest vorgegebenen Bedingungen. Da die SO_2 -Einbindung möglichst lange Verweilzeiten benötigt, ist es günstiger, die Kohle von unten in die WS einzudosieren, damit die Verbrennungsprodukte zunächst die Schicht durchlaufen müssen und dabei intensiven Kontakt mit dem Sorbens haben. Bild 23 zeigt dazu Messungen an einer kleineren Versuchsanlage mit Aufgabe des Kohle/Kalksteingemisches von oben auf die WS und alternativ Ein-

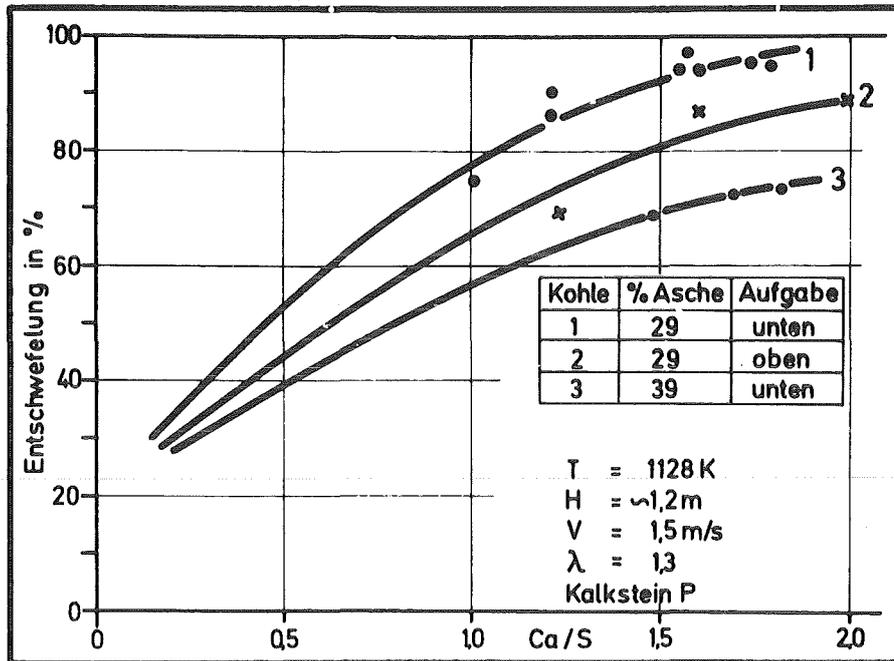


Bild 23: Vergleich der Entschwefelungswirkung bei verschiedenen Kohleaufgabeorten und Aschegehalten (34)

blasung in die untere WS-Region (34). Aus dem Bild kann auch noch ein weiterer Effekt abgelesen werden: bei Kohlen mit hohem Aschegehalt wird infolge des erhöhten Abzuges von WS-Material die Verweilzeit des Zuschlagsmaterials in der Schicht gesenkt, so daß dieses weniger weit ausreagieren kann. Die Folge davon ist, daß die Kalksteinnutzung und damit die bei gegebenem Ca/S-Verhältnis erreichbare Entschwefelung sinkt. In derartigen Fällen muß, wenn man nicht auf ein aktiveres Sorbens ausweichen will, entweder ein höheres Ca/S-Verhältnis gewählt werden, um eine hinreichend niedrige SO_2 -Emission sicherzustellen, oder der Kalkstein muß in feinerer Körnung eingesetzt werden und kann dann evtl. auch mit dem Flugstaub nochmals in die Feuerung rückgeführt werden.

Aus den gemachten Darlegungen läßt sich erkennen, daß sehr viele Faktoren die Höhe der SO_2 -Emissionen einer WSF bestimmen, in der ein schwefelbindendes Zuschlagsmaterial eingesetzt wird. Für den Betreiber einer Anlage ist neben der Erfüllung der Auflagen in erster Linie die Frage der Kosten entscheidend. Er wird daher seine Feuerung nicht notwendigerweise im technischen Optimum der niedrigsten SO_2 -Emissionen fahren und den aktivsten Kalkstein oder Dolomit einsetzen, sondern er muß neben den Anforderungen des Dampferzeugerbetriebes die Verfügbarkeit und Kosten des Zuschlages berücksichtigen und in Hinsicht auf die Deponie oder Weiterverwendung der Rückstände evtl. Körnungen wählen, die zu einer Minimierung der Kosten führen. Da beim bisherigen Versuchsbetrieb der Anlagen Flingern und König Ludwig Kalksteinkosten und Entsorgung noch nicht im Vordergrund des Interesses standen, ist eine Optimierung der Wahl des Zuschlagsmittels bisher auch noch nicht erfolgt.

In (9) wird für die Anlage König Ludwig ein Versuch mit Ballastkohle mit 1,29 % S (wf) aufgeführt, bei dem mit einem relativ groben Kalkstein (Körnung ca. 5 - 10fache Körnung der Austragsgrenze) bei einem Ca/S-Verhältnis von 2 eine Entschwefelung von 76 % erreicht wurde. Die WS-Temperatur betrug 850°C . In (11) wird - ebenfalls von der Anlage König Ludwig - ein Diagramm mit Meßwerten wiedergegeben, in dem die Entschwefelung für Vollwert- und Mittelgutkohlen wiedergegeben ist (Bild 24). Die niedrigere Schwefeleinbindung bei der Mittelgutkohle wird nicht erklärt, könnte aber durch die geringere Verweilzeit des Kalksteins in der Schicht bedingt sein und auch möglicherweise mit der etwas niedrigeren Feuerungstemperatur zusammenhängen.

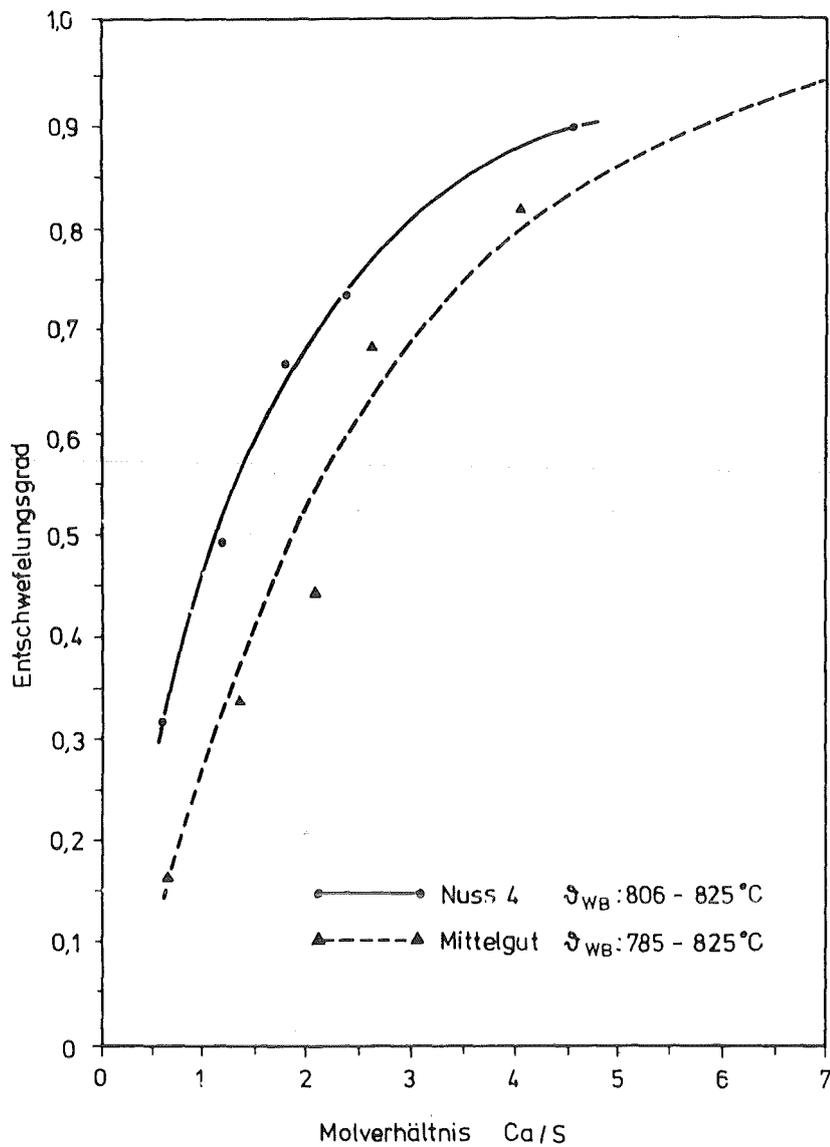


Bild 24: Versuchsergebnisse Anlage König Ludwig (11)

Die in den Anlagen König Ludwig und Flingern verfeuerten Kohlen enthielten bis zu 1,5 % S (wf) und bis zu 45 % Asche(i. roh), der niedrigste Heizwert war ca. 17 000 kJ/kg (9). Die derzeit gültigen Umweltschutzauflagen (35) fordern, daß bei Anlagen bis zu 4 TJ/h Feuerungsleistung der Schwefelgehalt der zu verfeuernden Kohle

auf das geringstmögliche Maß zu begrenzen ist. Die Forderung gilt als erfüllt, wenn Steinkohlen mit einem Schwefelgehalt von $\leq 1\%$ eingesetzt werden. Der Rechnung liegt dabei ein durchschnittlicher Heizwert der Steinkohle von 29 309 kJ/kg zugrunde. Selbst unter der (ungünstigen) Annahme, daß die in den beiden WSF-Großversuchsanlagen verfeuerte Kohle mit dem niedrigsten Heizwert auch den höchsten Schwefelgehalt gehabt hatte, läßt sich die SO_2 -Emission auf einen Wert begrenzen, der der Verfeuerung einer Kohle mit 1 % S (bez. auf 29 309 kJ/kg) entspricht, wenn eine Entschwefelung von ca. 60 % erreicht wird. Diese Forderung ist aber in beiden Anlagen problemlos erfüllt worden.

Für Großfeuerungen ($> 4 \text{ TJ/h} \hat{=} 1\,110 \text{ MW (th)}$) verlangen die geltenden Vorschriften eine Begrenzung der SO_2 -Emission auf höchstens 850 mg/m^3 (bez. auf 6 % O_2 im Abgas). Unter den obigen ungünstigen Annahmen (1,5 % S, $H_u = 17\,000 \text{ kJ/kg}$) würde eine Einbindung von etwa 83 % des Schwefels in der Schicht erforderlich werden, um die Auflagen zu erfüllen. Die bisher erst als Entwurf vorliegende neue Großfeuerungsverordnung sieht vor, die höchstzulässige Emission auf 650 mg/m^3 für Anlagen mit mehr als $500\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ Abgas ($\hat{=} 450 \text{ MW(th)}$) zu begrenzen, wobei für WSF-Anlagen auf 5 % O_2 im Abgas zu beziehen ist. In diesem Falle müßte zu 87 % entschwefelt werden, wenn die gleiche Ballastkohle wie im vorigen Beispiel verfeuert werden soll.

Derartig hohe Entschwefelungsgrade sind unter den in der Anlage König Ludwig vorliegenden Bedingungen (Bild 24) nur mit hohem Ca/S-Verhältnis zu erreichen. Durch Auswahl eines aktiveren Sorbens und Verwendung einer feineren Körnung lassen sich aber auch diese strengen Anforderungen mit tragbaren Ca/S-Verhältnissen erzielen.

Bild 25 zeigt Ergebnisse aus einer kleineren Versuchsanlage (34), in der bei einem Ca/S-Verhältnis von nur 2 eine Schwefeleinbindung von über 90 % erreicht wurde, allerdings an einer heizwertreicheren Kohle ($H_u = 28,4 \text{ MJ/kg}$; 1,74 % S (wf)).

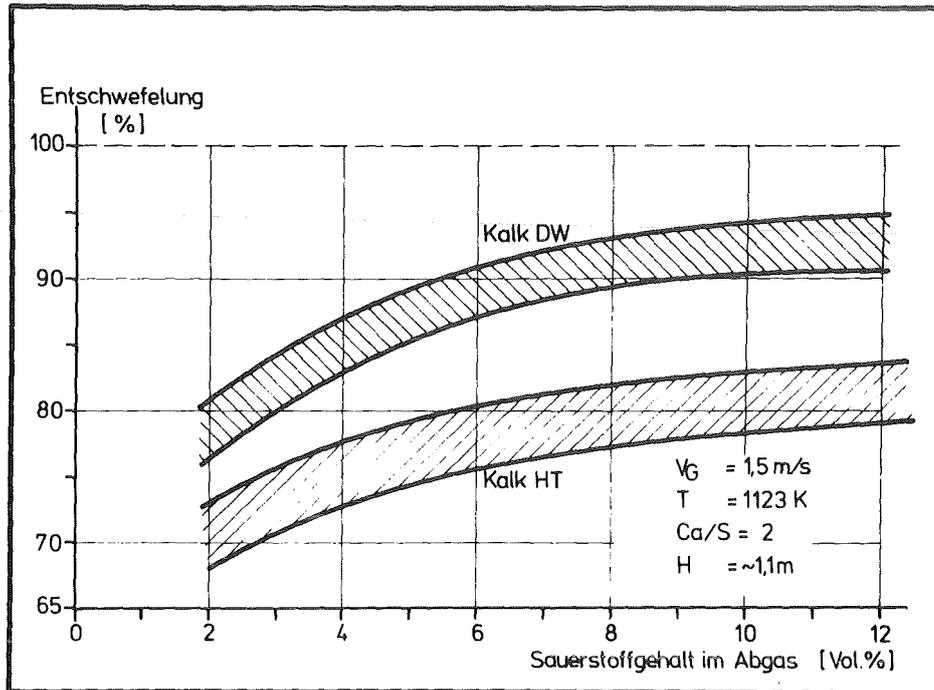


Bild 25: Entschwefelungsergebnisse einer kleineren Versuchsanlage (34)

Durch Erhöhung des Ca/S-Verhältnisses könnten diese Ergebnisse noch verbessert werden. Bei hochschwefelhaltigen Kohlen wirkt sich ein hohes Ca/S-Verhältnis allerdings recht ungünstig auf das Massenverhältnis Kalkstein/Kohle aus, es gilt nämlich:

$$\frac{(\text{Ca/S-Verh.}) \cdot (\% \text{ S})}{31,25} = \frac{t \text{ Kalkstein (100 \% CaCO}_3\text{)}}{t \text{ Einsatzkohle}}$$

d. h. bei einer Kohle mit 1,6 % S und einem Ca/S-Verhältnis von 2 benötigt man 10 Gew.-% Zuschlag pro Tonne Kohle. Der Kalkstein

ist zwar verhältnismäßig billig (ca. 25 DM/t), so daß er neben den Brennstoffkosten nicht stark ins Gewicht fällt, er muß aber zusammen mit der Asche entsorgt werden und erhöht die Rückstandsmenge nicht unbeträchtlich.

Bei Verwendung von sehr fein aufgemahlenem Kalkstein und Rückführung in die Schicht, wie es insbesondere in der ZWSF geschieht, kann die Kalksteinnutzung wesentlich verbessert werden. In einer ZWSF-Versuchsanlage wurde mit einer Ballastkohle (40,8 % Asche (wf), 1,31 % S (wf)) bei einem Ca/S-Verhältnis von nur 1,5 bei einer Feuerungstemperatur von 850 - 970 °C ein Entschwefelungsgrad von 85 % erzielt (36). Die mittlere Korngröße des Brennstoff/Kalksteingemisches betrug dabei 237 μ m.

Für die WSF-Anlage Georgetown, bei der Kohle und Kalkstein von oben auf die Schicht geworfen werden, sind dagegen recht hohe Werte für den Kalksteinbedarf genannt worden (13). Um die Auflagen im Stadtgebiet von Washington D.C. zu erfüllen (0,78 lbs SO₂/Mio BTU Einsatzkohleheizwert) mußte ein Ca/S-Verhältnis von 3,75 angewendet werden, um bei einer Kohle mit ca. 2,1 % S eine Entschwefelung von 86,6 % zu erzielen. Bei der verwendeten Kohle (Aschegehalt ca. 14,5 %) bedeutet das, daß das Schichtmaterial überwiegend aus Sorbensmaterial besteht.

3.3. Emission von Stickoxiden

Die von einer Feuerungsanlage emittierten Stickoxide sind Gemische aus Stickstoffmonoxid (NO) und dem wasserlöslichen, giftigen Stickstoffdioxid (NO₂). Da aber NO in der Luft langsam zu NO₂ aufoxidiert wird, ist bei der Festsetzung der Emissionsgrenzwerte die Gesamtstickoxidemission in NO₂ umgerechnet und als solches

bewertet worden. Das tatsächlich vorliegende Gemisch wechselnder Zusammensetzung bezeichnet man üblicherweise als NO_x .

Der Stickstoff in dem bei der Verbrennung gebildeten Stickoxid kann entweder aus der Verbrennungsluft stammen oder aus dem Brennstoff. Der Stickstoffgehalt von Kohlen ist meistens niedrig und liegt bei deutschen Kohlen zwischen ca. 1 und 2 %, er wird jedoch bei der Verbrennung nur teilweise zu Stickoxiden umgewandelt.

Je nach dem Bildungsmechanismus kann man verschiedene "Arten" von Stickoxiden unterscheiden, die als "thermisches NO", "promptes NO" und "Brennstoff-NO" bezeichnet werden. Das "thermische NO" entsteht in einer radikalischen Kettenreaktion aus Stickstoffradikalen und Sauerstoffmolekülen, bzw. Sauerstoffradikalen und Stickstoffmolekülen nach einem von Zeldowitsch zuerst näher untersuchten Mechanismus. Da der Kettenstart die thermische Dissoziation von Sauerstoff oder Stickstoff ist, sind für die Bildung von "thermischem NO" sehr hohe Temperaturen erforderlich (37), wie sie in Flammen wohl auftreten, nicht aber bei der WSF. Daher braucht diese Art des NO hier nicht weiter betrachtet zu werden. Die Abwesenheit von "thermischem NO" im Abgas einer WSF ist einer der Gründe für die niedrigen Stickoxidemissionen von WSF-Anlagen.

Beim "prompten NO" wird angenommen, daß C-haltige Radikale, die im Verlaufe der der Verbrennung vorangehenden Kohlenpyrolyse gebildet werden, die Bildung von CN-haltigen Zwischenprodukten auslösen, die ihrerseits bei genügend hoher Sauerstoffaktivität zu NO weiterreagieren können. "Promptes NO" ist auch bei der WSF zu erwarten, ebenso wie das "Brennstoff-NO", das aus N-haltigen, ebenfalls meist radikalischen Zwischenprodukten der Verbrennung bei ausreichend hoher lokaler Sauerstoffaktivität entsteht.

Diese Vorstellungen sind z. T. bereits recht weit entwickelt, soweit es um die Verbrennung in Flammen geht (38, 39), d. h. um einphasige Reaktionssysteme mit wenigstens näherungsweise berechenbaren Strömungsverhältnissen. Bei der WSF liegt aber ein mehrphasiges, inhomogenes Verbrennungssystem vor, bei dem zudem die Verbrennung in verschiedenen Bereichen mit unterschiedlichen Reaktandenkonzentrationen stattfindet. Berücksichtigt man ferner, daß die flüchtigen Bestandteile der Kohle und der Restkoks i. a. unter verschiedenen Bedingungen verbrennen und daß evtl. entstandenes NO an der Oberfläche eines aufgeheizten Koksteilchens durch überschüssigen Kohlenstoff reduziert werden kann, ergeben sich praktisch beliebig komplizierte Randbedingungen für eine theoretische, wie auch experimentelle Untersuchung der NO-Bildung und NO-Unterdrückung in der WSF. Dennoch hat es nicht an Versuchen gefehlt, auch für die Vorgänge in WSF-Brennkammern bei der NO-Bildung Modelle zu entwickeln (40). Es würde zu weit führen, auf diese Vorstellungen näher einzugehen, zumal die unmittelbare Übertragung auf technische WSF-Anlagen noch nicht möglich ist. Stattdessen sollen einige gut gesicherte experimentelle Befunde wiedergegeben werden, die eine rohe Abschätzung der Emissionseinflüsse gestatten.

Im Temperaturbereich von ca. 750 - 950 °C wurde eine deutliche Zunahme der Höhe der NO-Emission einer WSF mit der Schichttemperatur gefunden (20, 22). Steigender Luftüberschuß bewirkt ebenfalls eine Zunahme der NO-Konzentration im Abgas (9, 11, 20, 22). Bild 26 zeigt die Meßwerte, die an der Anlage König Ludwig gewonnen wurden (11), Bild 27 solche, die an einer kleineren Versuchsanlage erhalten wurden (34, 20). Beide Bilder zeigen, daß bei einem Luftüberschuß entsprechend 5 % O₂ im Abgas die NO-Emission

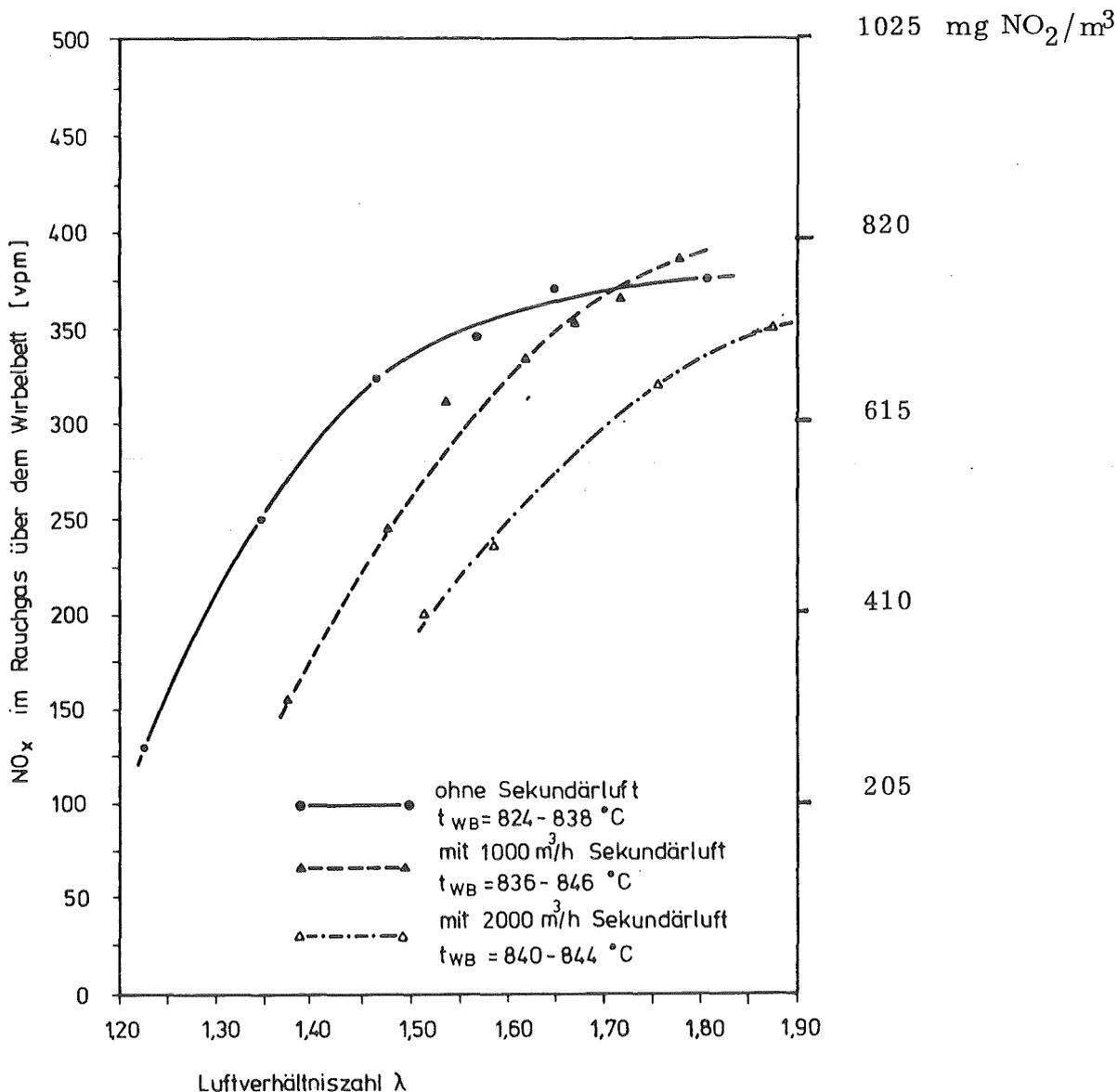


Bild 26: Stickoxidemission der Anlage König Ludwig (11)

einer WS-Anlage typisch bei ca. 200 - 250 vp.m im stationären Betrieb liegt. Die Schwankungsbreite liegt je nach Kohle und Betriebsweise bei ca. 120 - 400 vp.m. Aus dem Bild 26 kann man weiterhin entnehmen, daß die Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft zu einer deutlichen Senkung der Emissionen führt (22, 26).

