

Bundesministerium für Forschung und Technologie Forschungsbericht

Technologische Forschung und Entwicklung

- Nichtnukleare Energietechnik -

BAU UND VERSUCHSBETRIEB EINER PILOTANLAGE FÜR DIE HOCHTEMPERATURGASREINIGUNG MIT FILTRATIONSABSCHEIDERN

von

Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Weber Dipl.-Ing. Reinhard Schulz Dipl.-Ing. Joachim Bender

Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität – Gesamthochschule – Essen

JB/TIB Hannover

89

119809

Instituts- und Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Weber

Berichtsblatt

1. Bencatsaummer	1. Benchisari	J .		
BMFT FB	Schlußbericht			
4. Titei des Berichts				
Bau und Versuchsbetrieb einer Pilotanlage für die Hochtemperaturgas-				
reinigung mit Filtrationsabscheidern				
Weber, Ekkehard.	3. Abschlußdarum des Vorhabens			
Schulz, Reinhard	30.06.1986			
Bender, Joachim		··· verorrennichungsdarum		
8. Ourentunrende institution (Name, A	Aaresse:	1 3 Ber Nr. Ourcaniterence Insuranon		
T				
Institut fur Umw	eltverfahrenstechnik			
der Universitat	- GH - Essen	10. Forderungskennzeichen		
Leimkugeistrabe		03E-1259-A		
Pusciach iu 37 b	4	001 1200 11/		
4200 Econt 1		11. Settenzani		
4300 Essen I		/5		
		12. Literaturangaoen		
·····		. 10		
3. Fordernde Institution (Name, Adress	<1	14. Tabalan		
	· · · ·			
Bundesministerium	für Forschung und Technologie (BMFT)			
Postfach 200706				
		15. Abbisaungen		
5300 Bonn 2				
		26		
. Zusatziiche Angaben				
-	•			
7. Vorgeiest bei (Titet, Ort, Datum)				
Kurztassung				
Im Rahmen des For	rschungsvorhabens war eine Pilot	anlage für die Hochtem-		
peraturgasreinigu	ung mit Filtrationsabscheidern z	u bauen und an verschieden-		
en Steinkeblanfe	ionungon boi Detricheterre			
Ale Eiltermedien	vunden Geuche Franzischerature	n bis 1000 °C zu erproben.		
ATS LITTETHEOTEN	worden Gewebe, Fasereremente un	d Sinterkeramiken getestet.		
Die Untersuchungs	n hohon encohon della de la la			
Filtrationochoch	en naben ergeben, dab eine Hocht	emperaturentstaubung mit		
Wonnenen Ergebnig	stoern technisch realisierbar is	t. Basierend auf den ge-		
schichtvorbrong	sen wird am beispiel einer druc	kaurgeladenen Wirbel-		
schichtverbrennur	ig eine Grobaniage vertahrenstec	hnisch konzipiert und aus-		
Jeregu.				
Schlagworter				
locntemperatur-Ga	sreinigung Heißgas	sgewebefilter		
Heißgasfiltration				
Hauchgasentstaubung				
		2. 7ms		

Vertrich und Verkauf nur durch Fachurtorurationszentrum Energie, Physik, Mathematik CimbH. Kernforschungszentrum, 7514 Figgenatein I copolishafen 2

Document Control Sheet

BMFT FB	Final Report		1.
Design and Operation	of a Pilot Plant for	High Te	emperature Gas Cleaning
by Barrier Filtratic	n	-	
Weber, Ekkehard			• End of Project
Schulz, Reinhard			30.05.1985
Bender, Joachim			
Performing Organization (Name, Address)			9. Originator's Report No.
Institut für Umweltv	erfahrenstechnik		
der Universität – GH – Essen Leimkugelstr. 10			10. Reference No.
			03E-1259-A
			11. No. of Pages
4300 Essen 1			75
			12. No. of References
			10
- Sponsonny Agency (Name, Adress)			14. No. of Tables
Bundesministerium für Fo	rschung und Technologie (E	BMFT)	7
Postfach 200706			IS. No. of Figures
5300 Boon 2			26
Supplementary Notes			
Presented at (Title, Place, Date)	······		·
Within the scope of for high temperature had to be built oper	the research and devel gas cleaning and the ating at different coa onn ^o r	lopment testing 1-fired	project a pilot plant of filtrating media power stations and at
cemperatores op to r	JUU U.		
Fabrics, fibre element The investigations has filters can be realize report presents for the the process engineer:	nts and bonded ceramic ave shown that hot ga zed technically. Based ne example of a pressu ing and the layout of	s were as filtr on the wrized f a large	used as filter media. ation with barrier obtained results the luidized bed combustion scale filter plant.
Korroras Hot gas filtration High temperature gas Flue gas cleaning	cleaning	High to	emperature fabric filter

EMFT-Vordr. 124/3832/01.82

Inhaltsverzeichnis

.