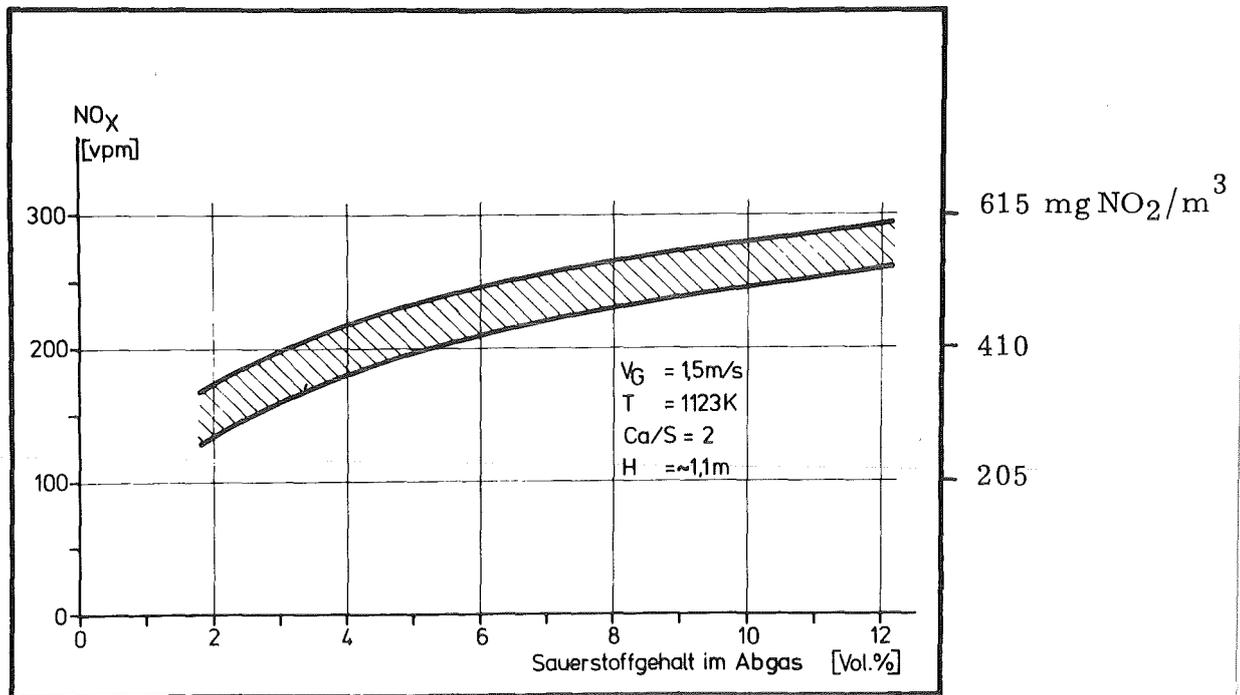


Bild 27: NO_x-Emissionsverlauf einer kleinen Versuchsanlage (34)

Welche Werte hier für die stationäre WSF zu erreichen sind, ist noch nicht ausreichend erprobt. Es besteht das Dilemma, daß einmal die Bildung reduzierender Zonen in der Schicht vermieden werden muß, um Korrosion vorzubeugen, daß ein höherer Gesamtluftüberschuß andererseits aber zu höherem Abgasverlust führt und im übrigen einer Senkung der NO-Emission entgegenwirkt. Für die ZWSF, bei der die Luftsteuerung einfacher zu sein scheint, werden aus Tests in einer kleineren Versuchsanlage Werte von 90 - 100 vpm bei Anwendung von Sekundärluft berichtet (36).

Auf eine Besonderheit, die die Interpretation von Meßwerten zur NO-Emission erschwert, muß speziell hingewiesen werden: die Senkung der SO₂-Emission durch Zusatz von Sorbens führt zu einem spürbaren Ansteigen der NO-Emission (22). Dieser gegenläufige

Trend ist auch von konventionellen Flammenfeuerungen bekannt, wenn Brennstoffe unterschiedlichen Schwefelgehaltes eingesetzt werden. Die Ursache für dieses Verhalten ist jedoch noch nicht geklärt; es wird vermutet, daß das NO die Oxidation von SO₂ begünstigt und dabei selbst (z. T.) reduziert wird (26). Bei der Minimierung der Gesamtschadstoffemission einer WS-Feuerung muß dieser Effekt besonders beachtet werden.

Ein weiterer Betriebsparameter, der die NO-Emission einer WSF beeinflusst, ist die Gasverweilzeit innerhalb der Schicht (22), die sich als Quotient aus Schichthöhe und Anströmgeschwindigkeit er rechnen läßt. Eine größere Verweilzeit erhöht auch die gebildete NO-Menge. Da dieser Effekt nicht besonders stark ausgeprägt ist und der Verweilzeiteinfluß auf die SO₂-Emission gerade umgekehrt wirkt, ist die Deutung der Meßergebnisse in dieser Hinsicht, wie bereits erwähnt, nicht immer einfach durchzuführen.

Die Anwendung höheren Verbrennungsdruckes wirkt sich günstig auf die Senkung der NO-Emissionen aus WSF aus (22, 26, 41), und zwar besteht offenbar Proportionalität zwischen dem Überdruck und der Senkung der NO-Emission. Da bisher aber nur relativ wenige vergleichbare, zuverlässige Messungen vorliegen, kann noch nicht abgesehen werden, welche Emissionswerte typischerweise erzielt werden können. Auch beim Druckbetrieb wird bei Anwendung der Stufenverbrennung nochmals eine Reduzierung des NO-Ausstoßes erreicht (22).

Während die geltenden Umweltschutzbestimmungen zur Höhe der zulässigen NO_x-Emission einer Feuerung keine konkreten Angaben machen und lediglich die bestverfügbare Technik fordern, sieht

der Vorentwurf der Großfeuerungsverordnung Grenzwerte vor, die je nach Feuerungstechnik unterschiedlich hoch angesetzt sind. Für Wirbelschichtfeuerungen für Kohle wird der Wert für Stickoxide, angegeben als Stickstoffdioxid, auf 700 mg/m^3 beziffert, bez. auf 5 % O_2 im Abgas (entsprechend 341 vpm NO_x). Nach den zuvor angegebenen Meßergebnissen läßt sich dieser Grenzwert beim Betrieb von WSF im Normalfalle einhalten und wird bei günstigen Betriebsbedingungen sogar erheblich unterschritten.

Das Bild 28 zeigt in einer Übersicht die Wirkung verschiedener Einflußparameter auf die spezifischen Emissionen, wobei je nach Steilheit und Form des Pfeils die Größe und der Verlauf des zugehörigen Parameters auf die Emission qualitativ dargestellt ist. Ein waagerechter Verlauf des Pfeils deutet auf Invarianz gegenüber dem betreffenden Parameter hin (20).

Parameter Bereich (Standard)	MW m ²	%C- Verlust	g CO kWh	g SO ₂ kWh	g NO ₂ kWh
Druck 1 → 4,5 bar (1,1 bar)	↗	↘	↘	↘	↘
Temperatur 750 → 950 °C (850 °C)	→	↘	↘	↘	↗
Luftüberschuß 0,5 → 12% O ₂ i Abgas (5%)	↘	↘	→	→	↗
Anströmgeschwindigkeit 0,3 → 1,5 m/sec (1 m/sec)	↗	↗	→	↗	↘
Schichthöhe (fluidisiert) 0,2 → 1,2 m (0,8 m)	→	↘	↘	↘	→
Sekundärluft 0 → 66 % (0)	→	↘	↘	→	↘
Ca / S 0 → 3 mol/mol (1)	→	→	→	↘	→
Korngröße Kohle 0 → 2 mm (0,1-1 mm)	→	↘	↘	→	→
Korngröße Kalkstein 0 → 2 mm (0-0,1 mm)	→	→	→	↘	→

Bild 28: Einfluß verschiedener Betriebsparameter auf die Emissionen (Laborergebnisse) (20)

3.4. Halogenwasserstoffverbindungen

Steinkohle enthält Halogen lediglich in der Mineralsubstanz, hier vorwiegend in den Tonmineralen, die mehr als 70 % der Gesamtmineralsubstanz ausmachen. Auch in den Carbonatmineralen der Kohle sind Halogene als Spurenverunreinigung enthalten. Für die WSF ist dieser Umstand von besonderer Bedeutung, da zur Entschwefelung der Rauchgase der Einsatzkohle i. a. beträchtliche Mengen an Carbonatfremdmineralen, meist Kalkstein oder Dolomit, zugeschlagen werden, die ebenfalls Halogene enthalten und damit die prinzipiell emittierbare Menge vergrößern. Ansonsten ist speziell Fluor noch in Apatit und Turmalin enthalten, die in geringerer Menge in der Kohle vorkommen. Brom und Jod kommen in Kohlen praktisch nicht vor. Während das Fluor im wesentlichen strukturell in die Minerale eingebunden ist, wird ein Teil des Chlors, das z.B. als Natriumchlorid vorliegt, adsorptiv an die Tonminerale und die Kohlesubstanz gebunden. Beim Erhitzen auf 800 - 900 °C, wie es in der WSF geschieht, wird das adsorptiv gebundene Chlor völlig freigesetzt, strukturell gebundenes Chlor und Fluor werden dagegen offensichtlich nur z.T. abgegeben (42), wobei jedoch die Tatsache, daß die Asche nicht sintert, der Ausdampfung der Halogene aus den Tonmineralen förderlich ist. Die Halogene werden aber nicht als freie Elemente abgegeben, sondern reagieren mit anderen Reaktionskomponenten unter Bildung mehr oder weniger flüchtiger Halogenide. Insbesondere die Reaktion mit Wasserdampf (aus der Verbrennung oder aus verdampfter Oberflächenfeuchtigkeit bzw. Kristallwasser immer vorhanden) führt zur Bildung von flüchtigem Halogenwasserstoff, der mit den Rauchgasen aus der Verbrennungszone abgeführt wird. Daneben können sich flüchtige Metallhalogenide bilden, die als "Rauch" im heißen Rauchgas enthalten sind. Es gibt aber An-

zeichen dafür, daß das CaO (aus dem Zuschlagsmaterial oder aus den Carbonatmineralen der Steinkohle) neben dem SO₂ auch einen Teil des Fluors und des Chlors bindet (43). Beim Fluor bildet sich CaF₂, das sich erst bei 1 300 - 1 400 °C zersetzt (42), beim Chlor können sich aus CaSO₄ und NaCl oder CaCl₂ Eutektika bilden, die sehr niedrige Schmelzpunkte haben und daher die Ausdampfung von HCl zumindest verzögern (43).

Aber auch die aus der WS mit dem Rauchgas ausgetragenen Halogenwasserstoffe und flüchtigen Metallhalogenide werden nicht vollständig aus der Anlage emittiert, sondern können auf dem Wege durch die kälteren Anlagenteile entweder niedergeschlagen werden (durch Kondensation (Rauch) oder "Getterung"), oder durch Reaktion mit Flugasche, die i. a. noch erhebliche Mengen CaO enthält, gebunden werden. Dies wird durch Analysen von Flugstäuben aus konventionellen Kraftwerken bestätigt, die eine erhebliche Anreicherung an Fluor aufweisen (42), aber auch von WSF-Flugstaub, bei dem sowohl Chlor als auch Fluor im Flugstaub angereichert waren (43).

Leider gibt es noch keine umfangreichen Untersuchungen über die Höhe der Rückhaltung der Halogenverbindungen bei der WSF. Erste Messungen (11, 20, 44, 45) zeigen allerdings, daß von den in den Einsatzstoffen ursprünglich vorhandenen Gehalten an Chlor und Fluor bereits ohne zusätzliche Maßnahmen nur geringe Mengen emittiert werden.

Da der Fluorgehalt der Kohle, wie erwähnt, in der Mineralsubstanz enthalten ist, wird klar, daß hochaschehaltige Kohlen höheren Fluorgehalt haben als Vollwertkohlen. Nach (42) besteht ein fast linearer Zusammenhang zwischen dem Fluorgehalt von Ruhrkohlen und dem Aschegehalt. Die Asche selbst enthält demnach ca. 600 - 900 ppm F.

Der Vorentwurf der Großfeuerungsverordnung sieht vor, daß Feuerungsanlagen mit einem Volumenstrom an Abgas bis einschließlich $500\,000\text{ m}^3/\text{h}$ einen Höchstwert der Emission an anorganischen gasförmigen Fluorverbindungen, gerechnet als Fluorid, von $30\text{ mg}/\text{m}^3$ nicht überschreiten dürfen, wobei für WSF-Anlagen wieder auf $5\% \text{ O}_2$ im Abgas zu beziehen ist. Größere Anlagen dürfen nicht mehr als $15\text{ mg F}^-/\text{m}^3$ emittieren. Unter der Annahme, daß sämtliches Fluor als HF emittiert würde, entspräche der Grenzwert von $30\text{ mg}/\text{m}^3$ ($15\text{ mg}/\text{m}^3$) einem noch zulässigen F-Gehalt der Kohle von 300 ppm (150 ppm). Bei allgemeiner Gültigkeit der oben erwähnten linearen Beziehung entspricht das einem Aschegehalt der Rohkohle von 32 - 50 % (16 - 25 %). Wenn sich die Beobachtungen bestätigen, daß der größte Teil des Fluors nicht aus einer WSF-Anlage emittiert wird, ergeben sich somit praktisch keinerlei Beschränkungen hinsichtlich des Einsatzbrennstoffes. Für eine endgültige Aussage reichen die heute verfügbaren Kenntnisse jedoch noch nicht aus.

Da der Chlorgehalt der Rohkohle zu einem großen Teil durch adsorptiv gebundene Verbindungen und Salze bestimmt wird, ergibt sich bei der (nassen) Kohlenwäsche i. a. bereits eine Verminderung des Cl-Gehaltes. Es läßt sich aber auch für die Rohkohle keine allgemeine Korrelation zwischen Chlorgehalt und anderen Eigenschaften angeben, so daß dessen Konzentration wechselt, i. a. aber Werte von 0,2 % nicht übersteigt.

Der Vorentwurf für Großfeuerungen sieht als Emissionsgrenzwert für Anlagen mit bis zu (über) $500\,000\text{ m}^3/\text{h}$ Abgas für gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorid und bei WSF bezogen auf $5\% \text{ O}_2$ im Abgas, $200\text{ mg}/\text{m}^3$ ($100\text{ mg}/\text{m}^3$) vor.

Unter der Annahme wiederum, daß der Gesamtchlorgehalt als HCl emittiert würde, entspräche das einem höchstzulässigen Chlorgehalt der Kohle von 0,2 % (0,1 %). Da aufgrund der ersten vorliegenden, mehr orientierenden Ergebnisse zur Einbindung von Chlorwasserstoff in den Flugstaub, bzw. Rückhaltung in der Schicht noch keine Angaben über die Größe dieses Effektes gemacht werden können, zumal erwartet werden muß, daß dieser auch stark bauartabhängig sein wird, läßt sich auch noch nicht sagen, um wieviel die Emission einer WSF-Anlage unter dem vorgesehenen Grenzwert bleiben wird.

3.5. Polyaromatische Verbindungen

Die polyaromatischen Verbindungen - im Schrifttum häufig PAH (polynuclear aromatic hydrocarbons) oder allgemeiner PAC (polynuclear aromatic compounds) bzw. POM (polynuclear organic matter) genannt - sind im Rahmen von Emissionsbetrachtungen von besonderem Interesse, da einige dieser Verbindungen bekanntermaßen carcinogene Eigenschaften haben. Anfänglich wurde bei der Untersuchung der polyaromatischen Verbindungen nur das Benzo(a)-pyren erfaßt; es wird, obwohl inzwischen bekannt ist, daß andere Verbindungen als höher carcinogen eingestuft werden müssen, noch heute als eine Art "Leitsubstanz" aufgeführt. Der Grund für diese vereinfachte Behandlung des Untersuchungskomplexes dürfte in den außerordentlichen Schwierigkeiten der Analytik dieser Verbindungen und in der großen Anzahl verschiedener Spezies zu suchen sein.

Erste Messungen der Konzentration polyaromatischer Verbindungen aus WSF (46) haben gezeigt, daß diese in der Größenordnung von einigen ng/m^3 (i.N.) zu liegen scheinen. Derartig niedrige

Konzentrationen verlangen bereits i. a. sehr hohen analytischen Aufwand zu ihrem Nachweis. Die darauffolgende Bestimmung der nachgewiesenen Spezies erfolgt häufig noch indirekt (durch Vergleich mit Standards), erst in wenigen Untersuchungen auch direkt (durch hochauflösende Massenspektroskopie (47 - 51)). Als Analysentrennverfahren dient gewöhnlich die Gaschromatographie, wobei als Detektor Flammenionisation oder Massenspektroskopie eingesetzt werden. In beiden Fällen beträgt die Nachweisgrenze ca. 10^{-10} g. Da jedoch die Analysenmenge für die Gaschromatographie auf ca. $10 \mu\text{l}$ beschränkt ist, ist die erfassbare Grenzkonzentration dadurch auf 10^{-2} g/m^3 festgelegt (51). Um also polycyclische Verbindungen im Abgas einer WSF nachzuweisen, ist eine Voranreicherung um den Faktor $\sim 10^7$ erforderlich. Das geschieht üblicherweise dadurch, daß eine aliquote Rauchgasmenge isokinetisch aus dem Abgaskanal abgezogen und durch ein Filter geleitet wird, auf dem sich die zu analysierenden Stoffe niederschlagen. In dieser Art sind eine Reihe von Analysenverfahren erarbeitet worden, nach denen in Deutschland allerdings vorwiegend die Emissionen von Kleinf Feuerstätten untersucht worden sind (47 - 50). Der der eigentlichen Analyse vorangehende Anreicherungsprozeß bringt es aber mit sich, daß gleich mehrere Fehlerquellen auftreten, deren Auswirkungen schlecht abgeschätzt werden können. Durch die Anreicherung auf dem Filter werden die niedergeschlagenen polyaromatischen Verbindungen in aufkonzentrierter Form und häufig bei höherer Temperatur längere Zeit dem Rauchgas und seinen Bestandteilen besonders intensiv ausgesetzt. Zum Beispiel ergibt sich bei einer NO-Konzentration von ca. 300 mg/m^3 im Abgas ein ca. 10^7 -facher molarer Überschuß gegenüber den Aromaten, so daß eine chemische Veränderung nicht unwahrscheinlich ist. Auch kann bei der Adsorption der

organischen Substanz auf dem Filter und der anschließenden Desorption durch Extraktion oder Verdampfung, sowie bei der Verdampfung im Gaschromatographen Substanz verloren gehen oder chemisch verändert werden (51 - 53). Ferner können bei der Aufarbeitung der Probe durch die verwendeten Chemikalien und Geräte, incl. Sammelfilter, oder auch aus der Umgebung leicht Spuren von organischem Material eingeschleppt werden, die zu Analysenverfälschungen führen können (47). Aus diesen Gründen bemüht sich das Argonne National Laboratory seit einigen Jahren darum, eine on-line Meßmethodik für polycyclische Aromaten zu entwickeln, die speziell für Untersuchungen an WSF eingesetzt werden soll (51).

Die bisher vorliegenden Meßergebnisse bzgl. organischer Substanzen im Abgas von WSF stammen ausnahmslos aus USA. Das Argonne Nat'l Lab. (51) untersucht im Auftrage des US-Energieministeriums an eigenen Laborapparaturen, die sowohl atmosphärisch als auch unter Überdruck betrieben werden. Obwohl die angestrebte on-line Meßapparatur noch nicht betriebsreif ist, wurden schon Messungen in konventioneller Weise durchgeführt, wobei besonders auch der (instationäre) Anfahrbetrieb mit untersucht wurde. Das Inhalation Toxicology Res. Inst. (52, 53) führt seine Arbeiten ebenfalls im Auftrage des Energieministeriums durch, aber an einer größeren halbtechnischen Anlage des Morgantown Energy Research Centers. Die GCA Corp. (54) schließlich nimmt für die Environmental Protection Agency Messungen an existierenden Großversuchsanlagen vor.

Alle diese Untersuchungen werden durch die beschriebenen analytischen Schwierigkeiten in nicht zu übersehendem Maße verfälscht,

jedoch sind sich die Arbeitsgruppen dieser Problematik bewußt und interpretieren ihre Ergebnisse entsprechend vorsichtig. Da die Emissionen selbst aber von der Art der Kohle, den konstruktiven Gegebenheiten der WSF und den Betriebsbedingungen abhängen, die in den verschiedenen Untersuchungen nicht vergleichbar waren, lassen sich die absoluten Zahlenwerte kaum sinnvoll miteinander in Beziehung setzen. Jedoch lassen sich den drei Quellen die folgenden gemeinsamen Trends entnehmen.