. .

.

Seite

~、

•

.

1.	Einleitung und Aufgabenstellung	6
2.	Stand der Forschung	9
3.	Beschreibung der Versuchsanlage	16
	3.1 Aufbau der Pilotanlage	16
	3.2 Funktionsweise der Anlage	23
	3.3 Betriebserfahrungen	25
4.	Untersuchte Filtermedien	30
	4.1 Gewebeschläuche	30
	4.2 Starre Filtermedien	34
5.	Versuchsergebnisse	38
	5.1 Abscheideverhalten	42
	5.2 Druckverlust- und Abreinigungs-	
	verhalten	45
	5.3 Dauerstandsverhalten	58
6.	Konzeption einer Großanlage	61
7.	Zusammenfassung	71

.

8. Literatur

- 5 -

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Entwicklung von Heißgas-Filtrationsabscheidern wurde notwendig, weil viele industrielle Prozesse nur dann optimal realisiert werden können, wenn eine Staubabscheidung unter extremen Gas- und Temperaturbedingungen durchgeführt wird. Bei Energieumwandlungsprozessen, wie beispielsweise bei der druckbetriebenen Wirbelschicht oder bei Kohlevergasungsanlagen, soll das unter einem Überdruck bis 20 bar und mehr stehende Produktgas bei möglichst hoher Temperatur in einer Gasturbine entspannt werden, da der Turbinenwirkungsgrad mit wachsender Temperatur ansteigt /1/.

Bei anderen industriellen Verfahren, die eine Heißgasreinigung erfordern, können zusätzlich zu den hohen Gastemperaturen noch aggressive Gasbestandteile, wie Säuren, Alkalien oder gasförmige Salze hinzukommen.

Großtechnisch können unter diesen extremen Einsatzbedingungen bislang nur Zyklone eingesetzt werden. deren Reingasstaubgehalte aber für viele technische Prozesse und für die Forderungen des Umweltschutzes zu hoch sind. Alternative Verfahren zur Hochtemperatur-Filtration sind Wascher mit HT-beständigen Waschflüssigkeiten und auch besonders konstruierte Elektrofilter. Besonders beim Elektrofilter, bei dem die physikalische Wirksamkeit druck- und temperaturabhängig ist, sind die Untersuchungen noch nicht soweit fortgeschritten, daß verbindliche und vergleichende Angaben gegenüber Filtrationsabscheidern möglich sind. Selbst wenn man annimmt, daß die Elektro-Filterentwicklung ähnlich erfolgreich wie die der Filtrationsabscheidung verläuft, werden sich mit Sicherheit unterschiedliche Einsatzbereiche ergeben,

wie dies auch im Niedertemperatur-Bereich der Fall ist. Damit ist die Entwicklung von HT-Staubabscheidern technisch und wirtschaftlich unbedingt notwendig.

Daher wurde in den Jahren 1978 – 1982 ein vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördertes Vorhaben zur Untersuchung der Eignung von Filtrationsabscheidern zur energiesparenden Gasreinigung bei hohen Gastemperaturen und hohen Gasdrücken vom Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität Essen durchgeführt. Es konnte nachge-. wiesen werden, daß sich eine Reihe anorganischer Filtrationsmaterialien prinzipiell für die Hochtemperatur-Staubabscheidung auch bei Anwesenheit von aggressiven Gaskomponenten eignen /2/.

Ziel des in diesem Bericht behandelten Anschlußvorhabens war es, die im Labor entwickelten Filtrationsmaterialien unter realen Gas- und Staubbedingungen im Filterdauerbetrieb bei Temperaturen bis 1000 ^OC zu testen.

Dazu wurde eine Pilot-Filtrationsabscheideanlage konstruiert, aufgebaut und mit den heißen Abgasen verschiedener Kohlefeuerungen betrieben. Auf Untersuchungen zu folgenden Punkten wurde besonderer Wert gelegt:

- Druckverlust- und Abreinigungsverhalten
- Abscheidewirksamkeit
- Standzeit der eingesetzten Filterelemente.

Weitere Vorhabensziele waren außerdem die Untersuchung des Betriebsverhaltens der Pilotanlage und deren Optimierung für einen störungsfreien Dauerbetrieb sowie der Test und die Weiterentwicklung von Absperrorganen ohne bewegliche Teile.

Nach Abschluß der Experimente war auf Basis der Versuchsergebnisse die Verfahrenstechnik einer Großfilteranlage zu konzipieren und entsprechende Auslegungsdaten zu erarbeiten.

2. Stand der Forschung

In der industriellen Entstaubungstechnik gehören Filtertemperaturen oberhalb 280 ^oC bis heute zum Bereich der zu entwickelnden Heißgasfiltration. In diesem Temperaturbereich können bekannte Filtermaterialien wie Teflon, Nomex oder beschichtete Glasfasern nicht mehr eingesetzt werden. Tabelle 1 zeigt die maximal möglichen Betriebstemperaturen und die Verarbeitungsform heute großtechnisch eingesetzter Filtrationsmedien /3/.

Material	Temperatur ^O C		verarbeitbar zu
	Dauer _. Spitzen		
	-		
Ryton	170	190	Gewebe, Filz
Aramid (Nomex)	180	220	Gewebe, Filz
beschichtete			
Glasfaser	240	2.70	Gewebe, Filz
PTFE (Teflon)	250	280	Gewebe, Filz
Metallfasern	500	550	Filz, Sinterkerze

Tabelle 1: Filtermedien für die Entstaubung bei erhöhten Temperaturen

Eine Ausnahme bilden die Metallfasern, die bis zu Temperaturen von 550 ^OC verwendet werden können. Aufgrund der geringen Faserstärke und der infolge des Herstellungsverfahrens hochaktiven Faseroberfläche besteht jedoch bei erhöhten Temperaturen die Gefahr der Korrosion und Verzunderung /4/. Nachteilig wirkt sich darüber hinaus der hohe Materialpreis aus, wodurch offensichtlich bislang eine großtechnische Verwendung verhindert wurde.

Im Temperaturbereich oberhalb 550 ^oC bietet sich die Anwendung anorganischer Filtermedien an. Aluminiumoxyd-Silikat- und veredelte Glasfasern besitzen neben der Temperaturbeständigkeit bis 1000 ^oC und mehr eine gute chemische Beständigkeit gegenüber aggressiven Gaskomponenten. Sie können zu Vliesen, Geweben oder vakuumgeformten Filterelementen verarbeitet werden (Tabelle 2).

Material	Temperaturbe- ständigkeit ^O C	verarbeitbar zu:
veredelte Glasfasern, Quarz-		0k
Aluminiumoxyd-	DIS 1000	Gewede
Silikat-Fasern	bis 1250	Vlies, Faser- formteil
Aluminiumoxyd-Fasern	bis 1500	Vlies, Faser- formteil
Siliciumcarbid-		
Granulat	bis 1200	Sinterkerzen

Tabelle 2: Für die Heißgasfiltration geeignete Materialien aus /2/. Wegen der geringen Scheuerfestigkeit und der Sprödigkeit der Fasern liegt das Hauptproblem der Anwendung für die Heißgasfiltration in der Entwicklung und Herstellung von Filterelementen mit genügender mechanischer Festigkeit für einen industriellen Filterdauerbetrieb.

Um ein mechanisch stabiles Filterelement aus keramischen Fasern herzustellen, werden sie auf verschiedene Weise gefertigt. Zur Festigkeitssteigerung werden in Geweben teilweise Metallfäden eingelagert. Filze und Vliese werden mit einer äußeren und einer inneren Stützvorrichtung versehen oder von beiden Seiten mit einem Gewebe abgedeckt und vernadelt /5/. Eine Alternative hierzu stellen starre Faserformteile dar, bei denen eine poröse Faserschicht durch einen Binder zusammengehalten wird /6/.