- Die Höhe der Emissionen von mehrkernigen Aromaten aus Wirbelschichten ist von höchstens gleicher Größenordnung wie bei großen kohlenstaubgefeuerten Anlagen und beträgt (als Summe) $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Mehr als 90 % der emittierten organischen Substanz liegt in der Gasphase vor, der Rest ist auf emittiertem Staub kondensiert (vgl. Bild 29).
- Mehr als 100 organische Substanzen wurden im Abgas von WSF identifiziert.
- Bio-assays ergaben keine mutagene Wirkung bei den als Gase emittierten Substanzen, schwach mutagene Wirkung bei den an Stäube adsorbierten organischen Verbindungen; carcinogene Wirkungen wurden nicht festgestellt.
- Die absolute Menge an emittierten organischen Verbindungen ist im Anfahrbetrieb um ein Vielfaches höher als im stationären Betrieb einer WSF, aber immer noch sehr gering.
- Auch die Flugasche aus Anfahrphasen zeigte keinerlei carcinogene Wirkung im Tierversuch.

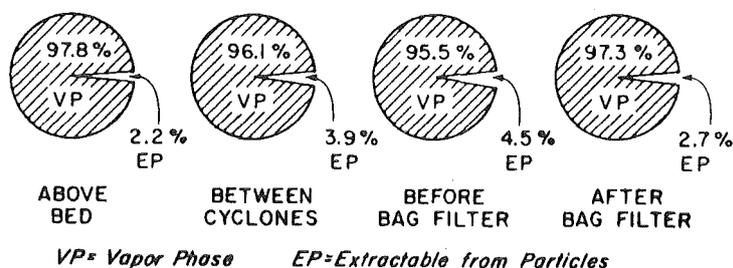


Bild 29: Anteile der Kohlenwasserstoffverbindungen im Abgas einer WSF (bei Verfeuerung von texanischer Braunkohle) in der Gasphase und adsorbiert an Flugstaub (53)

Die Emission organischer Verbindungen resultiert, ebenso wie die Emission von Kohlenmonoxid, aus der unvollständigen Verbrennung der Kohle und wird daher durch die gleichen Parameter beeinflusst, die auch den Ausbrand bestimmen (vgl. Bild 28). Da der Ausbrand eine die Wärmewirtschaft bestimmende Größe ist und auch die Kesselkorrosion beeinflusst, liegt die Erzielung möglichst hoher Ausbrandwerte und damit niedriger Emissionen von CO und organischen Kohlenstoffverbindungen im eigenen Interesse der Kesselbetreiber und wird daher sorgfältig überwacht. Die Forderung der Wirkungsforschung, die Emission potentiell carcinogener organischer Verbindungen so weit wie möglich zu vermindern, wird daher bei WSF, wie die vorliegenden Meßergebnisse zeigen, ohne zusätzliche Maßnahmen weitestgehend erfüllt.

Die TA Luft macht keine expliziten Angaben zu einer Emissionsbegrenzung für mehrkernige Aromaten. Da aber für die CO-Emission ein Höchstwert festgelegt worden ist, der auch leicht überwacht werden kann, wird damit indirekt auch die Emission an organischen Verbindungen so niedrig wie möglich gehalten.

3.6. Staubförmige Emissionen

Die Emission staubförmiger Bestandteile mit dem Abgas aus einer WSF-Anlage zeigt keine prinzipiell neuen Aspekte verglichen zu konventionellen Feuerungssystemen. Die Stäube unterscheiden sich aber von denen anderer Kohlenfeuerungen in zweierlei Hinsicht. Erstens ist durch den Zuschlag an schwefelbindendem Kalkstein oder Dolomit zum Brennstoff in jedem Falle ein mehr oder weniger großer Gehalt an Ca SO_4 und unreaktiertem Ca O (bzw. entsprechender Produkte aus Dolomit) im Flugstaub enthalten, der die Eigenschaften und damit das Verhalten der Stäube sowohl im Filter als auch nach der Abscheidung, aber auch der nicht abgeschiedenen und mit dem Reingas ausgetragenen Fraktionen bestimmt. Der Gehalt an aus dem Sorbens stammenden Stoffen im Flugstaub kann in gewissen Grenzen durch Auswahl der Korngröße des Zuschlagsmaterials gesteuert, aber niemals ganz vermieden werden. Der zweite wesentliche Unterschied zu anderen Flugstäuben liegt in der niedrigen Feuerraumtemperatur begründet, die bewirkt, daß die Flugasche nicht wie sonst üblich in Form stark gesinterter oder geschmolzener Kügelchen vorliegt, sondern als nur leicht versinterte unregelmäßig geformte Partikeln, die häufig eine Schichtenstruktur aufweisen (53, 55). Inwieweit sich diese unterschiedlichen morphologischen Eigenschaften der Flugstäube aus WSF und konventionellen Feuerungen günstig oder ungünstig auswirken, ist noch nicht geklärt. Messungen haben gezeigt, daß die Flugstaubpartikeln aus WSF mit einer dünnen Wasserhaut bedeckt sind, wodurch vermutlich die Kondensation organischer Dämpfe behindert, jedoch die von SO_2 begünstigt wird (53).

Die üblicherweise starke Entschwefelung der Rauchgase von WSF-Anlagen bringt es mit sich, daß der Staub bei den konventionellen

Abgastemperaturen sehr hohen elektrischen Widerstand aufweist und daher im konventionellen Elektroabscheider nur unzureichend entfernt wird. Zur Entstaubung müssen daher Gewebefilter eingesetzt werden, oder die elektrische Abscheidung muß bei höheren Temperaturen, z.B. vor dem Luvo erfolgen (56). Beide Systeme haben hohe Abscheidewirksamkeit auch für Feinstäube mit Korngrößen $< 1 \mu\text{m}$ (57). Die erreichbaren Reingasstaubgehalte sind sehr niedrig und liegen bei ca. $10 - 50 \text{ mg/m}^3$ (58, 59, 60). Damit sind auch die Anforderungen des Vorentwurfs der Großfeuerungsverordnung zu erfüllen, die bei Anlagen für feste Brennstoffe Emissionsgrenzwerte für Stäube in Höhe von $50 - 300 \text{ mg/m}^3$ je nach Anlagengröße vorsehen. Für Wirbelschichtanlagen ist hierbei auf einen Volumengehalt von O_2 im Abgas von 5 % zu beziehen.

Im Zusammenhang mit der Emission von Stäuben ist die Frage des Gehaltes dieser Teilchen an Spurenelementen von besonderem Interesse. Der Entwurf der neuen Großfeuerungsverordnung enthält hier einen besonderen Absatz, der besagt, daß die staubförmigen Emissionen an As, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, P, Pb, Se, Te, Tl, U und V und deren Verbindungen nicht größer als 1 mg/m^3 sein dürfen.

Die genannten Stoffe werden, mit Ausnahme des Hg, i. a. nicht elementar emittiert, sondern als Bestandteile sehr unterschiedlicher Verbindungen, die ihrerseits häufig als Gemische vorliegen. Die Wirkung der Spurenelemente ist daher in erster Linie nicht von ihrer absoluten Konzentration, sondern von der Art ihrer chemischen Verbindung abhängig, so daß zur chemischen Analyse die Phasenanalyse hinzukommen müßte, um Schlüsse über die Umwelteinwirkungen der emittierten Stäube machen zu können (61). Durch ein solches Vorgehen würden der bisher schon außerordentlich

hohe Aufwand und die beträchtlichen analytischen Schwierigkeiten der Spurenanalyse wesentlich gesteigert, so daß, wohl aus Gründen der Vereinfachung, die vorgesehene, nicht ganz sachadäquate Formulierung im Entwurf der Großfeuerungsverordnung vorgeschlagen worden ist.

Kirsch et al. (55) haben die Herkunft von ca. 50 der wichtigsten Spurenelemente der Steinkohle untersucht (Bild 30). Der über-

in Tonmineralen (strukturell und adsorptiv gebunden) Koalinit, Illit, Hydromuskovit, Sericit	As, B, Be, Bi, Br, Cd, Cl, Cs, Co, Cr, F, Ga, Ge, In, J, Li, Mn, Ni, P, Pb, Rb, S, Sc, Se, Ti, Tl, U, V, Zn
in Carbonatmineralen und Kalksteinen	As, Ba, Be, Bi, Cd, Cl, Co, Cu, F, Hg, K, Mn, Ni, Mo, P, Pb, Rb, S, Sr, Ti, U, V, Zn
in Pyriten und Markasiten	Ag, As, Au, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Ni, Ru, Se, Te, Tl, V, Zn
als Sulfide, Arsenide, Telluride und Selenide in der Kohle fein verteilt	Ag, Au, Bi, Cd, Co, Cu, Ga, Ge, Hg, In, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Tl, V, W, Zn, As, S, Se, Te
im Quarz	B, Ga, Ge, Li, Mn, Ni, Ti, Zn
in Kalifeldspäten ($KAlSi_3O_8$) und Kalknatronfeldspäten	B, Ba, Co, Cr, Cu, Ga, Li, Mn, Ni, P, Pb, Rb, Sr, Ti, V, Zn
in Eisenoxiden und Eisenhydroxiden (Fe_2O_3 , α - $FeOOH$, γ - $FeOOH$, Fe_3O_4)	Ce, Co, Cr, Cu, In, Mn, Ni, P, Sb, Ti, U, V, Zn, (Se?)
in Apatiten ($Ca_5(OH, F)(PO_4)_3$)	Ce, F, La, Nd, Sr
in Zirkonen ($ZrSiO_4$)	Hf, Nb, P, Ta, Th, U, Y
in Turmalinen ($Al_2(OH)_4(BO_3)_3Si_6O_{10}$)	B, Cr, F, Li, Mn, Ti, V
in organischer Bindung in der Reihenfolge der vermuteten Häufigkeit	Ge, Be, Ga, Ti, B, V, Ni, Cr, Co, Y, Mo, Cu u.a.

Bild 30: Herkunft der Spurenelemente in den Steinkohlen (55)

wiegende Teil stammt aus der Mineralsubstanz der Kohle, macht davon aber nur etwa 1 % aus. Da die Tonminerale meist mehr als 70 % der nichtverbrennlichen Substanz der Kohle ausmachen, sind sie auch als Hauptlieferant der meisten Spurenelemente anzusehen und bestimmen mit ihrem Verhalten in der Feuerung wesentlich die Emissionen.

Beim Erhitzen der Kohle auf die Verbrennungstemperatur geben die Tonminerale das in ihnen enthaltene Wasser ab. Gleichzeitig werden Halogene freigesetzt und in Halogenwasserstoff umgewandelt. Durch die Wasserabgabe nimmt aber die innere Oberfläche der Tonminerale stark ab, die schichtartig aufgebaute Mineralstruktur verdichtet sich und schließt dadurch einen Teil der grundsätzlich freisetzbaren Spurenelemente ein, die dann nicht mehr oder nur noch wesentlich erschwert abdampfen können (55).

Eine andere, wenn auch mengenmäßig wesentlich kleinere Quelle von Spurenelementen in der Kohle sind die Chalkogenide, die häufig auch Arsenide enthalten. Durch den Sauerstoff der Verbrennungsluft werden diese Verbindungen geröstet, d.h. in die entsprechenden Oxide überführt, die z. T. bei Feuerraumtemperatur flüchtig sind und daher in oder auf der Flugasche angereichert werden. Es wird vermutet, daß ein Teil der auf diese Weise entstehenden Oxide auch so fein verteilt vorliegt, daß sie in Form von "Rauch" mit dem Abgas aus der Brennkammer transportiert werden. Allerdings ist die zumindest teilweise Einbindung dieser Rauche oder gasförmigen Verbindungen, wie auch des i. a. elementar vorliegenden Quecksilbers durch das sich bildende Ca SO_4 wahrscheinlich (55), da die Keimbildungsarbeit für die Entstehung

kristalliner Festkörper an der Oberfläche der außerordentlich porösen Sorbenspartikeln stark erniedrigt ist. Genauere Untersuchungen der Höhe dieser Effekte stehen aber noch aus.

In einer amerikanischen Untersuchung wurde jedoch festgestellt, daß die Verteilung der Spurenelemente in WSF-Stäuben nicht grundsätzlich anders ist als bei konventionellen Kohlestaubfeuerungen (53). Im Bild 31 sind die Meßergebnisse dieser Studie ⁺⁾ wiedergegeben. Es zeigt sich, daß die WSF-Flugasche i. a. niedrigere

	Elemental Particle Concentrations ($\mu\text{g/g}$)			
	This Study		Literature Values (Range)	
	Stack Breech Ash ^a	AFBC Ash (Range) ^b	FBC Ash	PCC Ash
Sb	1.4	1.4 - 6.9	2.5 - 8.9	2.8 - 94
As	17	1.5 - 20	< 0.1 - 52	15 - 440
Be	1.9	1.0 - 6.8		12
Cr	88	23 - 490	69 - 880	40 - 900
Cu	22	22 - 120	150 - 250	40 - 2800
Pb	24	9.3 - 70	20 - 85	< 5 - 650
Ni	29	14 - 150	100 - 120	6 - 1000
Se	6.8	0.56- 56		4.1 - 500
Ag	-	0.11- 0.22		0.35 - 36
Tl	< 0.63	0.22- 11		< 0.6 - 4.5
Zn	53	25 - 120	80 - 360	20 - 3500

^aAverage of two filter samples.

^bRange of values obtained for filters from each sampling position and hopper samples.

Bild 31: Konzentrationen einiger Spurenelemente in Flugstäuben aus Wirbelschichtanlagen und Staubfeuerungen (53)

⁺⁾ Da parallel durchgeführte Versuche an Staubfeuerungen und WSF bislang fehlen, sind "vergleichbare" Daten zusammengestellt. Es handelt sich aber offenbar nicht jeweils um die gleiche Kohle

Spurenelementgehalte aufweisen. Wenn man auch die Absolutwerte der Spurenelementkonzentrationen wegen der anders zusammengesetzten amerikanischen Kohlen nicht direkt auf deutsche Verhältnisse übertragen kann, so wird aber der Trend, daß bei der WSF eine geringere Anreicherung an Spurenelementen in der Flugasche auftritt als bei anderen Kohlenfeuerungen auch bei uns gelten. Ein Vergleich der Meßergebnisse von Kirsch et al. (55) mit früheren Messungen bei Staubfeuerungen in Deutschland (62) deutet sogar auf wesentlich niedrigere Spurenelementkonzentrationen in WSF-Flugstäuben hin. Tests, die eine evtl. Zellschädigung von Flugstäuben nachweisen sollten, zeigten gleiche minimale Wirkung für WSF-Stäube und andere Kraftwerksstäube (53, 63). Auch bei Atemtests (Goldhamster) zeigten sich keine lungenschädigenden Wirkungen von Stäuben aus WSF, vielmehr verhielten sie sich bezüglich der Rückhaltung und Verteilung in der Lunge ähnlich wie andere inerte Stäube (53).

Ausgehend von der im Entwurf der Großfeuerungsverordnung geforderten Emissionsgrenze von weniger als 1 mg/m^3 der zuvor genannten Spurenelemente und unter Berücksichtigung der im Bild 31 aufgeführten höchsten Konzentration eines Schwermetalls im Flugstaub (Cr mit $880 \mu\text{g/g}$) ergibt sich, daß erst bei einem Flugstaubgehalt von $> 1 \text{ g/m}^3$ im Abgas der Grenzwert in diesem ungünstigsten Falle erreicht würde. Da aber selbst für Anlagen mit weniger als $50\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ an Abgas die Obergrenze der Staubemission auf 300 mg/m^3 festgelegt ist, tritt eine unzulässig hohe Spurenelementemission nicht auf.

Bei dieser Betrachtung sind die gasförmig emittierten Spurenelemente nicht mit erfaßt worden, da sie in den Staubanalysen nicht

oder nicht vollständig mitbestimmt werden. Hochflüchtige Verbindungen bilden vor allem die Halogene, deren Emission in einem besonderen Abschnitt behandelt wurde. Als wichtigstes weiteres Element ist Quecksilber zu nennen, das im Elementarzustand einen verhältnismäßig hohen Dampfdruck aufweist und sich als Metaldampf verflüchtigt. Während ältere Angaben für Staubfeuerungen die Emission auf bis zu 90 % des mit dem Brennstoff eingebrachten Quecksilbers beziffern (64), gehen neuere Messungen von einer Rückhaltung von 60 % bei Staubfeuerungen (65) und von 53 % bei WSF (66) aus. Auch für einige andere Spurenelemente, wie z.B. Selen, wurden ältere, relativ hohe Angaben des Anteils, der gasförmig emittiert wird, in neueren Arbeiten niedriger angesetzt. Offenbar sind die analytischen Schwierigkeiten, die häufig keine geschlossene Stoffbilanz ermöglichen, für diese Diskrepanzen verantwortlich. Nach Angaben von Kautz et al. (62) beträgt der Mittelwert der Konzentration von Hg in in Deutschland verfeuerten Kohlen aber nur etwa 0,5 ppm (Maximalwert 1,5 ppm), die mittlere Konzentration von Se ca. 2 ppm (Maximalwert ca. 4,5 ppm). Selbst bei der pessimistischen Annahme vollständiger Verdampfung des Hg würde der vorgeschlagene Emissionsgrenzwert, wenn er auch auf die gasförmigen Emissionen bezogen wird, nicht annähernd erreicht; gleiches gilt für Se.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß weder durch staubförmige noch durch gasförmige Emissionen aus kohlegefeuerten WSF eine unzulässig hohe Abgabe von Spurenelementen an die Umgebung erfolgt. Die schwedische Studie (65) kommt denn auch zu dem Schluß, daß der Beitrag der Kohlefeuerung generell, selbst bei verstärktem Kohleeinsatz, zur Immission an Spurenelementen nur wenig beiträgt und nur von untergeordneter Bedeutung sowohl für Wälder wie auch für Ackerland ist.

3.7. Rückstände

3.7.1. Besonderheiten der WSF-Rückstände im Vergleich zu konventionellen Kohlenaschen

Die bei der WSF verbleibenden Rückstände bestehen zum einen aus der Kohlenasche, d.h. den Reaktionsprodukten, die aus der Mineralsubstanz der Kohle mit der Verbrennungsluft bei Feuerungstemperatur entstanden sind, zum anderen aus den Reaktionsprodukten des meistens zugeschlagenen Sorbensmaterials (Kalkstein oder Dolomit), die aber mit der Kohlenasche so innig vermengt vorliegen, daß eine Auftrennung i. a. nicht möglich sein wird. Zusätzlich enthalten die Rückstände noch Unverbranntes, d.h. Koks-partikeln, die mit dem Flugstaub aus der Feuerung ausge-tragen worden sind, oder Brennstoffreste, die mit dem überschüssigen WS-Material aus der Feuerung abgezogen worden sind. Die Rückstände fallen in den Rauchgasentstaubungsorganen staubförmig, in Umlenkungen oder Zyklonen im Rauchgasweg feinkörnig und als abgezogenes überschüssiges Schichtmaterial relativ grobkörnig an. Je nach Art und Sorte der verwendeten Kohle und des Zuschlags-materials, sowie der Betriebsbedingungen der WSF können die jeweiligen Mengen der Rückstände beträchtlich schwanken und auch ihre Eigenschaften weitgehend verschieden sein. Bei der Verfeuerung von Vollwertkohlen oder anderen aschearmen Brennstoffen, fällt häufig überhaupt kein überschüssiges Schichtmaterial an, d.h. die gesamte Kohlenasche wird ausge-tragen; u. U. muß sogar Inert-material zugeschlagen werden, um die Schichthöhe halten zu können. Aber auch bei aschereichen Brennstoffen, wie Mittelgut, gibt es einzelne Fälle, in denen die Asche vollständig mit dem Rauchgas ausge-tragen wird. Gewöhnlich wird man in diesen Fällen jedoch überschüssiges Schichtmaterial, d.h. Asche und Zuschlagsmaterial abziehen müssen. Dieses abgezogene Material hat die gleiche Zusammensetzung wie das Schichtmaterial. Da der Kohlenstoffgehalt

der WS im stationären Betrieb selbst bei Vollast der Anlage i. a. höchstens etwa 1 % beträgt, ist der dadurch entstehende C-Verlust vernachlässigbar klein und auch die Eigenschaften des Rückstandes werden dadurch nicht wesentlich bestimmt. Das Körnungsband dieses Gutes reicht von der Größe der Einsatzkohle bis herab zu einigen Zehntel mm (Austragungsgrenze). Je nach Wahl der Körnung des Zuschlagsmaterials und je nach dessen Festigkeit verbleiben wechselnde Mengen an gebranntem und sulfatiertem Sorbens in der Schicht. Im Grenzfall, daß feinkörniges Sorbens eingesetzt wird, das vollständig ausgetragen wird, enthält das Schichtmaterial nur sehr geringe Mengen an Sorbensprodukten - nicht mehr als wenige Prozent.

Die in den Umlenkungen zwischen den Rauchgaszügen oder im Grobentstaubungszyklon anfallende Flugasche enthält außer feinteiligen Aschepartikeln und ausgetragenen Sorbens zusätzlich unverbrannten Flugkoks, der z. B. einen Anteil von 10 - 20 % dieser Flugasche ausmachen kann. Nach (19) ist besonders die Brennstofffraktion zwischen ca. 10 und 150 μm unvollständig ausgebrannt und in der Flugasche enthalten, die deswegen zur Verbesserung des Ausbrandes meistens in die Brennkammer zurückgeführt wird. Nach (20) gilt entsprechendes auch für das Zuschlagsmaterial, d. h. die feinteiligen Sorbenspartikeln mit ungenügender Verweilzeit in der Schicht sind auch besonders unvollständig sulfatiert. Allerdings wird die Situation hier überlagert durch abgeriebene, bzw. abgeplatzte Sulfatschichten groberer Sorbenspartikeln, so daß das Verhältnis von unverbrauchtem Sorbens zu vollständig sulfatiertem Material in der Flugasche zwar etwas größer ist als im Filterstaub, aber doch nicht von anderer Größenordnung. Die Korngröße der im Zyklon anfallenden Flugasche beträgt ca. 5 - 200 μm (Austragungsgrenze).

Der im Filter abgeschiedene Flugstaub ist ein mehlfines Produkt, das i. a. wieder wesentlich kohlenstoffärmer ist, als die Flugasche, so daß eine Rückführung nicht lohnt. Bei Verwendung von grobem Zuschlagsmaterial ist auch der Anteil an CaO und CaSO₄ relativ gering, da nur Abrieb bzw. Kornzerfall aus der Brennkammer ausgetragen wird. Der Filterstaub ist daher, ebenso wie die Flugasche niemals frei von Sorbensprodukten, jedoch kann der Anteil bis auf wenige Prozent begrenzt werden.