In der Normaltemperatur-Filtertechnik lassen sich diese Heißgas-Filterelemente bei Abscheidegraden über 99 % ohne Probleme einsetzen. Schwierigkeiten entstehen meist erst beim Aufheizen der Filterelemente auf ihre spätere Einsatztemperatur wegen der Schwindung des organisch oder anorganisch gebundenen Fasermaterials bei Formteilen, oder wegen der unterschiedlichen Wärmedehnung der verschiedenen im Filterelement vorhandenen Materialien. So kann es beim Aufheizvorgang wegen der stärkeren Ausdehnung eines metallischen Stützkorbes gegenüber einem keramischen Gewebe zu Rissen im Filterelement kommen, in jedem Fall lockert sich aber das Gewebe nach mehreren Temperaturwechseln (Bild 1). Dies wird sowohl durch eigene Erfahrungen, als auch durch Literaturangaben bestätigt.

- 11 -



Bild 1: Hochtemperatureinwirkung auf einen Filterschlauch mit metallenem Stützkorb

12

Aus diesen Gründen war die Entwicklung einer für die Hochtemperaturtechnik geeigneten Stützvorrichtung für Gewebe notwendig. Da außerdem bei Gewebeschläuchen die Naht bei hohen Temperaturen eine Schwachstelle bildet, wird man in der Heißgasfiltration zweckmäßigerweise auf nahtlos gewebte Schläuche zurückgreifen müssen. Bei der Verwendung von Vliesen und Filzen entstehen aufgrund der Wärmedehnung ähnliche Probleme, da diese Materialien zusätzlich zur inneren noch mit einer äußeren Abstützung versehen werden müssen.

Faserformteile und Sinterkeramik-Filterkerzen haben demgegenüber den Vorteil, daß sie selbsttragend ausgeführt sind und deshalb diese Probleme hier nicht auftreten können. Bei den Sinterkeramikkerzen wirkt sich jedoch das hohe Materialgewicht ungünstig auf die Filterkonstruktion aus.

Filtergroßanlagen, die im Bereich der Hochtemperaturtechnik über 700 ^OC arbeiten, existieren bislang nicht. Es liegen zumeist nur theoretische Überlegungen vor, wie z. B. von Reed /7/, der in einer Studie mögliche Ausführungsformen verschiedener Filtrationsabscheider in der Kohletechnologie zeigt und eine Kostenanalyse durchführt.

Zur Zeit befinden sich jedoch bei mehreren Firmen und Instituten verschiedene keramische Filtrationselemente in der Erprobung. Tabelle 3 zeigt die auf dem Gebiet der Heißgasreinigung tätigen Firmen und Institute.

Institutionen	Zyklon	Elektro- filter	Schütt- schicht	Filtra- tion	Verschie- denes
Acurex					
Air Pollution Techn			1.7	В	
Argonne NI	U		W		A
Bekaert				M	А
Buell Dressar				R	
Combustion Power Comp			1.4	0	
Curtiss Wright	C	_	AA.		
Denver Research Inst	U U				
Ducon	c	1	F		
Exxon	C		F	Р	
General Electric	C		1	Б	Δ
Inst. Gastechnik				D	~
Linhardt				ð	м
MIT			F		11
NCB CRE				D	
NCB CURL	C.R		+	ה ס	
NCB IEA Grimethorpe	c			J	
Research Cottrell		+			
Rockwell				P	
Sandia NL	+			U	
Stal Laval	С				
Technion			W		
Universität Essen		+	+	В	N
Virginia Polytechnic			F	-	
Westinghouse	C;R		F	Б,М	A

C: konventionelle Ausführung

- M: modifizierte Ausführung
- F: Festbettschüttschicht
- B: keramische Filtrationsmedien
- A: Absorption von Schadgasen

R: Zyklone mit rotierenden Einbauten

- W: Wanderbettschüttschicht
- M: metallische Filtrationsmedien
- N: Naßwäscher
- Tabelle 3: Übersicht über die auf dem Gebiet der Hochtemperatur-und/oder Hochdruck-Gasreinigung tätigen Institutionen

Bei Hochtemperatur-Filterversuchen in den USA wurden keramische Gewebe oder Filze mit metallischen oder keramischen Abstützungen verwendet. Nach einer Testdauer von 50 bzw. 140 Stunden kam es bei einer Filtertemperatur von 815 ⁰C zur Zerstörung der Filterelemente /8/.

Positiver fielen dagegen Tests mit nahtlos gewebten Nextel-Filterschläuchen aus, die bei einer Temperatur von 455 ^OC zerstörungsfrei über einen Zeitraum von 882 Stunden mit dem Abgas einer Feuerung beaufschlagt wurden /9/.