Um die Mengenverhältnisse von Schichtasche, Flugasche und Filterstaub an einem Beispiel zu erläutern, sei angenommen, daß bei der Verfeuerung von Mittelgutkohle mit ca. 30 % Asche und Zusatz von 10 % des Kohlegewichts an Kalkstein (bei einem Schwefelgehalt der Kohle von 1,6 % entspricht das einem Ca/S-Verhältnis von 2) etwa 30 % des Rückstandes als Schichtasche anfällt, der Rest sich auf Flugasche und Filterstaub verteilt. Es sei weiterhin ein Kohlenstoffumsatz von 95 % angenommen, und auf eine Rückführung der Flugasche werde verzichtet. Bei einer weiterhin vorausgesetzten Wirksamkeit des Zyklons (einschließlich evtl. Rauchgasumleitungen etc.) von 90 % und einer Schwefelbindung von 80 % (entsprechend einer SO₂-Emission von 810 mg/m³), beträgt die Gesamtmasse der anorganischen Rückstände 38,8 % des Einsatzkohlegewichts. Von dieser Menge verbleiben 116,4 kg je t Einsatzkohle als Schichtasche, mit einem angenommenen C-Gehalt von 0,5 % (= 580 g) und 270,7 kg Flugasche werden je t Einsatzkohle im Zyklon abgeschieden, die noch ca. 10,5 % C (= 28,3 kg) enthalten. Im Filter fallen 30,1 kg Flugstaub je t Kohle an, die z. B. noch 3 % C (= 900 g) enthalten sollen. Aus den zugeschlagenen 100 kg Kalkstein werden 33,6 kg CaO und 54,4 kg CaSO₄, deren Verteilung über die drei

Rückstandsfractionen weitgehend willkürlich beeinflußt werden kann. Werden alle drei Fraktionen wieder zusammengeführt und z. B. gemeinsam deponiert, so beträgt der Anteil an CaO 8 %, der an CaSO₄ 13 % ($\hat{=}$ 7,7 % SO₃) und der Kohlenstoffgehalt 7,1 %.

Diese Abschätzung, deren Annahmen recht willkürlich - wenn auch nicht unrealistisch - gemacht wurden, soll nur einen Eindruck von den anfallenden Rückstandsmengen und ihrer möglichen Verteilung vermitteln. Zur Entsorgung der bei der Verfeuerung von Kohlen anfallenden Rückstände bieten sich zwei Möglichkeiten an: die Weiterverwendung und die Deponie. Da aber von den bisher betriebenen Anlagen noch zu wenig, bzw. zu unregelmäßig Rückstände geliefert wurden, sind erst sporadisch Untersuchungen zu beiden Entsorgungskonzepten angestellt worden.

3.7.2. Weiterverwendungsmöglichkeiten und Deponie

Hinsichtlich der Weiterverwendung ist vor allem vorgeschlagen worden, in der Bauindustrie in Anlehnung an den bisher schon praktizierten Einsatz von Aschen aus Kohlenfeuerungen Anwendungsmöglichkeiten zu finden. Wegen des Gehalts an gebranntem Kalk ist für die WSF-Asche besonders die Zugabe zu Beton, entweder als Zuschlagsmaterial (grobkörnig) oder als Zusatzmaterial (feinkörnig und ohne glasige Bestandteile) vorgeschlagen (67, 68, 69), oder der Einsatz zur Herstellung von Bindern bzw. Steinen erprobt worden (70 - 72). Die Anforderungen an Bauhilfsmittel auf Aschebasis werden in (73) näher beschrieben, Versuche zur Herstellung von Zement aus Flugaschen (allerdings solchen aus konventionellen Kohlenfeuerungen) in (74). Die Verwendung der Rückstände als Zugabematerial für Beton oder Binder wird möglicherweise aber dadurch eingeschränkt, daß der Kohlenstoffgehalt für solche Zuschläge 5 % nicht überschreiten darf und daß der Gehalt an Sulfat i. a. 4 % nicht überschreiten darf.

Als andere Verwendungsmöglichkeiten sind der Einsatz als Füllstoffe z.B. zur Wärmedämmung im Bauwesen, zur Bindung von Bitumen im Teerbau oder als Stabilisator für Sandbetten im Straßenbau vorgeschlagen worden (67, 75), daneben sind die Verwendung als Neutralisationsmittel für saure Deponiemassen und als Kalklieferant in der Landwirtschaft (76 - 79) bereits erprobt worden.

Insbesondere bei den letzteren Untersuchungen stellte sich heraus, daß entgegen manchen Befürchtungen i. a. keine signifikante Anreicherung an Schwermetallen in den Pflanzen beobachtet wurde, daß aber bestimmte nährstoffarme Böden sogar deutlich verbessert wurden, da mit dem WSF-Rückstand Ca und Mg (bei Verwendung von Dolomit als Sorbens) in den Boden eingebracht wurden, die in sauren Böden oft abgereichert sind. Für einzelne Pflanzensorten zeigten sich hinsichtlich der Schwermetallaufnahme leichte Änderungen gegenüber solchen, die auf mit Hydratkalk behandelten Kontrollflächen angebaut wurden. Jedoch waren die beobachteten Verschiebungen der Metallkonzentration in beiden Richtungen klein und in jedem Falle unbedenklich. Es fehlen jedoch noch Langzeiterfahrungen mit der wiederholten Anwendung des Einsatzes von WSF-Aschen als Kalkungsmittel.

Wenn auch die Weiterverwendung der WSF-Rückstände in jeder Hinsicht wünschenswert ist, so dürfte es dennoch unumgänglich sein, daß zumindest ein Teil der anfallenden Reststoffe deponiert werden muß. In diesem Zusammenhang ist die Frage der Abgabe von Schadstoffen aus der Deponie durch Auslaugung von Interesse. Auch hierzu sind, vor allem in USA, umfangreiche Arbeiten erschienen (77, 80). In der Bundesrepublik Deutschland sind Unter-

suchungen mit Müllaschen (81) und Braunkohlenaschen (82) durchgeführt worden, deren Ergebnisse in gewissem Maße auf WSF-Aschen übertragen werden können, da auch diese Rückstände z.T. alkalisch reagieren.

Für WSF-Rückstände kommen als durch Wasser oder wässrige Lösungen auslaugbare Substanzen nur anorganische Verbindungen, insbesondere Salze und Oxide in Frage. Der überstöchiometrische Zusatz von Kalkstein oder Dolomit zur Bindung des Schwefels bewirkt, daß das Eluat von WSF-Rückständen einen hohen pH-Wert aufweist, daß die Konzentrationen von Ca und SO_4 verhältnismäßig hoch liegen und der Abdampfrückstand durch den Gehalt gelöster Salze groß ist. Die Beobachtungen haben aber gezeigt, daß der Gehalt an gelösten Stoffen mit zunehmender Eluierung schnell abnimmt und die Ca und SO_4 -Konzentration Grenzwerten zustreben, die offenbar dem stationären Lösungsgleichgewicht entsprechen, das seinerseits von der Wasserdurchlässigkeit der Probe abhängt (80, 81).

Die Wasserdurchlässigkeit einer Deponie kann durch verschiedene Maßnahmen vermindert werden. Häufig gibt es natürliche Standorte, bei denen eine Schicht aus relativ wasserundurchlässigem Ton eine Kontamination des Grundwassers ausschließt oder zumindest stark vermindert. Die abschwächende Wirkung einer solchen Tonschicht wurde in USA gezielt untersucht (77, 80). Durch den Gehalt an gebranntem Kalk hat der WSF-Rückstand aber auch ein großes chemisches Wasseraufnahmevermögen, das bei Wasserzugabe zu Quellung und Rekristallisation führt. Dadurch tritt eine Verfestigung des Materials mit Abnahme der Wasserdurchlässigkeit auf. In (82) wird sogar (für ähnlich zusammengesetzte Braunkohlenaschen) vorgeschlagen, die Rückstände vor der Ablagerung mit

Wasser anzuteigen und durch Vibration nachzuverdichten. Auf diese Weise wurde eine Verminderung der Wasserdurchlässigkeit um bis zu vier Zehnerpotenzen erreicht. Auch in (77) und (81) wird vorgeschlagen Rückstände durch Verfestigung weniger wasserlöslich zu machen. Auf diese Weise kann man zu einer weitgehend wasserdichten Deponie kommen. Niederschlagswasser würde dann an der Oberfläche ablaufen und nicht mehr durch das abgelagerte Material sickern.

Der stark basische Charakter hat aber noch einen weiteren Einfluß auf die Eluierbarkeit der WSF-Rückstände. Die meisten Schwermetalle und viele weitere Spurenelemente werden in basischen Rückständen in Form schwerlöslicher Hydroxide fixiert und dadurch auch bei stärkerer Durchflutung der Deponie nur in sehr geringem Maße ausgelaugt (65, 77, 80, 81).

Sun und Peterson haben Untersuchungen an WSF-Eluaten durchgeführt und die gefundenen Konzentrationen gelöster Stoffe und einige zusätzliche Parameter mit den in USA geltenden Trinkwasserstandards (DWS) verglichen (77). Dabei stellte sich heraus, daß lediglich die SO_4 -Konzentration, der pH-Wert und der Abdampfrückstand (TDS) die Anforderungen an Wasser des Trinkwasserstandards der zweiten Stufe (NSDWR) überschreiten, der Anforderungen der ersten Stufe (NIPDWR) werden aber voll erfüllt (Bild 32). Da die Auslaugung unter besonders rigorosen Bedingungen vorgenommen wurde ("worst case"), wird geschlossen, daß die Ablagerung von WSF-Rückständen auf einer geordneten Deponie unbedenklich in Hinsicht auf die Veränderung der Wasserqualität ist. Erst beim Überschreiten des 10-fachen Wertes der Standards wird nach amerikanischen Recht eine Behandlung als Sondermüll gefordert.

Substance	FBC Leachate, mg/l	DWS, mg/l	
		NIPDWR	NSDWR
Al	0 to > 2		
Ag	< 0.05	0.05	
As	< 0.05	0.05	
B	0 to > 5		
Ba	< 1	1.0	
Be	< 0.02		
Bi	< 0.04		
Ca	> 500		
Cd	< 0.01	0.01	
Co	< 0.1		
Cr	< 0.05	0.05	
Cu	< 1		1.0
Fe	< 0.3		0.3
Hg	< 0.002	0.002	
Mg	< 30		
Mn	< 0.05		0.05
Mo	< 5		
Na	0 to > 100		
Ni	< 0.1		
Pb	< 0.05	0.05	
Sb	< 0.5		
Se	< 0.01	0.01	
Si	0 to 30		
Sn	< 1.0		
Sr	0 to > 10		
Ti	< 2		
V	< 1		
Zn	< 3		5.0
Zr	< 1		
SO ₃	< 10		
SO ₄	1000-2000		250
Cl	< 250		250
F	< 2.4	2.4	
NO ₃ (as N)	< 10	10.0	
TOC	< 30		
pH	8 to 12		6.5-8.5
TDS	2000 to 4000		500
Specific Conductance millimho/cm	0.5 to 10.0		
Color	None		15 color units
Odor	None		3 threshold odor number
Foaming Agents	None		0.5
Radioactivity	Not determined	5 pCi/l Ra 226 & 228	
Biological Activity	None	4 coliform/100 ml	

▨ - exceeds DWS

Bild 32: Vergleich eines Eluates von WSF-Rückständen mit den Anforderungen des US-Trinkwasserstandards (77)

Für die deutschen Versuchsanlagen sind seitens der Genehmigungsbehörden hinsichtlich der Deponie der Rückstände aufgrund entsprechender Voruntersuchungen keine besonderen Anforderungen gestellt worden. Ein Teil der Rückstände wurde aber bereits im Straßen- und Teerbau weiterverwendet (83).

4. Mittelfristige Einsatzmöglichkeiten und realisierbare Konzepte der Wirbelschichtfeuerung

In den Abschnitten 1 und 2 sind bereits die Eigenschaften der WSF und einige bisher gebaute Anlagen beschrieben worden. Aus diesen Angaben lassen sich die mittelfristig realisierbaren Möglichkeiten für die Verfeuerung von Kohle mit dieser Technik ableiten. Grundsätzlich kann man 4 Bereiche unterscheiden, in denen WSF-Anlagen in entsprechend angepaßter Form Einsatz finden werden:

- mittelgroße Anlagen in Industrie- oder Heiz(-kraft-)werken, zur effektiven, umweltfreundlichen **Strom- und Wärme**erzeugung aus Kohle
- kleinere Anlagen zur Dampferzeugung für Gewerbe- und Kleinindustriebetriebe, zur Wärmeerzeugung für Verwaltungsgebäude, Nahwärmesysteme, Kleinheiz(-kraft-)zentralen, etc.
- Großkraftwerke, die voraussichtlich modular aufgebaut sein werden und z.B. mehrere WSF-Einheiten mittlerer Größe umfassen können und schließlich
- Verbrennungsanlagen für Rückstände und minderwertige Brennstoffe, zur wirtschaftlichen, umweltfreundlichen Beseitigung oder Konditionierung, bei gleichzeitiger Nutzung des Energieinhaltes.

4.1. Mittelgroße Feuerungsanlagen

Als mittelgroß sollen in diesem Zusammenhang Anlagen mit einer Feuerungsleistung von ca. 100 - 500 GJ/h ($\hat{=}$ 28 - 138 MW (th)) verstanden werden. Es ist dies der Größenbereich der im Ab-

schnitt 2 beschriebenen Anlagen "Flingern" der Ruhrkohle AG und der ZWSF der VAW in Lünen, bis hin zur im Bau befindlichen Anlage "Afferde" der Elektrizitätswerke Wesertal GmbH (12, 84 - 86).

Anlagen dieser Größe werden als Prozeßdampfanlagen oder als Heiz- oder Heizkraftanlagen mit mittlerer bis hoher Jahresbenutzungsdauer eingesetzt. Da bei der WSF Kohlen mit niedrigen Brennstoffkosten verfeuert werden können, ergibt sich auf diese Weise ein günstiges Verhältnis von Betriebskosten zu Investitionskosten. Beim Einsatz schwierig zu verfeuernder oder ballastreicher Kohlen sind in konventionellen Anlagen zusätzliche Einrichtungen erforderlich. Bei der WSF fallen diese weg oder sind zumindest wesentlich geringer; daraus resultiert im allgemeinen ein erheblicher wirtschaftlicher Vorteil (12, 16). Jedoch auch bei revierfernen Standorten, bei denen sich aus Transportkostengründen der Einsatz von Ballastkohlen meist nicht lohnt, ergeben sich für die WSF-Anlage Vorteile aus ihrer größeren Unabhängigkeit von der Brennstoffqualität hinsichtlich Zündfähigkeit, Ballast- und Schwefelgehalt. Wenn besonders strenge Auflagen zum Umweltschutz bestehen, kann der Einsatz einer konventionellen Kohlenfeuerung mit nachgeschalteten Rauchgas-Reinigungsanlagen bei Anlagen der hier betrachteten Größe eventuell wirtschaftlich nicht mehr zu vertreten sein. Die WSF bietet in solchen Fällen wegen der sehr hohen inhärenten Schadstoffrückhaltung Kostenvorteile.

Wenngleich beim Bau und Betrieb von WSF-Anlagen besonders in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt worden sind und die Funktionstüchtigkeit dieser Technik überzeugend demonstriert worden ist, ist sie, im Gegensatz zur konventionellen Feuerungstechnik, noch nicht ausentwickelt. Insbesondere das Feststoffhandling (Zuteilung und Dosierung von Kohle und Kalkstein, Ascheabzug und -kühlung sowie Flugascherückführung) speziell für kleine und mittlere

Anlagen kann noch weiter verbessert werden hinsichtlich Zuverlässigkeit, Vereinfachung, Standardisierung, Wartungsfreiheit und Automation. Ebenso kann und muß der Ausbrand bei der WSF noch weiter gesteigert werden, was durch verstärkte Ascherückführung oder durch andere feuerungstechnische Maßnahmen erfolgen kann. Die hier angeführten Punkte gelten nicht alle auch im gleichen Maße für die ZWSF, da dort der Aufwand für die anlageneigene Kohleaufbereitung ohnehin höher ist als bei der stationären WSF. Aus diesem Grunde wird die ZWSF auch eher für Anlagen ab ca. 100 t Dampf/h ($\approx 110 \text{ MW}_{\text{th}}$) als wirtschaftliche Alternative angesehen (45, 87).

Obwohl für die Druckwirbelschichtfeuerung zunächst der wirtschaftliche Einsatzbereich erst bei wesentlich größeren Einheiten gesehen wurde, bei denen der höhere Aufwand des Druckbetriebes durch den möglichen Wirkungsgradgewinn beim Einsatz der kombinierten Gas-/Dampfturbinentechnik kompensiert werden kann, sind auch Vorschläge für Heizkraftwerke einfacher Bauart mit DWSF der hier betrachteten Größenordnung ausgearbeitet worden. Bei diesen Planungen (88), von denen eine im Rahmen eines geförderten Forschungsprojektes jetzt auch realisiert werden soll (89), wird jedoch anstelle der Gasturbine eine Abgasturboladergruppe eingesetzt, um die noch offenen Probleme der Heißgasreinigung zu umgehen.

Im folgenden sollen die wesentlichen Merkmale der im Bau befindlichen Anlage der Elektrizitätswerke Wesertal in Hameln/Afferde sowie die geplante Druckanlage der TH Aachen kurz skizziert werden. Die Anlage der VAW in Lünen ist bereits im Abschnitt 2 beschrieben, auf das ausführlich dargestellte Druckanlagenplanungskonzept der

Firmen BBC und VKW (88) wird hingewiesen.

Dampferzeuger der hier diskutierten Größe werden i. a. als Wasserrohrkessel mit rauchgasdichtverschweißten Membranrohrwänden erstellt und mit Überhitzerheizflächen versehen. Zumindest bei den größeren Anlagen innerhalb dieses Bereiches wird man auch eine Luftvorwärmung vorsehen, die allerdings wegen der bei WSF relativ hohen Luftpressung nicht mehr durch Regenerativ-Luvo erfolgen kann, sondern mit Röhren- oder Rippenplatten-Luvo durchgeführt werden muß (12). Die Luftvorwärmung bringt es mit sich, daß ein höherer Anteil der Gesamtwärmefreisetzung durch den in die Schicht eintauchenden Wärmetauscher abgeführt werden kann (Bild 33), als wenn die Luftvorwärmung entfällt.

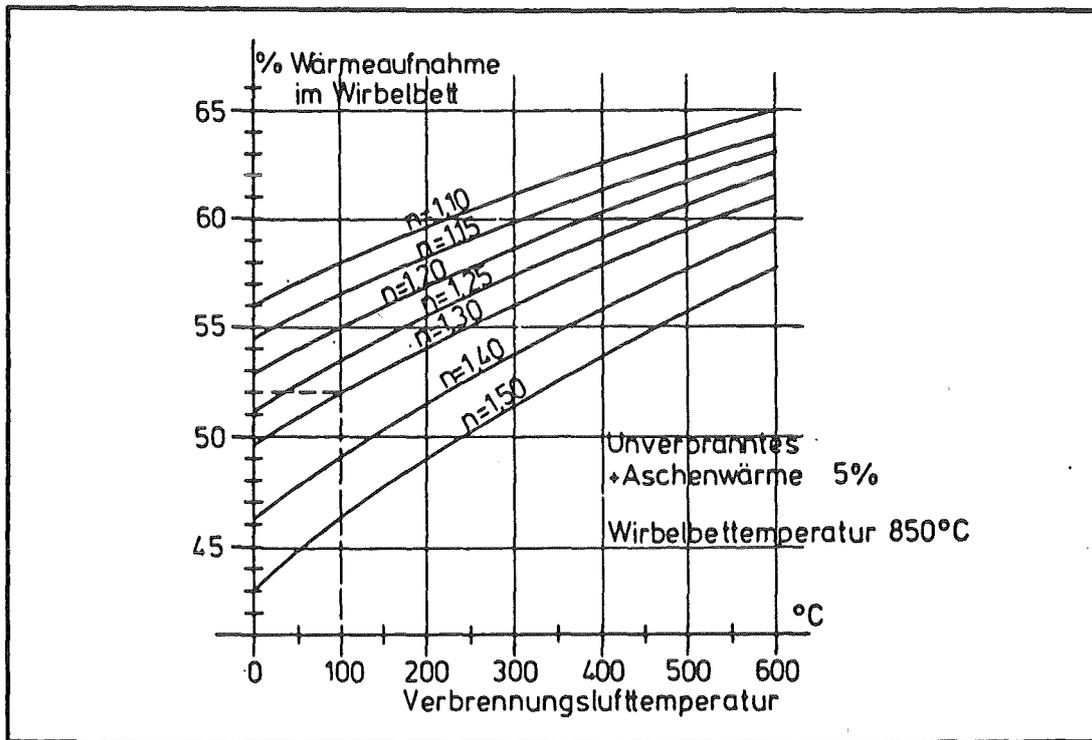


Bild 33: Erhöhung des innerhalb der Schicht übertragbaren Wärmeanteils durch Luftvorwärmung (84)

4.1.1. Die Anlage Afferde der Elektrizitätswerke Wesertal AG

Das Bild 34 zeigt den Aufbau der Anlage "Afferde", die konventionell in Dreizugbauweise erstellt wird. Der erste Rauchgaszug enthält Vor- und Endüberhitzerheizflächen, der zweite Zug den Speisewasservorwärmer und der dritte den Luvo, der die Luft auf 250°C vorheizt. Wegen der hohen Heißdampf­temperatur und des korrespondierenden hohen Druckes (535°C , 120 bar) ist der Anteil der Verdampfungswärme kleiner als die in der WS übertragbare Wärmemenge (Bild 35); daher muß auch ein Teil der Überhitzer-

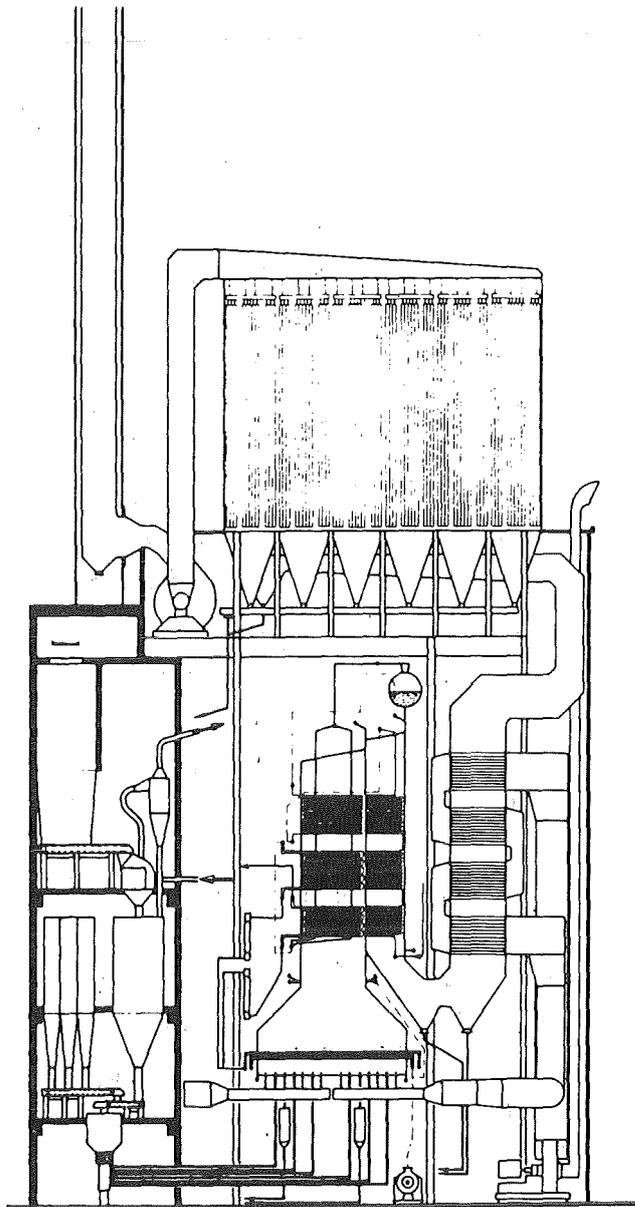


Bild 34: Aufbau des WSF-Dampferzeugers der Anlage Afferde (84)

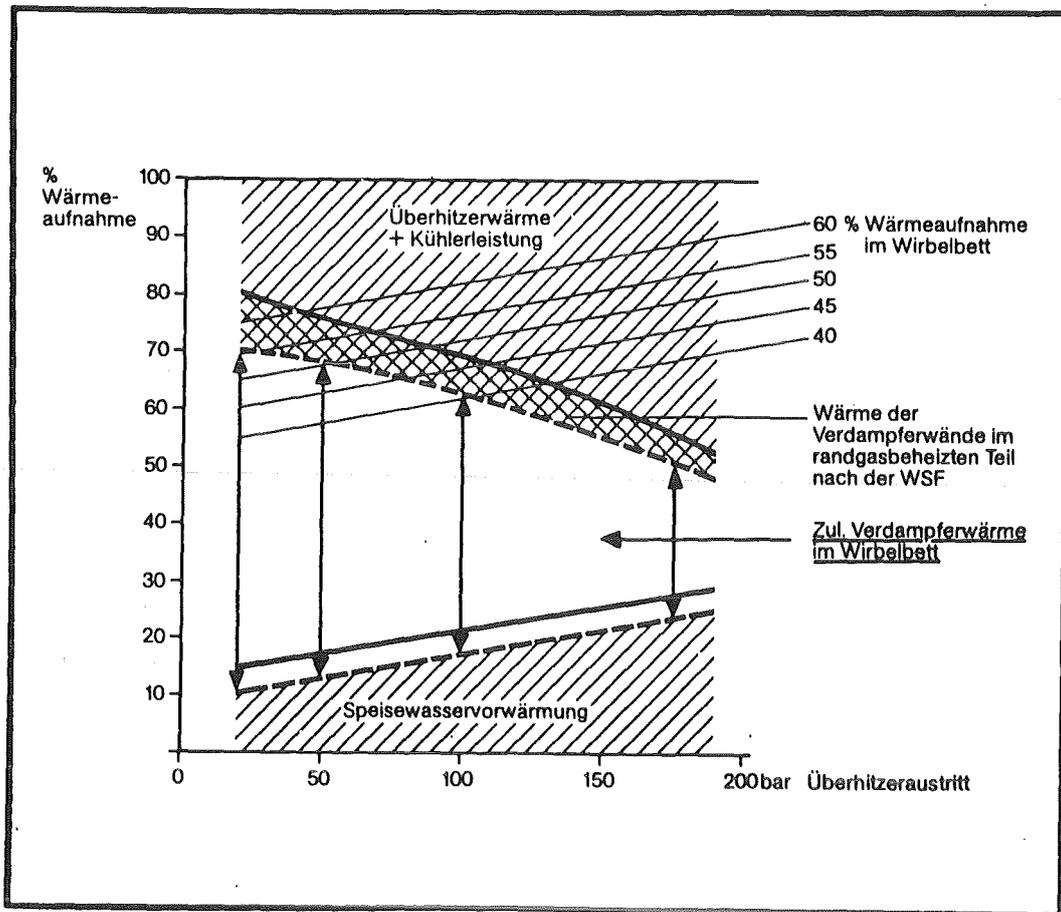


Bild 35: Abnahme der Verdampfungswärme mit dem Druck (12)

heizflächen in die WS verlegt werden. Um sicherzustellen, daß diese immer ausreichend gekühlt werden, werden die eingetauchten Verdampferheizflächen im Zwangsumlauf beaufschlagt, während die ebenfalls als Verdampferflächen geschalteten Membranrohrwände im Naturumlauf betrieben werden können.

Die WS ist in 6 Sektionen unterteilt, von denen 2 nur Verdampfer-, aber keine Überhitzerheizflächen haben. Diese beiden Sektionen dienen als Anfahrzellen und bleiben bei allen Lastzuständen in Betrieb. Die anderen Zellen können nach Bedarf zu- und abgeschaltet werden, wodurch

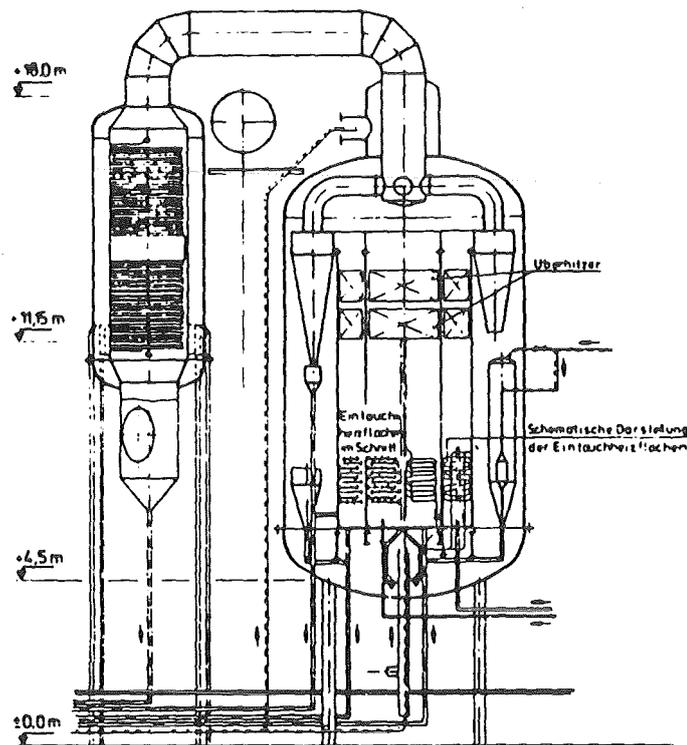
der Dampferzeuger der abgeforderten Last nachgefahren werden kann. Weitere Lastanpassung ist durch Änderung des Luftüberschusses und Variation der WS-Temperatur möglich. Die Mindestlast beträgt ca. 30 %. Der erzeugte Dampf wird einem Entnahme-Kondensations-Turbosatz zugeführt, wobei der Kondensationsteil so groß ausgelegt ist, daß auch bei einer Ferndampfabgabe, die geringer als die Mindestlast des Dampferzeugers ist, der notwendige Lastausgleich erreicht werden kann.

Für die Anlage wird eine Brennstoffaufbereitung bestehend aus Kohletrocknung, Brecher und pneumatischer Dosierung des Kohle/Kalkstein-Gemisches durch 24 Aufgabestellen vorgesehen. Die Flugasche aus der Umlenkung zwischen dem 2. und 3. Zug wird dem Brennstoffgemisch wieder zugeschlagen. Die Entstaubung der Rauchgase soll mittels Gewebefilter erfolgen. Die Anlage wird nach Inbetriebnahme (voraussichtlich 1983) als Referenzanlage für ein Heizkraftwerk mit WSF dienen, das mit ballast- und schwefelreichem Brennstoff in einem besonders immissionsschutzwürdigen Gebiet sicher und umweltfreundlich betrieben werden kann. Darüber hinaus werden Erfahrungen dazu gesammelt werden können, bis zu welchen Größen WSF (die Anlage Afferde hat eine Anströmbodenfläche von 72 m²) gleichmäßig fluidisiert, gleichmäßig mit Brennstoff versorgt, zuverlässig der schwankenden Lastabforderung des Kraft-Wärme-Kopplungsbetriebes nachgefahren und mit hoher Verfügbarkeit und gutem Feuerungswirkungsgrad betrieben werden können. Vorversuche zur Weiterverwendung der Rückstände sind bereits angelaufen (86).

4.1.2. Die Anlage der Technischen Hochschule Aachen

Über die für die TH Aachen geplante Druckanlage liegt bisher noch keine spezielle Veröffentlichung vor. Die Fa. Steinmüller, die diese

Anlage erstellen soll, hat jedoch vor einem Jahr Angaben zu ihrem Konzept einer druckaufgeladenen WSF gemacht (90). Eine solche Anlage soll i. a. modular aufgebaut sein, um die Vorteile der Werkstattfertigung nutzen zu können. Ein Modul mit einer Leistung von 55 t Dampf/h ist im Bild 36 dargestellt. Die Brennkammer



Heißdampfmenge 55 t/h
Heißdampfdruck 55 bar
Heißdampftemp 470 °C

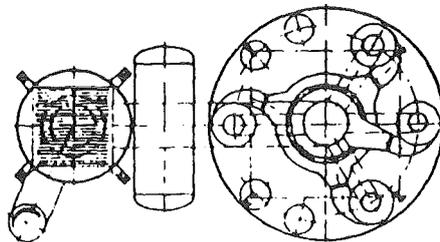


Bild 36: Druckaufgebener WSF-Dampferzeuger-Modul (90)

ist in gasdichter Membranrohr-Bauweise konzipiert und in einem Druckbehälter angeordnet. Es wird eine ringförmig sektionierte Wirbelschicht mit wassergekühlter Trennwand vorgesehen, die auch durch den Gasberuhigungsraum geführt wird. Die Rauchgasströme der inneren und äußeren Sektionen werden getrennt im Druckbehälter angeordneten Zyklonen zugeführt, erst danach vereinigt und gemeinsam in einem separat angeordneten Abhitzekessel weiter abgekühlt. Danach soll die Feinentstaubung und Entspannung durch einen Turbolader erfolgen. Die Kohle soll pneumatisch von unten zugeführt werden und muß daher gebrochen, getrocknet und gesiebt werden.

Die Anlage soll für die Strom- und Wärmeerzeugung der TH Aachen eingesetzt werden und gleichzeitig für Forschung und Lehre zur Verfügung stehen. Es handelt sich also um eine erste Pilot- und Demonstrationsanlage, die dazu dienen soll, die noch fehlende praktische Erfahrung für den Bau kommerzieller Anlagen zu vermitteln und die Entwicklung kleiner Kraft-Wärme-Anlagen mit WSF weiter voranzutreiben und zu optimieren.

4.1.3. Mittelfristige weitere Entwicklung

Die mittelfristige weitere Entwicklung der WSF im Bereich mittelgroßer Feuerungsanlagen dürfte dadurch gekennzeichnet sein, daß zunächst in einigen Anlagen unterschiedlicher Konzeption die andersartigen Bauweisen der WSF (atmosphärisch stationär, atmosphärisch zirkulierend oder druckaufgeladen stationär) erprobt und optimiert werden und daß Betriebserfahrungen gesammelt werden, aus denen sich Hinweise für die Verbesserung von Anlagenkomponenten und betrieblicher Abläufe ergeben, die vor allem auf eine Vereinfachung und Standardisierung abzielen dürften. Vor allem muß der von der

eigentlichen Feuerung her sicher beherrschbare Einsatz von Kohlen mit hohem Ballastgehalt und hohem Feinanteil bei wechselnder Qualität auch durch entsprechende Bunkerungs-, Zuteil- und Dosierkomponenten gewährleistet sein, sowie die Automatisierung des Betriebsablaufes verbessert und eine Vereinfachung des Teillastbetriebes erreicht werden.

Der Einsatz in Wärmezentralen, Heizkraftwerken, Kraftwerken, industriellen Dampfzentralen oder Prozeßwärmeanlagen (z. B. VAW Lünen) dürfte sich dann auf breiter Front durchsetzen, wenn sich deutliche Kostenvorteile für WSF-Anlagen abzeichnen. Das ist nicht nur eine Frage der zunehmenden Erfahrung mit der WSF und der Optimierung dieser Anlagen, sondern auch der zukünftigen Preisentwicklung bei den Energieträgern und der gesetzlichen Auflagen zum Umweltschutz. Speziell die beiden zuletzt genannten Punkte beeinflussen die Kosten einer WSF-Anlage weniger als die konventioneller Feuerungen, so daß hier Verschiebungen der Kostenrelationen zugunsten der WSF zu erwarten sind.

Die Abgrenzungen zwischen den Einsatzbereichen der verschiedenen Bauweisen der WSF können z. Z. noch nicht mit Sicherheit gezogen werden. Während einige Hersteller die atmosphärische stationäre WSF auf Leistungsbereich < 150 - 180 MW (th) (91) beschränkt sehen, sind andere der Ansicht, daß diese Bauweise auch für Großanlagen geeignet ist (92 - 94, 103 - 107). Ähnlich verhält es sich mit den Ansichten zum Einsatzbereich der ZWSF. Während für deutsche Verhältnisse eine Mindestgröße von ca. 100 MW (th) gesehen wird (87), sind in Finnland bereits Anlagen < 10 MW (th) gebaut worden, die allerdings für Torf und Holzabfälle im Gemisch mit Kohle ausgelegt sind (95). Auch eine 65 MW (th)-Anlage für Torfffeuerung zur

Strom- und Wärmeversorgung eines Industriebetriebes wurde dort erstellt (96). Für die DWSF herrscht Übereinstimmung darin, daß der Einsatz in einer Gas/Dampfturbinenkombianlage aus wirtschaftlichen Gründen nur für größere Kraftwerke in Frage kommt. In Verbindung mit einer Turboladergruppe werden aber auch mittelgroße Anlagen diskutiert. Das Aachener Heizkraftwerk soll ca. 50 t Dampf/h liefern ($\hat{=}$ 35 - 40 MW (th)). Das ist auch die Größe eines Brennkammermoduls im BBC/VKW-Konzept (88), bei dem dann allerdings drei Moduln zu einer Anlage zusammengefaßt werden sollen.

4.2. Kleine Feuerungsanlagen

Bei kleinen Feuerungsanlagen, worunter im folgenden solche mit einer Leistung von < 100 GJ/h ($\hat{=}$ 28 MW (th)) verstanden werden sollen, liegen die spezifischen Investitions- und Personalkosten wesentlich höher als bei gleichartigen mittleren oder großen Anlagen. Um daher wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein, werden oftmals höhere Brennstoffkosten und evtl. ein etwas niedrigerer Wirkungsgrad in Kauf genommen, wenn dadurch ein einfacherer Betrieb und eine Verminderung des Bauaufwandes zu erreichen ist. Die in der Vergangenheit niedrigen Brennstoffkosten von Öl und Gas haben dazu geführt, daß kleinere Feuerungsanlagen wegen des dabei mit verhältnismäßig geringem Aufwand erreichbaren sehr hohen Automationsgrades und des niedrigeren Bauaufwandes überwiegend als Öl- oder Gasfeuerungen ausgeführt worden sind. Die inzwischen erreichte, für die Kohle günstige Relation der Wärmepreise macht die Kohlefeuerung auch für kleine Anlagen wieder attraktiv oder zumindest vergleichbar. In neueren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden - auch für revierferne Standorte - eindeutige Kostenvorteile für die WSF gegenüber der Heizölfeuerung errechnet (44, 97, 98); gegenüber der Rostfeuerung von Kohle fällt der Ver-

gleich allerdings noch weniger klar aus.

Für kleine Anlagen spielt aus den schon erwähnten Gründen der einfache Aufbau und die Automatisierbarkeit des Betriebes eine besondere Rolle. Für die WSF bedeutet dies, daß kompliziertere Kohleintragssysteme, die evtl. auch noch eine spezielle Aufbereitung erfordern, wegfallen müssen. Andererseits haben diese Anlagen auch genügend kleine WS-Querschnitte, so daß die Quervermischung innerhalb der Schicht einen Kohleneintrag allein von der Seite ohne zusätzliche Einbringung in die Mitte der Schicht (z. B. von unten durch den Anströmboden) ermöglicht, wie dies in der Anlage "König Ludwig" (vgl. Abschnitt 2) bereits realisiert worden ist. Es hat sich aber gezeigt, daß dieses Konzept zwar bei Nußkohlen unmittelbar funktionierte, beim Einsatz von Mittelgut (höherer Aschegehalt und hoher Anteil an Feinkohle) jedoch zunächst Schwierigkeiten bereitete (11). Da das Angebot an Nußkohlen aber bereits aus rohstofflichen und technischen Gründen knapp ist, wird die Frage des Handlings von Feinkohlen auch bei kleineren Feuerungsanlagen entscheidende Bedeutung bekommen.

4.2.1. Die "shallow-bed" WSF-Technik

Im Abschnitt 2 war bereits eine englische Anlage nach der sog. "shallow bed" WS-Technik vorgestellt worden. Diese in England schon sehr verbreitete Technik hat, dort wo sie anwendbar ist, besonders für kleinere Anlagen große Vorteile. Die shallow-bed Technik und die bei uns favorisierte WS-Technik mit größeren Schichthöhen ("deep-bed" Technik) sind einander ergänzende Bauweisen, die nur in Grenzbereichen Konkurrenten sein dürften. In England konnte man davon ausgehen, daß aufgrund der im Vergleich zur Bundesrepublik anders gearteten rohstofflichen Eigenschaften der Kohle und wegen der unterschiedlichen Absatzstruktur aus-

reichend stückige Kohle ohne nennenswerte Anteile an Feinmaterial für den Markt der Kleinanlagen zur Verfügung steht. Um die Feuerung zu vereinfachen, ist es günstig, diese Stückkohle ohne weitere Aufbereitung zu verbrennen. Da jedoch für die direkte Aufwirbelung dieser Kohle viel zu hohe Anströmgeschwindigkeiten erforderlich wären, wird ein Schichtmaterial mit einer höheren Dichte als der Brennstoff eingesetzt, auf dem die Kohle "schwimmt". Dieses Material (z. B. Sand) kann feinkörnig und eng klassiert sein und wird in seiner Körnung so abgestimmt, daß hohe Wirbelgeschwindigkeiten, die eine hohe Feuerraumbelastung ermöglichen, gewählt werden können, aber der Austrag an Schichtmaterial dennoch klein bleibt. Die Kohlestücke werden erst ausgetragen, wenn sie bis unter die Austragungsgrenze abgebrannt sind, so daß der Kohlenstoffverlust nur sehr klein ist. Da die Kohle nur an der Schichtoberfläche bleibt, braucht man keine große Schichthöhe mehr und kann trotz der höheren Dichte des Schichtmaterials niedrige Druckverluste realisieren (99, 100).

Die Kohleaufgabe braucht bei der shallow-bed Technik nur auf die Schicht zu erfolgen und kann daher mit einfachen Schurren, evtl. mit leichter pneumatischer Unterstützung bewerkstelligt werden. Da klassierte Vollwert-Nußkohle auch sehr leicht gebunkert und zugeteilt werden kann, ergibt sich so ein besonders unkompliziertes, wenig störanfälliges Brennstoffversorgungssystem.

Andererseits kann feinkörnige Kohle im shallow-bed nicht wirtschaftlich verbrannt werden, da der Flugkoksverlust zu hoch und eine Ascherezirkulation zu wenig wirksam ist. Auch die Entschwefelung mit Kalkstein, die einen relativ langen und intensiven Kontakt zwischen Rauchgas und Sorbens braucht, läßt sich in shallow-bed WSF

nur mit sehr hohen Kalksteinzuschlagsmengen erreichen. Wegen der Verbrennung an der Schichtoberfläche findet erhebliche Nachverbrennung oberhalb der Schicht statt. Die Flüchtigen der Kohle z.B. verbrennen nur im Freiraum. Daher ist auch die CO-Emission einer shallow-bed WSF i. a. höher als bei einer WSF mit höherer Schicht. Möglicherweise sind die in Deutschland geltenden Bestimmungen (250 mg/m^3) bei shallow-beds nur mit großem Luftüberschuß einzuhalten. In England gibt es hinsichtlich CO und SO_2 keine Emissionsvorschriften.

Bei der shallow-bed-Technik werden zudem nur aschearme Kohlen eingesetzt, so daß das Schichtmaterial nur gelegentlich regeneriert zu werden braucht. Wenn aschereiche Brennstoffe verbrannt werden sollen, würde ein aufwendiges Schichtmaterialumlauf- und -regenerationssystem erforderlich, was die Anlage erheblich komplizierter machen würde. Weiterhin ist zu beachten, daß grobe Kohlenstücke erheblich längere Ausbrennzeiten haben und daher Laständerungen bei shallow-bed WSF nur mit größeren Verzögerungen durchzuführen sind. Deep-bed WSF reagieren dagegen wegen der geringeren Kohlekorngroße und wegen des infolge der geringeren Brennkammerbelastung niedrigeren Kohlenstoffinventars deutlich schneller auf Regeleingriffe.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der beiden Bauweisen kurz zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß die shallow-bed Technik für den deutschen Markt wohl nur in Sonderfällen einsetzbar sein dürfte und Nachteile vor allem hinsichtlich des Umweltschutzes aufweist. Aus diesem Grunde soll auf diese Technik im weiteren nicht mehr besonders eingegangen werden.

	Shallow-bed WSF	Deep-bed WSF
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - geringer Druckverlust - geringe Bauhöhe - sehr einfache Kohleaufgabe möglich - höhere Flächenbelastung erreichbar - verbesserte Wärmeübertragung durch feinteiliges Schichtmaterial hoher Dichte erreichbar - leichter Kaltstart 	<ul style="list-style-type: none"> - geeignet für Brennstoffe jeder Körnung - auch für aschereiche Kohlen gut geeignet - wirksame Entschwefelung durch Kalkstein zuschlag möglich - geringere Auskühlung der Schicht bei Stillstand - gestufte Luftzufuhr möglich (NO_x-Verminderung) - schnelleres Ansprechen auf Régeleingriffe
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - an stückige Kohle ohne Feinkornanteil gebunden - Entschwefelung nur mit sehr hohem Kalksteinzusatz erreichbar - erhebliche Nachverbrennung im Freiraum (höhere CO-Emissionen) - hoher Aschegehalt macht Schichtumlauf erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> - höherer Druckverlust - niedrigere Anströmgeschwindigkeit (=> niedrigere Flächenbelastung) - Schichtmaterial-Aschekühler erforderlich - i.a. aufwendigeres Kohlehandlung und Flugascherückführung erforderlich

Tabelle: Vergleich der shallow-bed und der deep-bed-Technik

4.2.2. Kleine WSF-Anlagen mit Sattdampfkessel

Bei den kleinen deep-bed Anlagen ist zu unterscheiden, ob eine Heiz- oder Prozeßwärmeanlage erstellt werden soll, die Heißwasser oder Dampf von mittlerem Druck liefert, oder ob ein Dampferzeuger mit hochwertigen Dampfparametern z.B. für ein kleines Heiz-Kraftwerk gebaut werden soll. Im ersten Fall wird eine verhältnismäßig einfache Bauweise ausreichen, z.B. ein Großraumwasserkessel mit einer WSF-Brennkammer als Vorfeuerung.