Die Aktivitäten des Institutes für Umweltverfahrenstechnik der Universität Essen auf dem Gebiet der Heißgasfiltration konzentrierten sich nach anfänglichen Laborversuchen auf die Langzeituntersuchungen verschiedener Filterelemente in einer Pilotanlage, die in einem Kohlekraftwerk betrieben wurde. Hier wurde vor allem das in Zusammenarbeit mit einer entsprechenden Herstellerfirma entwickelte Filterelement CF3/CF4 bei Temperaturen bis 900 ^OC im Dauerbetrieb getestet.

Darüberhinaus konnte in einer Versuchsreihe das Hochtemperaturverhalten verschiedener Stützkörbe getestet und eine für die Hochtemperaturtechnik geeignete Gewebehalterung entwickelt werden.

Die Versuche verliefen vielversprechend, so daß aufgrund der gemachten Erfahrungen heute auf größere Filtereinheiten übergegangen werden kann.

3. Beschreibung der Versuchsanlage

Die Pilotanlage für die notwendigen Untersuchungen wurde im Jahre 1981 konstruiert und aufgebaut und seitdem mit den heißen, staubbeladenen Abgasen folgender Kohlefeuerungen der Saarbergwerke betrieben:

- Wirbelschichtfeuerung (3/1982 7/1982) Standort: Kraftwerk Fenne III, Völklingen
- Schmelzkammerfeuerung (10/1982 5/1983)
 Standort: Kraftwerk St. Barbara 2, Bexbach
- Trockenfeuerung (9/1983 6/1986) Standort: Kraftwerk Weiher III, Quierschied

Unterbrochen wurden die Versuchsphasen lediglich durch die Umsetzungsphasen der Pilotanlage an die anderen Standorte und durch Kesselstillstände. In periodischen Abständen wurde die Pilotanlage technisch überprüft und – bei Notwendigkeit – auch überholt.

3.1 Aufbau der Pilotanlage

Im Laufe des Versuchszeitraumes wurde die Pilotanlage mehrmals geringfügig apparativ verändert, worauf in Kapitel 3.3 näher eingegangen wird. Bild 2 zeigt das Fließbild_der Pilotanlage am Ende des Versuchszeitraumes am Standort Weiher III.



Fließbild der Pilotanlage

Das Rohgas-Absaugrohr wurde an einer Öffnung des Kessels angebracht und ragte etwa 100 mm in den Verbrennungsraum hinein. Das hier abgesaugte Rohgas durchströmte den Hochtemperatur-Kugelhahn und teilte sich anschließend auf die beiden Filter auf, die parallel durchströmt wurden.

Um konstante Versuchstemperaturen zu gewährleisten und um die Temperaturverluste der Rohgaszuleitung auszugleichen, wurden die Filterbehälter elektrisch beheizt. In sie wurden Filterelemente bis 1500 mm Länge hängend eingespannt und von außen mit dem staubbeladenen Rohgas angeströmt. Es konnten entweder 1 Filterelement mit einem Durchmesser zwischen 150 und 250 mm oder 3 Filterelemente bis 100 mm Durchmesser gemäß der Anordnung nach Bild 3 eingebaut werden.

Zur Abreinigung ragte ein Blasröhr von oben zentrisch in den Reingasraum hinein (Bild 4), über das die Abreinigungsdruckstöße in das Filterelement hineingegeben wurden. Waren drei Filterelemente eingebaut, wurde unter diesem Rohr noch eine entsprechende Umlenkung für die Abreinigungsluft angebracht.

Die zur Abreinigung benötigte Luft wurde dem Preßluftnetz der Kraftwerke entnommen und in einem Vorratsbehälter, in dem der Druck konstant gehalten wurde, zwischengespeichert. Um Abreinigungsvordrücke oberhalb des Druckes des Preßluftnetzes zu ermöglichen, konnte der Druck im Vorratsbehälter durch einen Kompressor bis auf 10 bar gesteigert werden. Die Steuerung des Abreinigungsvorganges



Bild 3: Anordnung der Filterkerzen



erfolgte über einen Rechner, der die Taktzeit der Ventile und die Abreinigungslänge bestimmte.

Auf der Reingasseite befand sich hinter jedem Filter ein pneumatisches Absperrorgan, ein sogenanntes Wirbelkammerventil, mit dem der Gasstrom des Filters während des Abreinigungsvorganges gesperrt werden konnte (Bild 5).