Bild 37 zeigt eine derartige Anlage im Fließbild, wie sie z. Z. vom Konsortium Thyssen Engineering/Standardkessel für ein Kalksandsteinwerk in Holland erstellt wird (11). Kohle und fertig konditionierter Kalkstein werden per LKW angeliefert und in einen Tiefbunker entladen, von dem sie über ein Becherwerk in die entsprechenden Vorratsbunker überführt werden. Die Kohle (0 - 50 mm) wird dabei abgesiebt und das Überkorn (> 25 mm) in einem Brecher nachzerkleinert.

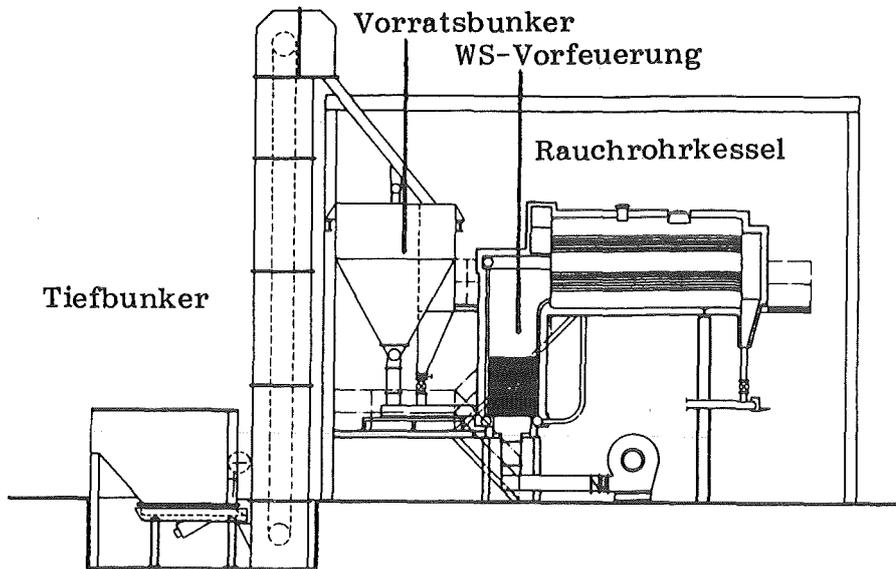


Bild 37: Kleine WSF-Prozeßdampfanlage (Quelle: Konsortium Thyssen Engineering-Standardkessel)

Eine Trocknung kann bei Kohlen dieser Sortierung entfallen. Die Dosierung von Kohle und Kalkstein erfolgt über gemeinsame Schneckenförderer in die WS unmittelbar oberhalb des Anströmbodens.

Die WS-Vorfeuerung besteht aus einer Flossenrohrkammer, die ebenso wie die eingetauchten Wärmetauscherrohre im Naturumlauf als Verdampferrohre geschaltet sind. Der nachgeschaltete Rauchrohrkessel dient zur Rauchgaskühlung, die Umlenkammer ist strömungsmäßig so gestaltet, daß eine Vorabscheidung von Flugasche erreicht wird. Die Rauchgase passieren nach Verlassen des Wasserraumkessels einen Economiser sowie das Schlauchfilter und werden dann durch ein Saugzuggebläse zum Kamin weiter-

geleitet. Diese, relativ einfache Bauweise kleiner Prozeßdampf-
anlagen wird auch von anderen Firmen entwickelt. Bild 38 zeigt
zum Vergleich einen 4,3 MW Kessel der engl. Babcock Power Ltd.
der z. Z. im Prüffeld des NCB in Cheltenham getestet wird (101).
Im Grundaufbau entspricht dieser Kessel der vorigen Konzeption.
Hier soll jedoch die Kohle über (pneumatisch unterstützte) Schurren
von der Seite oben auf die WS gegeben werden.

Hier, wie auch bei den anderen deutschen Herstellern gehen die
Entwicklungsbemühungen dahin, aus bewährten Bauelementen
WSF-Kesselbaureihen in standardisierter Form anbieten zu können,
die Anlagen so einfach wie möglich zu halten und den Betrieb zu
automatisieren. Das Marktpotential für derartige Anlagen ist sehr
groß. Von den ca. 40 000 in der Bundesrepublik genehmigungs-
pflichtigen Dampfkesseln liefern rund 90 % Prozeßdampf; 4/5 der
Dampfkessel in Deutschland haben eine Feuerungsleistung von
weniger als 5 MW (th) (98).

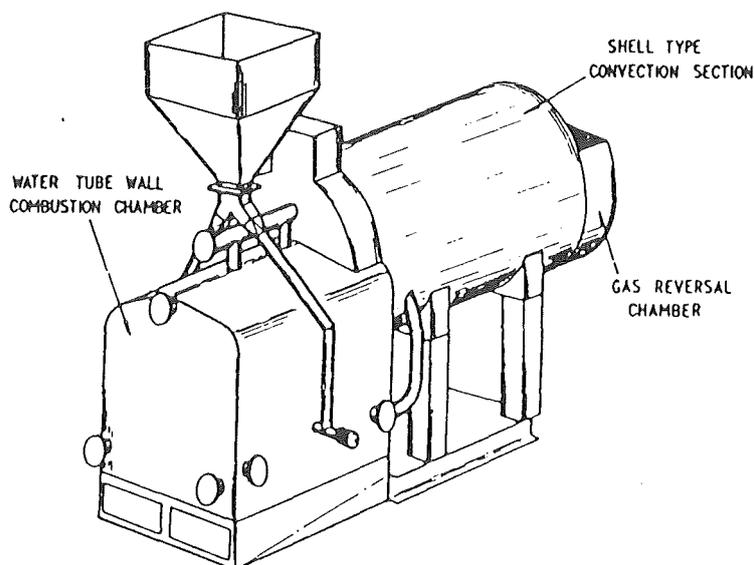


Bild 38: Kleiner WSF-Dampfkessel der Babcock Power (101)

4.2.3. Klein-Heizkraftwerkskessel mit WSF (Anlage der Stadtwerke Lüneburg)

Kesselanlagen, in denen neben Heiz- oder Prozeßwärme auch Strom erzeugt werden soll, erfordern i. a. eine Auslegung des Dampferzeugers für höherwertige Dampfparameter, wodurch ein nicht unerheblich höherer Aufwand erforderlich wird. Für Kleinheizkraftwerke mit Kohlefeuerung dürfte aus Kostengründen allein die wärmeorientierte Fahrweise in Frage kommen. Für Fernheizzentralen, deren Lastabnahme entsprechend den jeweiligen Außenlufttemperaturen schwankt, wird es weiterhin erforderlich sein, zur Spitzenlastabdeckung Zusatzkessel zu installieren, damit die Heizkraftanlage mit einer besseren mittleren Auslastung betrieben werden kann. Für die Stadtwerke Lüneburg wurde ein Kleinfernheizwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung auf WS-Basis durchgeplant (102), das als Demonstrationsanlage dienen soll und in dem die wesentlichen Eigenschaften solcher Anlagen in der Praxis erprobt und weiterentwickelt werden sollen.

Kennzeichnend für die Anforderungen dieser Anlage ist der extrem große Teillastbereich von 1 : 10, der eine Unterteilung der Anlage in zwei WSF-Dampferzeuger à 7 MW_{th} mit jeweils 2 Sektionen notwendig machte. Die Dampfparameter (45 bar, 420 °C) erfordern Überhitzung, die durch einen zweistufigen Wärmetauscher im ersten Kesselzug erreicht werden soll. Im zweiten und dritten Zug des in Flossenrohrbauweise geplanten Kessels befinden sich Speisewasservorwärmer. Die Tauchheizflächen und die gekühlten Wände sind als Verdampferflächen geschaltet. Bild 39 zeigt einen Schnitt durch einen der beiden WSF-Kessel mit nachgeschalteter Entstaubung. Man erkennt unmittelbar die verwandte Bauweise mit größeren WSF-Dampferzeugern (vgl. Bild 34).

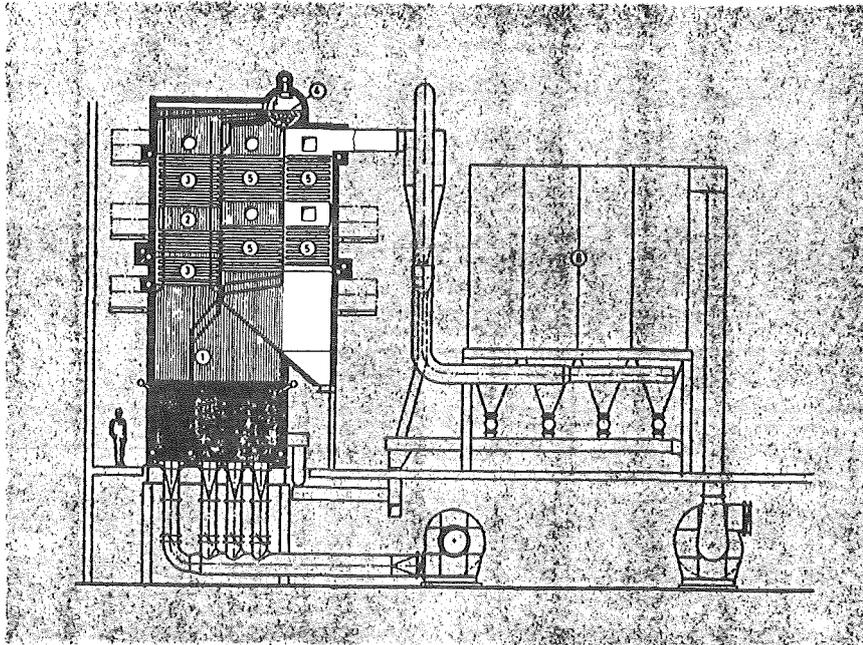


Bild 39: WSF-Dampferzeuger für Kraft-Wärme-Kopplung
(Quelle: Konsortium Thyssen Engineering-Standardkessel)

Wenn auch die speziellen Eigenschaften der WSF in dieser Anlage in besonderem Maße genutzt werden sollen (extrem hoher Regelbereich, Einsatz schwieriger, ballastreicher Kohle zur umweltfreundlichen Verbrennung in einem innerstädtischen Fernheizwerk), so muß doch bedacht werden, daß der sehr hohe erforderliche technische Aufwand in Kleinanlagen nicht in allen Fällen einen wirtschaftlichen Betrieb zuläßt. Es ist eines der Ziele des Lüneburger Arbeitsprogramms, neben den technischen auch die wirtschaftlichen Betriebsergebnisse der geplanten Demonstrationsanlage genau zu erfassen und zu analysieren. Grundsätzlich dürfte aber die WSF die günstigste Möglichkeit bieten, Anlagen dieser Art mit Kohlefeuerung zu realisieren.

4.3. Große Feuerungsanlagen

4.3.1. Stationäre atmosphärische WSF-Großanlagen

Feuerungsanlagen mit einer Leistung von $> 500 \text{ GJ/h}$ ($\hat{=} 139 \text{ MW (th)}$) werden vorwiegend für Kraftwerke gebaut, d.h. es werden Dampferzeuger eingesetzt mit höchsten Dampfzuständen und einfacher oder doppelter Zwischenüberhitzung. Wegen des hohen Brennstoffverbrauches spielt der Ausbrand eine entscheidende Rolle; außerdem ist eine hohe Verfügbarkeit der Anlage für deren wirtschaftlichen Betrieb unumgänglich. Bei konventioneller Bauweise wird für kohlegefeuerte Kessel dieser Größe die Staubfeuerung angewendet, bei der eine - verglichen zur stationären atmosphärischen WSF - rund viermal höhere Querschnittsbelastung von maximal $6,5 \text{ MW/m}^2$ erreicht wird, was durch die größere Feuerraumhöhe bedingt ist. Die für atmosphärische WSF erforderlichen höheren Grundflächenabmessungen führen bei Großdampferzeugern zu erheblichen konstruktiven Problemen, die jedoch nicht grundsätzlich unlösbar sind. In der Tat haben die Firmen Combustion Engineering, Babcock & Wilcox und Foster Wheeler für die Tennessee Valley Authority (TVA) jeweils einen Entwurf für ein 570 MW (e) -Kraftwerk mit WSF erarbeitet (92, 103 - 107). Für die dabei auftretenden technischen Schwierigkeiten wurden jeweils verschiedene Lösungsvorschläge erarbeitet. In allen Fällen wurden jedoch Sektionierungen vorgesehen; bei zwei Konzepten sind diese Sektionen übereinander angeordnet. Bild 40 zeigt einen dieser Entwürfe, Bild 41 eine WS-Sektion dieses Kessels. Der Anströmboden einer Sektion hat Abmessungen von $18,3 \cdot 6,7 \text{ m}^2 = 122,6 \text{ m}^2$. Jeder dieser 5 Module ist also bereits fast doppelt so groß wie die Anlage "Afferde" der Elektrizitätswerke Wesertal (Abschnitt 4.1. u. Bild 34). Bevor eine so große Anlage jedoch gebaut werden soll, plant die TVA, eine Demonstrationsanlage mit einer Leistung von 200 MW (e) zu be-

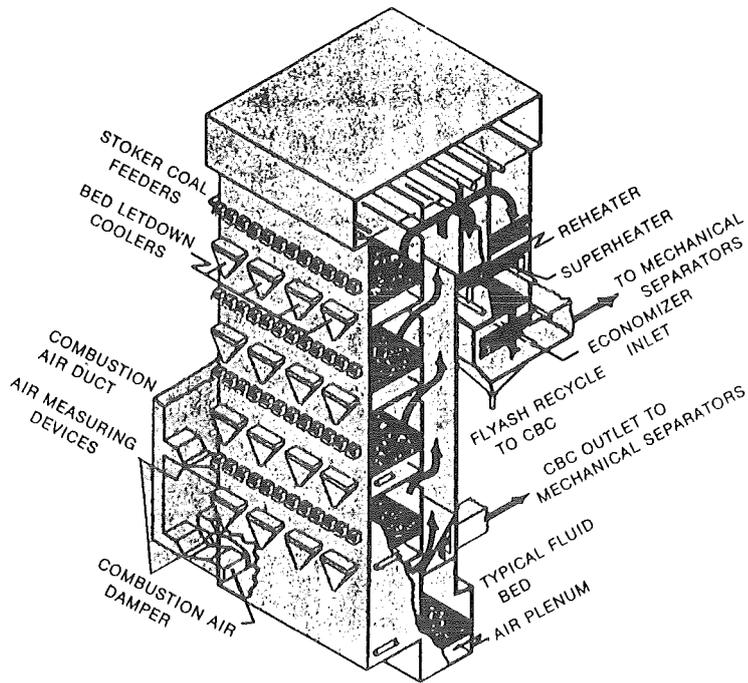


Bild 40: WSF-Großdampferzeuger für ein 570 MW (e)-Kraftwerk (92, 103)

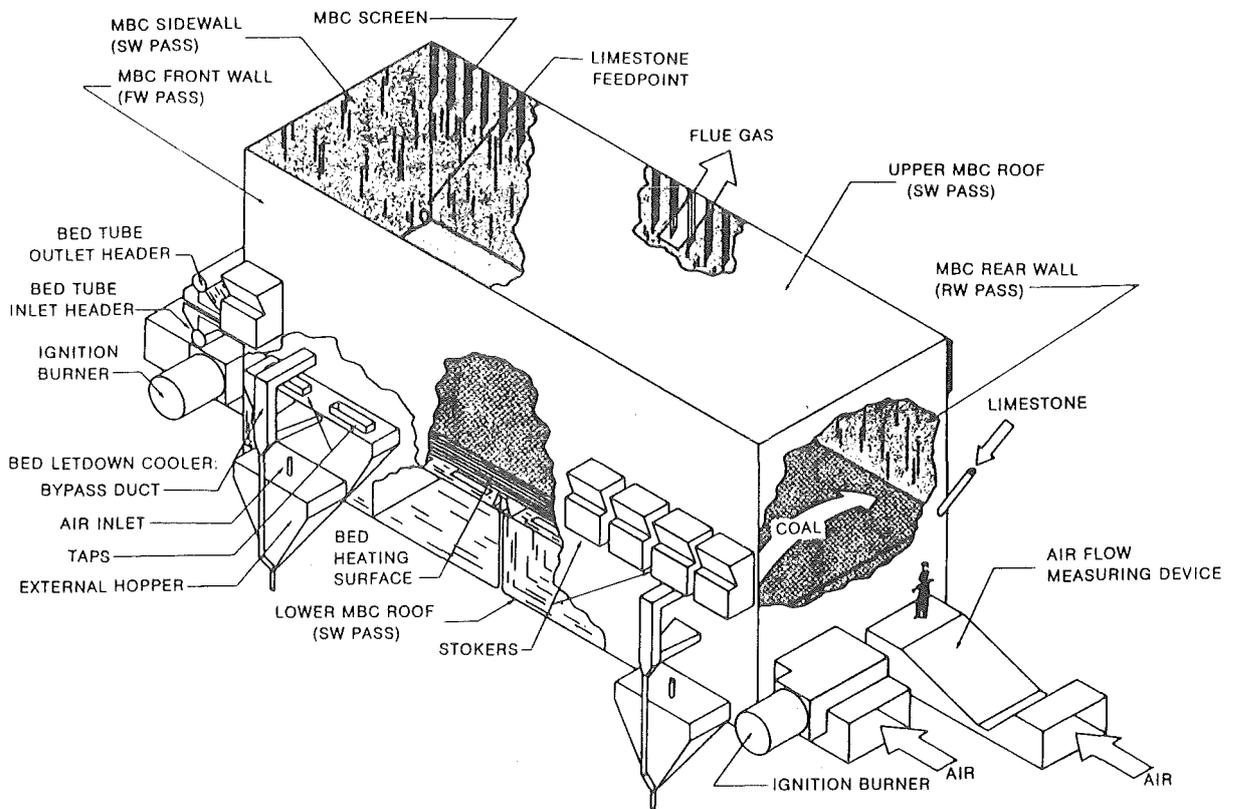


Bild 41: Einzelmodul aus WSF-Großdampferzeuger (92, 103)

treiben (93). Allerdings wird zuvor noch eine Pilotanlage (20 MW (e)) errichtet (108), in der weitere Vorstudien durchgeführt werden sollen, so daß die evtl. Realisierung eines Großkraftwerkes auf dieser Basis in den nächsten Jahren nicht zu erwarten ist.

4.3.2. Kombikraftwerkskonzepte mit Druckwirbelschichtfeuerungen

Wegen des außerordentlichen technischen Aufwandes sehr großer atmosphärischer WSF-Einheiten wird heute zunehmend der Einsatz von Druck-WSF als Brennkammern für Gas-/Dampfturbinen-Kombiprozesse erörtert. Der Druckbetrieb bringt neben der Verringerung des Platzbedarfs auch eine noch weitere Verminderung der Emissionen mit sich (vgl. Bild 28) und durch den Kombiprozeß eine mögliche Wirkungsgradsteigerung bei der Stromerzeugung.

Bei den Gas-/Dampfturbinen-Kombiprozessen wird zwischen solchen unterschieden, bei denen der Dampfturbinenprozeß lediglich Abhitzeverwerter des Gasturbinenprozesses ist (Bild 42) und solchen,

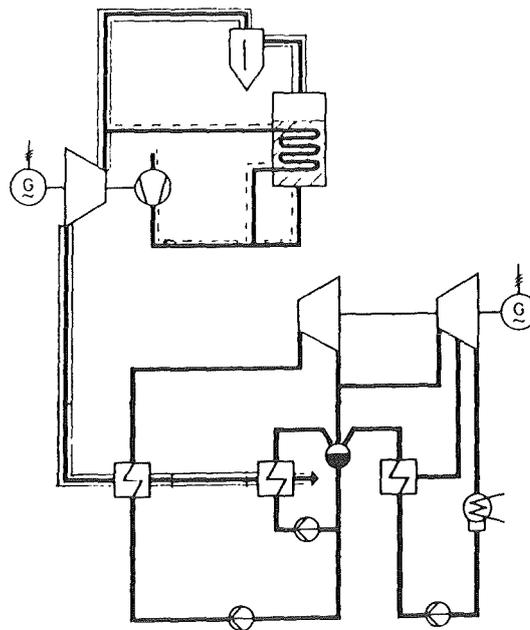


Bild 42: Schaltbild eines Kombiprozesses mit DWSF mit nachgeschaltetem Abhitze-Dampfturbinenprozeß (109)

bei denen die Gasturbinenbrennkammer direkt wasser-/dampfgekühlt ist, der Dampfturbinenprozeß also in den Gasturbinenprozeß integriert ist (Bild 43). Der integrierte Kombiprozeß ermöglicht

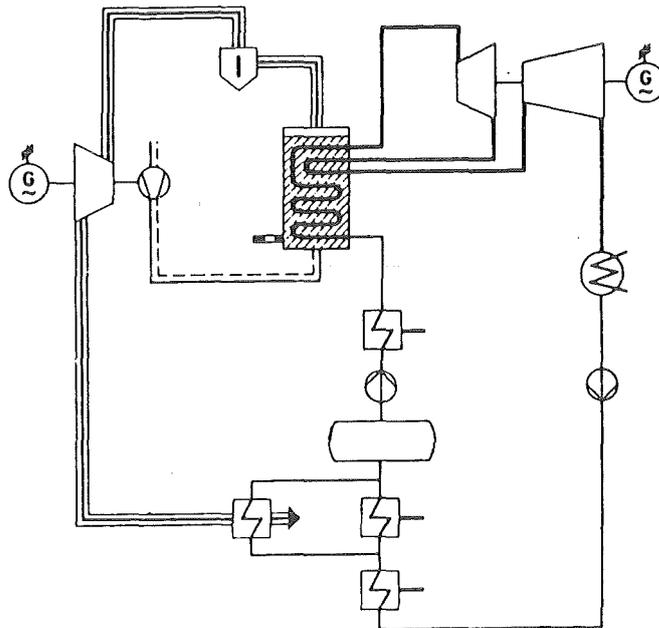


Bild 43: Schaltbild eines integrierten Kombiprozesses mit DWSF (109)

wesentlich höhere Stromerzeugungswirkungsgrade als der nicht integrierte Prozeß (109) und ist daher, trotz der bedeutend aufwendigeren Technik und des komplizierteren Betriebs der Anlage, Hauptziel der Entwicklungsbemühungen.

Der Grund für die unterschiedliche Effektivität der beiden Schaltungen liegt darin, daß beim integrierten Prozeß höhere Dampfzustände erreichbar sind und ein wesentlich größerer Anteil der Gesamtstromerzeugung auf den Dampfprozeß entfällt, der mit höherem Wirkungsgrad arbeitet als der Gasturbinenprozeß. Das im Abschnitt 4.1. erwähnte Turbo-lader-Konzept unterscheidet sich vom hier betrachteten integrierten

Kombiprozeß dadurch, daß der Hauptteil der Wärme der die DWSF verlassenden Rauchgase in konvektiven Heizflächen entnommen und dem Dampfturbinenprozeß zugeführt wird und nur eine Restwärme anschließend im Turboexpander genutzt wird, die zwar zum Antrieb des Verdichters ausreicht, aber nicht mehr zur Nettoabgabe von Leistung für die Stromerzeugung.

Bei der DWSF nimmt die erreichbare Flächenbelastung etwa proportional mit dem Druck zu, d. h. die für eine bestimmte thermische Leistung benötigte Querschnittsfläche nimmt entsprechend ab (110). Die konstruktiven Probleme der Beherrschung großer Brennkammerquerschnitte und der Aufwand für Brennstoffzufuhr- und -verteilungssysteme wird also durch den Druckbetrieb drastisch vermindert. Die hohen Kosten der Druckluftherzeugung machen aber eine Rückgewinnung der Kompressionsarbeit durch Expansionsmaschinen erforderlich. Außerdem führt die Notwendigkeit, Druckbehälter, druckfeste Heißgasleitungen und Druckschleusen für Brennstoff und Asche einzusetzen, zu einer erheblichen Verteuerung der Anlagen, die durch das geringe Bauvolumen nicht unbedingt ausgeglichen wird.

Der direkte Antrieb einer Turbomaschine mit dem Abgas einer DWSF erfordert, daß eine so weitgehende Entstaubung des Heißgases durchgeführt wird, daß ein sicherer Turbinenbetrieb gewährleistet ist. Obwohl umfangreiche F u. E-Programme, mit dem Ziel einen geeigneten Entstauber bereitstellen zu können, bereits seit einigen Jahren intensiv verfolgt werden, ist bisher noch kein System gefunden worden, das in absehbarer Zeit für den großtechnischen Einsatz geeignet sein könnte.

Weitere noch offene Probleme des Einsatzes der DWSF-Technik betreffen vor allem das Verhalten der Turbine hinsichtlich Erosion, Korrosion und Verschmutzung (111, 112). Zwar sind auch zu diesem Problemkomplex umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, jedoch fehlen bislang Erfahrungen mit laufenden Maschinen repräsentativer Größe und Bauart. Da auch die Gasturbinenhersteller bisher noch nicht angeben können, wie hoch der tolerierbare Reststaubgehalt im die Maschine antreibenden Rauchgas sein darf, sind verschiedene Wege vorgeschlagen worden, wie man in Vorstufen zum endgültigen Kombiprozeß einen Teil der noch ungelösten Schwierigkeiten umgehen und dennoch wesentliche Erfahrungen mit dem Kombibetrieb sammeln könnte.

Bei dem bereits erwähnten Turbolader-Konzept (88, 90) wird sowohl die thermische, als auch die Beanspruchung durch den Staub stark gemindert, allerdings auch eine Maschine eingesetzt, die mit konventionellen Gasturbinen nicht mehr vergleichbar ist, nicht in großen Einheiten gebaut werden kann und die sich hinsichtlich der Verschmutzungsneigung voraussichtlich gänzlich anders verhält als Industriegasturbinen, so daß die Übertragbarkeit der Ergebnisse unklar ist.

In einem anderen Vorschlag (113) wird angeregt, eine speziell für staubhaltige Gase entwickelte Prozeßgasturbine einzusetzen, bei der wesentliche Merkmale von Industriegasturbinen erhalten sind, und bei der die Gaseintrittstemperatur dem später zu realisierenden Prozeß angeglichen ist. Insbesondere bleibt bei diesem Vorschlag auch die Möglichkeit erhalten, das dynamische Verhalten einer Gasturbinenanlage genau zu untersuchen.

Der Klärung der noch offenen Fragen, wie ein Kombiprozeß mit DWSF-Brennkammer regelungstechnisch beherrscht werden kann und wie alle erforderlichen Meßdaten in dem Heißgasdrucksystem gewonnen werden können, wurde kürzlich von Fachleuten, neben den Problemender Heißgasreinigung und des Verhaltens der Gasturbine, höchste Priorität zugemessen (112). Da diese Untersuchungen nur an Versuchsanlagen hinreichender Größe durchgeführt werden können, ist erst nach Vorliegen ausreichender Erfahrungen mit der Kommerzialisierung dieser Technik zu rechnen.

In den USA wird z. Z. von der Firma Curtiss Wright eine Kombianlage mit DWSF-Brennkammer gebaut, die 1983 in Betrieb gehen soll (114, 115, 111). Bei diesem Konzept soll in einer luftgekühlten Druckbrennkammer bei 7 bar Heißgas erzeugt werden, das eine Gasturbine mit einer Leistung von 7,1 MW (e) treibt. Das Turbinenabgas wird in einem Abhitzekessel weiter gekühlt, wobei eine Dampfleistung von umgerechnet 6,5 MW (e) anfallen soll. In einer kommerziellen Großanlage würde dieser Dampf zum Antrieb einer Dampfturbine verwendet, in der im Bau befindlichen Pilotanlage wird er in die Dampfschiene des Werkes eingespeist. Das Curtiss Wright-Konzept zielt auf einen nicht-integrierten Kombiprozeß (Bild 42), bei dem der Dampfturbinenprozeß der Gasturbinenanlage nachgeschaltet ist. Der Abhitzekessel könnte im Falle von Schwierigkeiten mit der DWSF-Brennkammer oder der Gasturbine auch direkt befeuert werden und so der Dampfprozeß allein weitergeführt werden. Wegen des geringeren Wirkungsgrades dieser Konzeption gegenüber einer solchen mit wasser-/dampfgekühlter Brennkammer wird ihr Einsatzbereich weniger bei Großanlagen als vielmehr bei mittelgroßen industriellen Kraft-/Wärmeanlagen gesehen.

In der Anlage von Curtiss-Wright sollen vor allem die erwähnten Hauptschwierigkeiten der DWSF-Technik untersucht und Lösungsvorschläge erprobt werden. Insbesondere bei der Heißgasreinigung will man von den bisher vorgesehenen drei Zyklonstufen die letzte nacheinander durch eine Reihe weiterentwickelter Versuchsentstauber (Drehströmungsentstauber, Heißgaselektroentstauber, Elektroschütt-schichtfilter, Hochtemperaturgewebefilter etc.) je nach Verfügbarkeit ersetzen, um so für den späteren Bau von größeren Anlagen das bestgeeignete System zu finden, da die Entstaubung allein mit Zyklonen unzureichend ist.

Für die Entwicklung des Kombiprozesses in integrierter Bauweise, d. h. mit wasser-/dampfgekühlter DWSF-Brennkammer gibt es zwei größere Versuchsanlagen. Von den drei Ländern USA, Großbritannien und Bundesrepublik Deutschland wird im Rahmen der Internationalen Energie Agentur (IEA) als Gemeinschaftsprojekt ein aufgeladener Dampferzeuger mit DWSF in Grimethorpe, England, betrieben (116-118). Die erzeugten heißen Rauchgase werden hier noch nicht über eine Gasturbine entspannt, da das primäre Ziel der Arbeiten in Grimethorpe die Entwicklung des DWSF-Dampferzeugers ist. Für eine zweite Projektphase soll jedoch die Nachschaltung einer Gasturbine vorgesehen werden, allerdings auch noch nicht mit dem Verdichter gekuppelt, sondern im einfachen Expansionsbetrieb (119). Die Brennkammer wurde ursprünglich für eine thermische Leistung von 80 MW ausgelegt, Neuüberlegungen und der erste Versuchsbetrieb haben es jedoch ratsam erscheinen lassen, die Feuerungsleistung auf ca. 50 MW zurückzunehmen. Die Datenbasis für die Auslegung des eintauchenden Wärmetauschers ist bisher für Druckanlagen noch unzureichend, so daß auch bei künftigen Anlagen eine Korrektur der Brennkammerleistung nach Inbetriebnahme

nicht auszuschließen ist. Vom Betrieb der IEA-Anlage werden wesentliche Erfahrungen vor allem zum allgemeinen Anlagenbetrieb und zu den Problemen des Feststoffhandlings unter Druck erwartet. Das Vorhaben des Konsortiums American Electric Power Service Corp. (AEP)/STAL-Laval Turbin AB/Deutsche Babcock Anlagen AG unmittelbar eine integrierte Kombianlage mit DWSF von 171 MW (e) zu bauen (120, 91) ist vorerst zurückgestellt worden, um zunächst Erfahrungen mit einer in Malmö, Schweden, im Bau befindlichen Pilotanlage von 15 MW (th) zu sammeln. Das Konsortium glaubt, mit einer mehrstufigen Zyklonentstaubung als Heißgasreinigung auskommen zu können. Entsprechende Vorversuche an einem statischen Schaufelgitter sind vielversprechend verlaufen (121). Nach deutschen Umweltschutzanforderungen würde aber bei einer solchen Anlage noch eine Feinentstaubung vor dem Schornstein erforderlich.

Die bisher vorgeschlagenen Konstruktionskonzepte für DWSF-Brennkammern für Großanlagen sehen, aus Gründen der besseren Teillastregelung, wiederum Sektionierungen der WS vor. Während Westinghouse (Bild 44) übereinander angeordnete Module im gleichen Druckbehälter vorsieht (122), will die Deutsche Babcock einen großen kugelförmigen Druckbehälter bauen (Bild 45), in dem eine Brennkammer mit mehreren Trennwänden und entsprechend unterteilter Luftzuteilung zusammen mit parallel geschalteten mehrstufigen Rückführzyklonen angeordnet ist (123). Die Vereinigte Kesselwerke AG (VKW) sieht dagegen vor, mehrere einzelne Druckbrennkammern zusammenzuschalten (Bild 46), um so die Vorteile der Werkstattfertigung voll nutzen zu können (110).

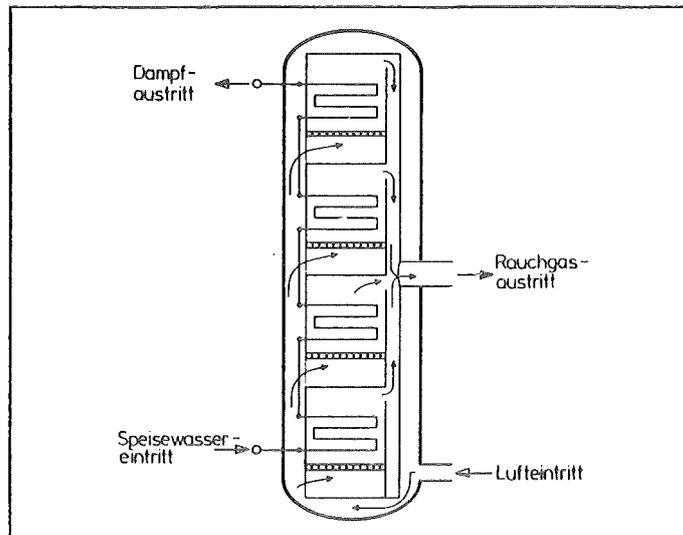


Bild 44: Entwurf der Fa. Westinghouse für einen 600 MW DWSF-Dampferzeuger (122)

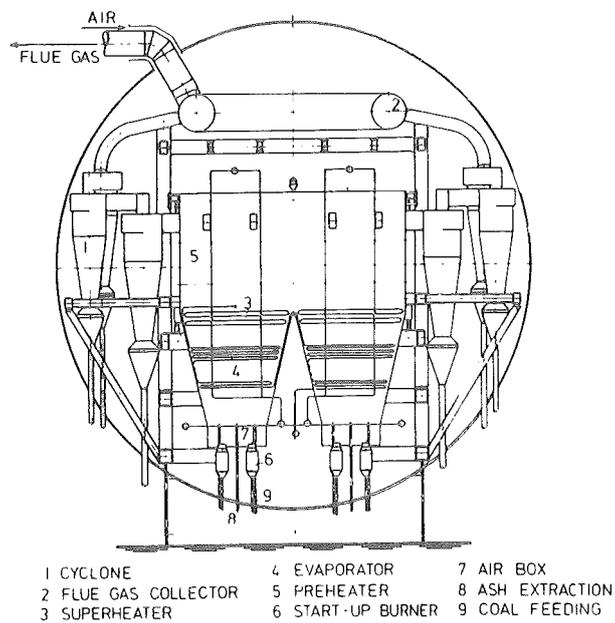


Bild 45: Babcock Planung für DWSF-Dampferzeuger (123)

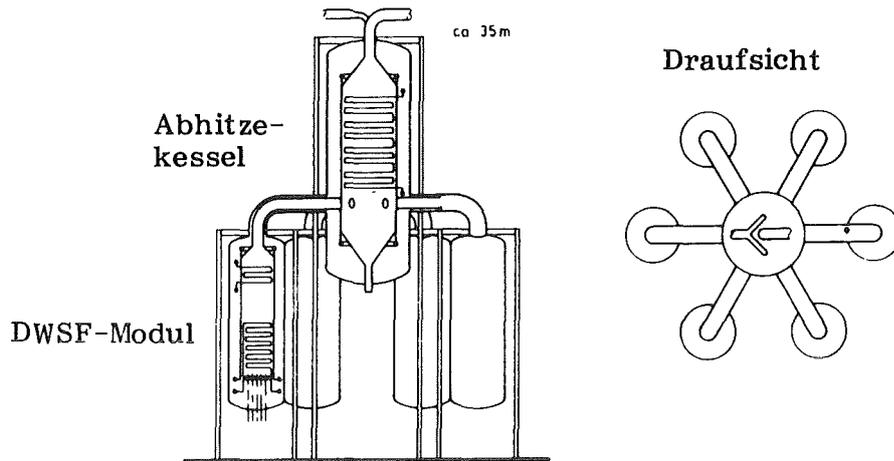


Bild 46: Entwurf für einen 600 MW DWSF-Dampferzeuger (VKW) (110)

Bis zum großtechnischen Einsatz von Kombianlagen mit DWSF müssen noch umfangreiche Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden, deren Schwerpunkte hier dargelegt worden sind. Die z. Z. unsicherste Komponente ist dabei die Heißgasentstaubung. Verschmutzung und Verschleiß der Gasturbine und regelungs- und meßtechnische Probleme für die Gesamtanlage bilden die wichtigsten weiteren noch offenen Fragenkomplexe, deren Untersuchung jedoch von der Verfügbarkeit größerer Versuchsanlagen abhängt.

4.3.3. Anlagen mit zirkulierender WSF (Anlage der Stadtwerke Duisburg)

Alternativ zu Kombianlagen mit DWSF werden für mittelgroße Kraftwerke auch Dampferzeuger mit ZWSF als eine Möglichkeit gesehen, den Bauaufwand großer atmosphärischer WSF-Anlagen zu verringern, ohne die technischen Schwierigkeiten des Druckbetriebes in Kauf nehmen zu müssen.

Die im Bau befindliche Anlage der VAW in Lünen wurde bereits in Abschnitt 2 beschrieben, auf kleinere Anlagen in Finnland im

Abschnitt 4.1 hingewiesen. Eine größere Anlage mit einer therm. Leistung von 208 MW ist für die Stadtwerke Duisburg als Heizkraftwerk geplant worden, eine Entscheidung über den tatsächlichen Bau steht bevor (36, 45, 91). Im Gegensatz zu der Anlage der VAW wird in der geplanten Duisburger Anlage ausschließlich überhitzter Dampf kraftwerksüblicher Zustände erzeugt, der nach Entspannung im Turbinenhochdruckteil zwischenüberhitzt werden soll (Bild 47).

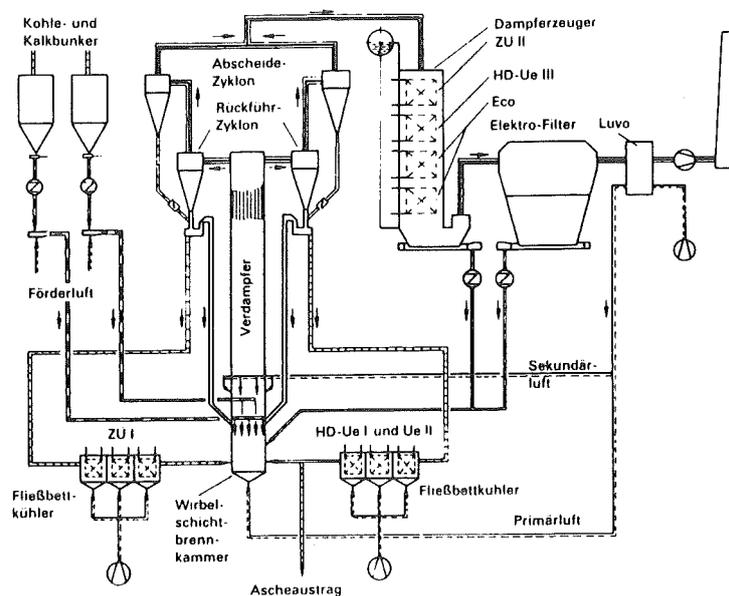


Bild 47: Fließbild des ZWSF-Heizkraftwerkes Duisburg (91)

Diese Anlage wäre nach ihrer Fertigstellung ein Pendant zur Anlage "Afferde" der Elektrizitätswerke Wesertal. Sie ist für ca. die doppelte Dampfleistung ausgelegt, soll aber ebenfalls zur Strom- und Fernwärmeerzeugung innerhalb eines Stadtgebietes eingesetzt werden. Aus dem Vergleich der Betriebsergebnisse der beiden Anlagen werden wichtige Erkenntnisse zu den relativen Vorteilen und Einsatzbereichen der beiden Bauweisen erwartet. Erste Ergebnisse dazu dürften jedoch nicht vor 1985 vorliegen.

Bild 48 zeigt einen Aufstellungsplan einer ZWSF-Anlage dieser Größe. Man erkennt, daß der Vorteil der höheren Querschnitts-

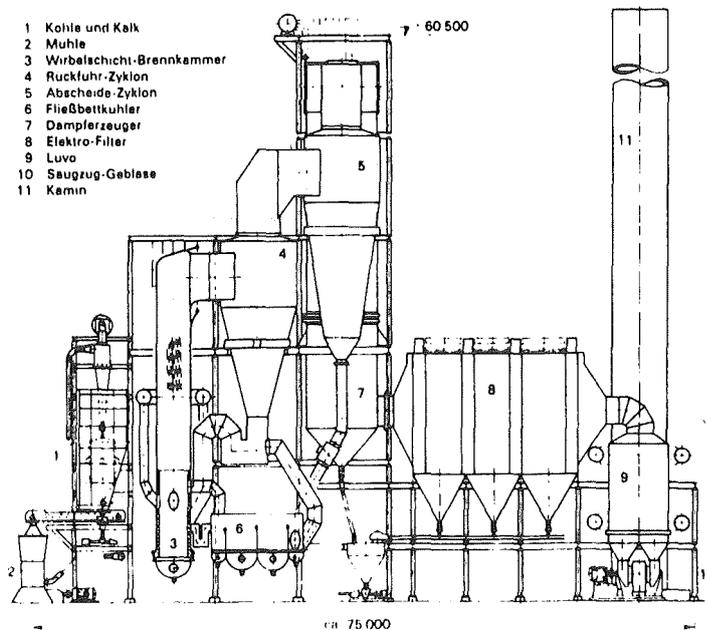


Bild 48: Aufstellungsplan für eine ZWSF-Anlage (91)

belastung der ZWSF durch die höhere Bauweise und die Notwendigkeit der Brennkammer zwei Rückfuhrzyklone (außer den Flugaschevorabscheidungszyklonen) etwa des gleichen Durchmessers der Brennkammer nachzuschalten, weitgehend wieder aufgezehrt wird. Lurgi und Babcock glauben, daß diese Technik für Anlagen bis ca. 300 MW_e bereits jetzt einsatzbereit ist (16, 87, 91). Bild 49 zeigt einen Entwurf eines Kraftwerkes mit einem ZWSF-Dampferzeuger für 100 MW_e Leistung (15).

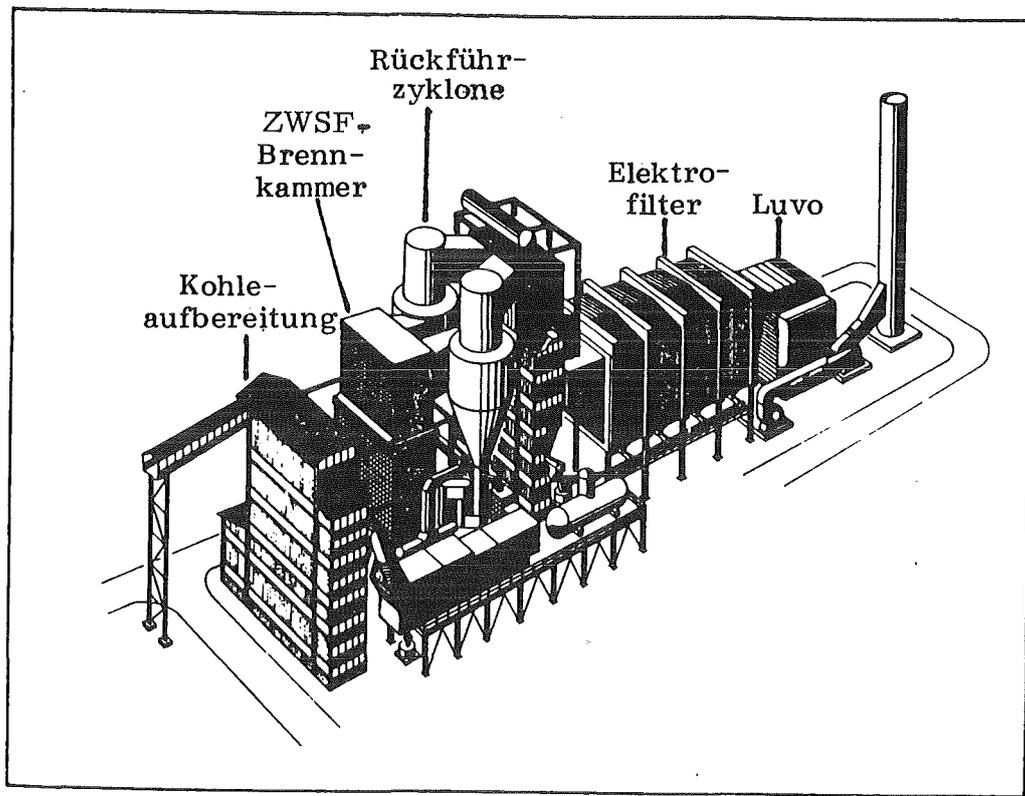


Bild 49: Entwurf für ein 100 MW ZWSF-Kraftwerk (15)

4.4. Verbrennungsanlagen für Rückstände und minderwertige Brennstoffe

Verbrennungsanlagen für Rückstände wurden in der Vergangenheit i. a. unter dem Gesichtspunkt der Entsorgung gebaut, die Abhitzeverwertung war eher ein zweitrangiger Aspekt. Derartige Anlagen z. B. für die Verbrennung von Klärschlämmen etc. in WSF-Apparaten sind Stand der Technik und seit geraumer Zeit marktüblich. Seit einigen Jahren gewinnt die Verbrennung derartiger Rückstände oder auch minderwertiger Brennstoffe zum Zwecke der Wärme- oder Energieerzeugung jedoch zunehmend an Bedeutung. Zwei derartige Anlagen, die WSF-Anlage "Gneisenau" und die WSF-Vorschaltbrennkammern des Modellkraftwerkes Völklingen sind bereits im

Abschnitt 2 ausführlich beschrieben worden. Die beiden Anlagen charakterisieren den Stand der Technik in diesem Bereich und sind typisch für die Bauweise. Weiterentwicklungsschwerpunkt dürfte das Handling der jeweils recht unterschiedlichen Einsatzbrennstoffe sein. Nach bisherigen Erfahrungen müssen Bunker, Eintrags- und Dosierorgane für jeden Einsatzfall individuell ermittelt und oft auch erst noch erprobt werden.