Danach wurden die beiden Teilgasstöme wieder zusammengeführt und durch einen Sprühwascher auf ca. 40 ^OC abgekühlt. Nach Durchströmen eines Tropfen- und Kondensatabscheiders wurde das Reingas durch das Volumenstrommeßgerät geführt und anschließend von der Vakuumpumpe zurück in den Kessel gefördert. Der Volumenstrom wurde vor Eintritt in die Vakuumpumpe durch ein im Bypass betriebenes Stellventil geregelt und während der Versuche konstant gehalten.

Der durch die Abreinigungsimpulse abgeblasene Staub sammelte sich im unteren Teil des Filterbehälters und wurde über Doppelklappenschleusen diskontinuierlich in Staubsammelbunker gefördert.

Auf der Rohgasseite befand sich eine Kalkaufgabe, um unter anderem auch die Staubbedingungen einer Wirbelschicht simulieren zu können.

Während der Dauerversuche wurden die Betriebsbedingungen, die Differenzdrücke der beiden Filter, die Absolutdrücke in der Roh- und der Reingasleitung, die Gastemperaturen an verschiedenen Stellen der Pilotanlage und der Gasvolumenstrom kontinuierlich über einen Rechner gemessen.



und registriert. Roh- und Reingasstaubmessungen wurden in regelmäßigen Abständen gravimetrisch durchgeführt.

3.2 Funktionsweise der Anlage

Während der Versuche wurde aus dem Kraftwerkskessel ein kleiner Teilstrom des Verbrennungsgases abgesaugt, mit dem die Filter beaufschlagt wurden. Dieser Gasstrom konnte mit Hilfe des Hochtemperatur-Kugelhahnes abgesperrt werden, so daß die Anlage über das Bypass-Ventil mit Falschluft betrieben werden konnte, beispielsweise zu Aufheiz- und Abkühlvorgängen.

Um einen kontinuierlichen Dauerbetrieb zu gewährleisten, wurde die Pilotanlage durch den vorerwähnten Rechner überwacht. Neben der Meßwerterfassung und -verarbeitung übernahm er die Steuerung des Abreinigungsvorganges. Im Off-Line-Betrieb der Anlage sperrte das Wirbelkammerventil den Gasstrom des abgereinigten Filters, während das zweite, nicht abgereinigte Filter in diesem Zeitraum den Gesamtvolumenstrom der Anlage übernahm. Dann wurden kurz hintereinander mehrere Druckstöße mit genau festgelegter Dauer über ein Rohr in das abgesperrte Filterelement hineingegeben, wodurch sich ein Teil des angelagerten Staubkuchens von der Filteroberfläche löste. Nach Beendigung der Impulse blieb das Filter noch 1 - 2 Minuten gegenüber dem Gasstrom abgesperrt, um den abgeblasenen Stäuben genug Zeit zu lassen, nach unten in den Staubtrichter abzusinken.

Im On-Line-Filterbetrieb dagegen wurden die Filter abgereinigt, ohne daß der Hauptgasstrom des betreffenden Filters abgesperrt wurde.

Für diese beiden Betriebsweisen ließen sich durch den Rechner die Takt- und Impulszeiten ein- und umstellen und so wechselnden Betriebsverhältnissen schnell anpassen. Die Abreinigungsvorgänge wurden entweder nach Erreichen eines bestimmten Differenzdruckes oder nach Ablauf einer bestimmten Zeitdauer ausgelöst. Die zeitabhängige Abreinigung bietet den Vorteil, daß sich schwankende Differenzdrücke nicht auf die Zyklusdauer der Abreinigungen auswirken können.

Darüberhinaus steuerte der Rechner während des Staubaustrages die Doppelklappenschleusen und hielt mit Hilfe des pneumatischen Zylinders und eines Meißels die Absaugstelle von Verschlackungen des Kessels frei. Bei wesentlichen Abweichungen der Differenzdrücke, bestimmter Temperaturen an der Anlage oder des Volumenstromes von den Sollwerten konnte der Rechner die Pilotanlage über eine Notaus-Schaltung außer Betrieb setzen. Dies war meist dann der Fall, wenn der Kraftwerkskessel abgeschaltet wurde.