Da im deutschen Steinkohlenbergbau der Anteil der verwertbaren Förderung an der Gesamtförderung bei z. Z. ca. 55 % liegt, ergibt sich eine große Menge an Bergematerial, das zum größten Teil deponiert werden muß. Da aber die Berge trotz sorgfältiger Aufbereitung noch immer einen nicht unbedeutenden Kohlenanteil haben, ließen sie sich prinzipiell auch teilweise zur Wärmeerzeugung heranziehen, wie dies mit speziellen Fraktionen in den beiden beschriebenen Anlagen auch geschehen soll. Je nachdem, wie sich der Betrieb der beiden Anlagen entwickelt, wird sich herausstellen, ob diese Art der Wärmeerzeugung wirtschaftlich konkurrenzfähig ist. Allerdings ist der Standort solcher Anlagen reviergebunden, da die Transportwege von Brennstoff und Aschen aus Kostengründen so kurz wie möglich gehalten werden müssen. Ähnliche Überlegungen werden auch in anderen Ländern angestellt und entsprechende Versuchsanlagen betrieben (124).

Auch bei Rückständen aus anderen Produktionen hat sich die WSF als effizientes Entsorgungsverfahren erwiesen. Im speziellen Falle der Verbrennung von Schlämmen muß dabei häufig ein Stützbrennstoff eingesetzt werden, um die i. a. recht hohen Restwassergehalte der mechanisch entwässerten Frischschlämme verdampfen zu können. Zu diesem Zweck hat sich die Zumischung

von Kohle als sehr günstig erwiesen (125). Tatsächlich ist die Stützfeuerung mit Kohle in diesem Falle sogar günstiger als z.B. die mit Heizöl, da letzteres, wenn nicht besondere Vorkehrungen getroffen werden, in der WS verdampft und zum überwiegenden Teil erst im Freiraum verbrennt, während die nichtflüchtige Kohle ihre Verbrennungswärme innerhalb der WS freisetzt. Dies Beispiel zeigt, daß mittels WSF nicht nur viele Rückstände umweltfreundlich entsorgt werden können, sondern daß die WSF auch in diesem Bereich in der Lage ist, den Ölverbrauch zu vermindern und durch Kohle zu ersetzen. Da sich der Einsatz der WSF im Bereich der Rückstandsverbrennung bereits weitgehend durchgesetzt hat, ist damit zu rechnen, daß mit wachsender Erfahrung mit dieser Technik auch die Zahl der Anlagen schnell wachsen wird, wobei auch hier die allgemeine Kostenentwicklung und speziell die Entwicklung der Energiepreise das Tempo des weiteren Vordringens dieser Technik bestimmen.

5. Zusammenfassung

Der Einsatz der Wirbelschichttechnik im Bereich der Hochleistungsfeuerungen bietet eine Reihe von bedeutenden Vorteilen, von denen insbesondere die niedrige Schadstofffreisetzung, die Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen der Brennstoffqualität und der kompakte Aufbau hervorzuheben sind. Allerdings ist diese Technik noch nicht auf so hohem Entwicklungsstand wie konventionelle Kohlefeuerungen; und Verbesserungen speziell beim Ausbrand, beim Feststoffhandling und bei der Teillastregelung sind noch erforderlich.

Verschiedene Bauweisen sind bisher entwickelt und in Versuchsanlagen verwirklicht worden. Die beim Betrieb dieser Anlagen gemachten Erfahrungen bestätigen durchweg die erwarteten Vorteile

dieser Technik und ließen die Einsatzbereiche der verschiedenen Bauweisen und erforderlichen Entwicklungsschwerpunkte klarer erkennen.

Die aus Messungen an den Versuchsanlagen und im Laboratorium gewonnenen Erkenntnisse zum Emissionsverhalten von Wirbelschichtfeuerungen sind noch unvollständig und z. T. vorläufig, lassen aber bereits wichtige Aussagen zu:

- Die Anforderungen der TA-Luft lassen sich in allen Fällen einwandfrei erfüllen. Der Aufwand für die Erzielung niedriger Schadstoffemissionen ist bei der WSF i. a. wesentlich niedriger als bei anderen Feuerungen.
- Auch die höheren Anforderungen der neuen (noch nicht in Kraft getretenen) Großfeuerungsverordnung lassen sich bei der WSF sicher erfüllen. Insbesondere lassen sich auch kleinere WSF-Anlagen in vielen Fällen ohne besonderen Aufwand wesentlich schadstoffärmer betreiben als gleichgroße konventionelle Feuerungen.
- Die Schwefelbindung mittels Kalkstein oder Dolomit wurde bereits überzeugend demonstriert, der Sorbensbedarf läßt sich aber durch gezielte Untersuchungen noch deutlich reduzieren. Dadurch vermindert sich auch in entsprechender Weise die Menge der zu entsorgenden Rückstände.
- Die Höhe der NO_x -Emissionen wird stark von der Verbrennungsluftführung beeinflusst. Die Zusammenhänge der NO_x -Bildung und -zersetzung in WSF sind nur wenig bekannt und besonders schlecht zu untersuchen. Empirisch gefundene Regeln für die NO_x -Minderung sind jedoch aufge-

stellt worden. Eine häufig zu beobachtende Gegenläufigkeit bei der Wirksamkeit der Maßnahmen zur Minderung von SO_2 - und NO_x -Emissionen erfordert Kompromisse bei der Wahl der optimalen Betriebsparameter.

- Hinsichtlich der Emissionen von Halogenwasserstoffen herrscht Unklarheit darüber, wieviel davon den eigentlichen Brennraum verläßt. Mit Sicherheit wird ein Teil dieser Gase in den Rauchgaskanälen an ausgetragenen Flugstaub gebunden. Dieser Anteil ist anlagenabhängig; laufende Versuche zielen darauf ab, hier ein Optimum zu finden. Vorläufige Ergebnisse lassen hohe Rückhaltewirksamkeit erwarten.
- Polyaromatische Verbindungen werden aus WSF nur in vernachlässigbar geringen Mengen emittiert. Beim Anfahrbetrieb mit noch nicht auf Betriebstemperatur befindlicher Brennkammer treten vorübergehend höhere Emissionswerte auf, die aber noch immer sehr niedrig liegen. Die polyaromatischen Verbindungen werden fast ausschließlich gasförmig emittiert, nur ein geringer Anteil ist an Reingasstaub adsorbiert.
- Die aus WSF-Anlagen emittierten Stäube enthalten teilweise umgesetztes Sorbens und unterscheiden sich außerdem in ihrem morphologischen Aufbau von konventionellen Kraftwerkstäuben. In Atemtests zeigten sie jedoch keine andere Wirkung als andere inerte Stäube.

Wegen der relativ niedrigeren Feuerraumtemperatur der WSF scheint die Anreicherung von Spurenelementen im Flugstaub geringer als bei konventionellen Kraftwerkstäuben zu sein.

- Die Rückstände von WSF für Steinkohle haben eine Zusammensetzung, die aufgrund des Sorbenszusatzes eher einer Braunkohlenasche entspricht. Der Anteil an freiem CaO bewirkt eine Fixierung der meisten Schwermetalle hinsichtlich Auslaugung durch Wasser. Eine Verfestigung des Materials ist leicht erreichbar, dadurch wird die Auslaugung erheblich herabgesetzt. In Bezug auf die Deponierung werden WSF-Rückstände als harmlos eingestuft.

Eine Weiterverwendung der WSF-Rückstände scheint besonders im Bausektor möglich und vielversprechend.

Das Einsatzpotential der Wirbelschichtfeuerung ist wegen der hohen Umweltfreundlichkeit und des breiten Brennstoffspektrums sehr groß. Diese Technik ist ideal für die Verbrennung schwieriger Brennstoffe oder solcher mit stark schwankender Qualität. Bei diesem Einsatzfall ist jedoch das Feststoffhandling besonders schwierig.

Für den Einsatz der WSF in Dampferzeugern liegen bei mittelgroßen und kleinen Anlagen umfangreiche Erfahrungen mit atmosphärischem Betrieb vor. Die Markteinführung in diesen Bereichen setzt z. Z. - noch etwas zögerlich - ein. Demonstrationsanlagen könnten diesen Prozeß beschleunigen. Für große Anlagen liegen bisher erst Planungen vor, von denen einige aber als baureif angesehen werden.

In diesem Bereich könnte die Druckwirbelschichtfeuerung besonders vorteilhaft eingesetzt werden; für die erforderliche Heißgasreinigung unter Druck ist jedoch bisher noch kein kommerziell

einsetzbares Verfahren verfügbar. Darüber hinaus fehlen Erfahrungen zur Belastbarkeit und zur Beanspruchung von Gasturbinen, die mit Wirbelschichtfeuerungsabgaben betrieben werden; auch das dynamische Verhalten solcher Anlagen erfordert weitere intensive Untersuchungen. Die kommerzielle Markteinführung des Kombiprozesses mit Druckwirbelschichtfeuerung wird daher in diesem Jahrzehnt noch nicht erwartet. Vorstufen dieses Prozesses - aufgeladene Wirbelschichtanlagen mit Abgasturbo-lader - könnten bei positiver wirtschaftlicher Bewertung eher marktreif sein.

Literaturverzeichnis:

- (1) V. Asche: VDI-Ber. 322 (1978) 7
- (2) Ruhrkohle 3/82, Beilage BAG Westfalen
- (3) W. Meyer: VDI-Ber. 322 (1978) 45
- (4) H.K. Petzel: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S. 357
- (5) M.J. Edwards: Coal and Energy Quart. No. 24 (1980) 16
- (6) Fluidised Bed Combustion of Coal, National Coal Board(NCB) Report, London 1980
- (7) K.G. Stroppel, J. Langhoff: VDI-Ber. 322 (1978) 37
- (8) H.G. Krischke: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S. 395
- (9) H.G. Krischke, J. Langhoff: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2.11.1981
- (10) H.G. Krischke, J. Langhoff: VGB-Kraftwerkstechn. 62 (1982) 119
- (11) W. Voß: Fachkongreß "Kohle konkret", Düsseldorf, 17./18. März 1982
- (12) P. Steller: Fachkongreß "Kohle konkret", Düsseldorf, 17./18. März 1982
- (13) R.L. Gamble: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.2, S. 307, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (14) Heat Engineering, XLIX No.6, Apr-Jun 1980, Foster Wheeler Corp., Livingston N.J.
- (15) V. Petersen et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.2, S. 212, US Dept. of Energy, CONF-800 428

- (16) L. Plaß et al.: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2.Nov. 1981
- (17) K. Janssen et al.: Fachtagung "Technik der Gas/Feststoffströmung", VDI-GVC, Düsseldorf 7./8. Dez. 1981, Preprints S. 211
- (18) G. Wargalla: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt., 1980, Jülich, S. 456
- (19) W. Poersch et al.: Brennstoff-Wärme-Kraft 31 (1979) 18-25
- (20) H. Münzner, H.-D. Schilling: VDI-Ber. 423 (1981) 195
- (21) H. Münzner: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2.Nov. 1981
- (22) H. Münzner, VDI-Ber. 286 (1977) 97
- (23) unveröffentlichte Messungen der Bergbau-Forschung GmbH
- (24) T.M. Modrak et al.: Century 2 Potpourri Conf., San Francisco, Ca., 13.-15. Aug. 1980, ASME 80-C2/Pwr-3
- (25) G. Mittelbach et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 58 (1978) 867
- (26) B.Bonn, H. Münzner: VDI-Ber. 322 (1978) 103
- (27) M.-Th. Mackowsky in: Ullmanns Encyklopädie der techn. Chemie, 4. Aufl., Bd. 14, S. 288, Weinheim 1977
- (28) I.G. Lutes, F.C. Wachtler: Proc. 6th Int'l Conf. Fluidized Bed Combustion, Vol.2, S.405, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (29) M. Hartmann, R.W. Coughlin: AIChE-J. 22 (1976) 490
- (30) B. Bonn, H. Münzner: Fluidised Combustion: Systems and Applications, Paper V 3, 3.-5. Nov. 1980, London, Inst. of Energy Symp. Series No. 4

- (31) J. Shearer et al.: Proc. 5th Int'l Conf. Fluidized Bed Combustion, Vol. II, S. 776, US Dept. of Energy, Mitre Corp. M 78 - 68
- (32) H. Münzner: VDI-Ber. 346 (1979) 319
- (33) R. C. Hoke et al.: EPA-Report 600/7-78-069
- (34) unveröffentlichte Messungen der Bergbau-Forschung GmbH
- (35) Rd Erl. d. MAGS u. d. MWMV NW v. 2.8. 1977
- (36) W. Wein et al.: Fachkonferenz "Coal Technology Europe 81", 9.-12. Juni 1981, Köln, Berichtsband, Vol. 1, S. 211
- (37) H. Kremer, u. I. Škunca: gwf-gas/Erdgas 117 (1976) 423
- (38) C.W.J. v. Koppen, Th. T.A. Paauw: Gaswärme int. 30 (1981) 24
- (39) G. de Soete: Gaswärme int. 30 (1981) 15
- (40) F.J. Pereira et al.: Fluidised Combustion: Systems and Applications, Paper V 4, 3.-5. Nov. 1980, London, Inst. of Energy Symp. Ser. No. 4
- (41) J.T. Shaw: Fluidised Combustion Conference, 16.-17. Sept. 1975, London, Inst. of Fuel Symp. Ser. No. 1
- (42) R. Beising, H. Kirsch: VGB-Kraftwerkstechn. 54 (1974) 268
- (43) H. Kirsch et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 61 (1981) 482
- (44) A. Raschka: Fachkongreß "Kohle konkret", Düsseldorf 17./18. März 1982
- (45) W. Wein: VGB-Kraftwerkstechn. 62 (1982) 185
- (46) K.S. Murty et al: Proc. 5th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol. II, S. 544, US Dept. of Energy, Mitre Corp. M78-68

- (47) U. Behn, G. Grimmer: BMI-DGMK (Bundesministerium des Innern-Deutsche Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und Kohlechemie)-Forschungsbericht 111-02, Hamburg 1981
- (48) G. Baumbach: International Flame Research Foundation (IFRF)-Joint Meeting, IJmuiden 27.-29. Oct.1981, Technical Note, Doc. Nr. F 24/ga/26
- (49) E. Ahland, H. Mertens: VDI-Ber. 358 (1980) 107
- (50) A. Herlan, J. Mayer: gwf-gas/erdgas 121 (1980) 301
- (51) I. Johnson et al.: Argonne Nat'l Lab. Ann. Report Oct.1979-Sept. 1980, ANL/CEN/FE-80-21
- (52) C.H. Hobbs et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.III, S.1274, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (53) C.H. Hobbs, R.L. Carpenter: Inhalation Toxicology Res. Inst., Status Rep. for US Dept. of Energy, Albuquerque, July 1980, LMF-83
- (54) P.F. Fennelly: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion, Vol.III, S.1236, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (55) H. Kirsch et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 61 (1981) 482
- (56) H.-Ch. Schrade: BWK 30 (1978) 397
- (57) R. Rennhack: Chem. Ing. Techn. 51 (1979) 921
- (58) E. Weber, F. Seeck: Techn. Mitt. 70 (1977) 49
- (59) F. Löffler: Chem. Ing. Techn. 52 (1980) 312
- (60) P. Böttger: BWK 30 (1978) 394
- (61) H. Kirsch, G. Schwarz: VGB-Kraftwerkstechn. 59 (1979) 202
- (62) K. Kauts et al.: VGB-Kraftwerkstech. 55 (1975) 672
- (63) J.L. Epler et al.: Oak Ridge Nat'l Lab. Report to DOE and EPA,
C.W. Francis et al.: Ann. Symp. on Solid and Hazardous Waste, Chicago, Mar. 17-20, 1980, zitiert nach (77)

- (64) D.H. Klein et al.: Environ. Sci. Technol. 9 (1975) 973
- (65) Swedish Coal-Health-Environment Project, Projekt Kol-Hälsa-Miljö, Summary of Situation Report, Oct. 1981
- (66) J.M. Allen, K.M. Duke: Proc. 71st Ann. Meeting Air Poll. Ass'n., Houston 1978
zitiert nach A.F. Martin, Techno-Ökonomie der WSF, Berlin 1982
- (67) J.L. Minnich, R.H. Miller: Proc. 6th Int'l Conf. Fluidized Bed Comb., Vol.III, S.913, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (68) Chem. Engng. 87 (1980) 72
- (69) R. Lewandowski, J. Jacobs: VGB-Kraftwerkstechn. 60(1980) 972
- (70) D. Leininger, Th. Schieder: Forschungsbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaften EUR-5960 DE (1978)
- (71) R. Köhling, D. Leininger: VDI-Ber. 322 (1978) 131
- (72) D. Leininger, Th. Schieder: Glückauf-Forsch. H. 41(1980)1
- (73) H.P. Lühr: VGB-Kraftwerkstechn. 58 (1978) 354
- (74) K. Goldschmidt et al.: VGB-Kraftwerkstechn. 59 (1979) 33
- (75) J. Dörich, G. Junkers: VGB-Kraftwerkstechn. 61 (1981) 218
- (76) B.A. Scarbrough: Proc. Fluidized Bed Comb. Techn. Exchange Workshop, Apr. 13-15, 1977, Vol.I, S.85, Mitre Corp. M77-85, and CONF-770 447-P-1
- (77) C.C. Sun, C.H. Peterson: Proc. 6th Int'l Conf. Fluidized Bed Comb., Vol.III, S.900, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (78) W.L. Stout et al.: ibid. S. 892
- (79) O.L. Bennett et al.: ibid. S. 885

- (80) T.W. Grimshaw et al.: *ibid.* S. 925
- (81) K. Fichtel: *VGB-Kraftwerkstechn.* 58 (1978) 499
- (82) G. Heide, H. Werner: *Braunkohle* 33 (1981) H.2, S.7
- (83) persönliche Mitteilungen
- (84) E. Wied: Fachtagung "Wirbelschichtfeuerung", Haus der Technik, Essen, 2. Nov. 1981
- (85) E. Wied, W. Spangenberg: *VDI-Ber.* 322 (1978) 49
- (86) W. Spangenberg: Statusseminar "Umweltfreundl. Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S. 433
- (87) H. Steven: *Energie* 32 (1980) 285
- (88) P. Wengefeld, E. Wied: *VDI-Ber.* 431 (1981) 111
- (89) Pressemeldung v. 9. Juni 1982; Frankfurter Zeitung, "Blick durch die Wirtschaft"
- (90) *Energie* 33 (1981) 220
- (91) E. Bitterlich: *VGB-Kraftwerkstechn.* 60 (1980) 366
- (92) E.L. Daman: *Heat Engineering*, XLIX No.2, Apr.-Jun. 1979, Foster Wheeler Corp., Livingston N.J.
- (93) M. Siman-Tov, J.E. Jones: *Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Comb.*, Vol.II, S.515, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (94) S. Panico, C.R. McGowin: *ibid.* S. 538
- (95) E.J. Oakes, F. Engström: *Power Engng.* 86(1982) No.3, S.56
- (96) L. Bengtson, F. Engström: *Int. Symp. on Economic Aspects of Coal Pollution Abatement Techn.*, Petten, May 24-28, 1982
- (97) M. Wellauer, R. Kausche: *Techn. Rundschau Sulzer* (1981) H.4, S. 137

- (98) H. Brandes et al.: Energiewirtsch. Tagesfragen 31(1981)112
- (99) J. Highley: Environm. Sci. Techn. 14 (1980) 270
- (100) J. Highley: J. Inst. Energy 53 (1980), No. 417, S. 208
- (101) J. Highley et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Comb., Vol.2, S. 318, US Dept.of Energy, CONF-800 428
- (102) Projektleitung Energieforschung: Jahresbericht 1980, Programm-Nr. 2.1.4.28, Jülich 1982
- (103) K.A. Reed, G.G. Cervenka: Proc. 5th Int'l Conf. Fluidized Bed Comb., Vol.II, S. 285, US Dept. of Energy, Mitre Corp. M 78-68
- (104) P.F. Lipari, T.G. Well, Jr.: ibid. S. 313
- (105) R.B. Covell: ibid. S. 326
- (106) W.J. Bradley: ibid. S. 343
- (107) D.N. Garner et al.: ibid. S. 355
- (108) C.K. Sadler et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Comb., Vol.II, S. 507, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (109) E. Wittchow et al.: VDI-Ber. 322 (1978) 71
- (110) E. Wied, H.D. Schilling: Forschung in der Kraftwerkstechnik (1980) 181
- (111) Morgantown Energy Technology Center, Pressurized Fluidized Bed Combustion, Topical Report, DOE/METC/SP-185, Oct. 1980
- (112) DOE/EPRI, PFBC Workshop, Jan. 17-20, 1982, N. Orleans, La., Panel D Report
- (113) B. Bonn: Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6.-8. Okt. 1980, Jülich, S. 527
- (114) S. Moskowitz: Int. Power Gen. 3 (1980) 75

- (115) S. Moskowitz et al.: Pressurized Fluidized Bed Comb. Techn. Exchange Workshop, S. 54, June 5-6, 1979, Secaucus N.J., US Dept. of Energy, CONF-790 6157
- (116) D.H. Broadbent et al.: VDI-Ber. 322 (1978) 79
- (117) M. Kaden, Statusseminar "Umweltfreundliche Kraftwerkstechnologie", 6-8. Okt. 1980, Jülich, S. 414
- (118) E.L. Carls et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Comb., Vol.II, S. 225, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (119) NCB/IEA Grimethorpe Ltd., Towards Lower Cost Power, Grimethorpe (Barnsley), S. Yorkshire, 1982
- (120) J.J. Markowsky et al.: Pressurized Fluidized Bed Comb. Techn. Exchange Workshop, S. 15, June 5-6, 1979, Secaucus, N.J., US Dept. of Energy, CONF-790 6157
- (121) S.A. Jansson et al.: Proc. 6th Int'l Conf. on Fluidized Bed Comb., Vol.II, S. 697, US Dept. of Energy, CONF-800 428
- (122) zitiert nach: E. Wied, VGB-Kraftwerkstechn. 58 (1978)554
- (123) Pressurized Fluidized Bed Power Station, Deutsche Babcock Anlagen AG, Report No. 111 (1980)
- (124) G.J. Duffy et al.: Australian Coal Miner 3(1981), [April] S.18
- (125) H. Lauer: VGB-Kraftwerkstechn. 61 (1981) 844