3.3 Betriebserfahrungen

Im ersten Abschnitt des Forschungsvorhabens wurde auf der Rohgasseite der Pilotanlage eine Gasweiche eingesetzt. Mit Hilfe der Gasweiche ließ sich, ohne mechanisch bewegte Teile, der Gasstrom durch kurze Steuerluftimpulse umschalten, so daß wahlweise immer nur ein Filter mit Gas beaufschlagt wurde, während das andere, nicht durchströmte Filter, abgereinigt werden konnte. Dieses bistabile Verhalten ergibt sich aufgrund des Coanda-Effektes, dem Anhaften eines Freistrahles an einer Wand (Bild 6).

Im staubbeladenen Gas funktionierte die eingesetzte Gasweiche nicht immer zufriedenstellend, da bei Ablagerung von agglomerierten Staubteilchen im Spalt der Weiche ein einwandfreier Betrieb nicht mehr gewährleistet war. Auch der Einbau eines Vorabscheiders (Zyklon) vor der Gasweiche war nur wenig erfolgreich. Durch die Anlagerung von Feinstaub in den Strömungstoträumen wurde offensichtlich eine Veränderung der Geometrie der Gasweiche bewirkt, so daß ein einwandfreies Funktionieren nicht mehr gewährleistet war. Für den Einsatz der Gasweiche in staubhaltigen Medien muß die Geometrie des Schaltelementes so verändert werden, daß Staubablagerungen weitgehend



26 -

Bild 6: Funktionsweise einer bistabilen Gasweiche (Coandaeffekt) vermieden werden, bzw. keinen Einfluß auf die Funktionstüchtigkeit ausüben. Die Entwicklung derartiger Elemente wurde im Parallelvorhaben 03E-1089A durchgeführt /10/.

Aus diesem Grund wurde die Gasweiche am Standort Weiher III durch ein konventionelles Hosenrohr ersetzt und die Filter parallel betrieben, wobei beim Abreinigen die Wirbelkammerdrosseln zum Sperren des jeweiligen Gasstromes eingesetzt wurden. Der Zyklon wurde ebenfalls beseitigt, da er nur den Zweck hatte, grobe Staubpartikel und Agglomerate von der Gasweiche fernzuhalten.

Die anfangs eingesetzten Vorheizungen wurden ausgebaut, weil sie wegen mehrerer Ausfälle nicht zuverlässig genug arbeiteten und außerdem nur eine unzureichende Temperaturerhöhung des Rohgases vor dem Eintritt in die Filter erzielten.

Zur Verbesserung des Betriebsverhaltens der Pilotanlage wurden im Laufe der Untersuchungen noch weitere apparative Veränderungen vorgenommen:

Der Doppelrohrkühler auf der Reingasseite wurde außer Funktion gesetzt und stattdessen Wasser in der senkrechten Rohrleitung versprüht. Dies hatte neben der effektiveren Kühlung den Zweck, die beim Abkühlen des Reingases im Temperaturbereich zwischen 100 und 250 ^OC auskondensierenden festen Bestandteile aufzunehmen und so ein allmähliches Verstopfen der Reingasleitung zu verhindern. Da aber das zu entwickelnde Hochtemperaturfilter in allen Anlagenteilen oberhalb 400 ^OC betrieben wird, stellen diese Kondensationen kein Problem für die Heißgasfiltration dar. Bis Anfang 1984 konnte lediglich eine Filtertemperatur bis 720 ^OC erreicht werden. Da beim Transport der Anlage an den neuen Standort Weiher III außerdem Teile der Filterbeheizung zerstört wurden, installierte man im Februar 1984 neue Filterbehälter mit verbesserten Heizungen, die eine Filtertemperatur bis über 1000 ^OC ermöglichten.

Nach diesem Umbau konnten Dauerversuche mit Filtertemperaturen von anfangs 920 ^oC gefahren werden. Bei Temperaturen über 800 ^oC wurde jedoch der Erweichungspunkt des Flugstaubes überschritten, was zu einer Verklebung der Filteroberfläche und somit zu einer Verschlechterung des Abreinigungsverhaltens führte. Abhilfe schaffte speziell beim Staub des Kessels Weiher III die Zugabe von Kalk zum Rohgas.

Die Abreinigung erfolgte ausschließlich über das Pulse-Jet-Verfahren, da die Filter aus apparativen Gründen nicht für eine Rückspülung vorgesehen waren. Zur Verbesserung der Abreinigungseffektivität konnte beim Off-Line-Betrieb die Sperrluftmenge der Wirbelkammerdrosseln so erhöht werden, daß während der Abreinigung eine leichte Rückströmung durch das gesperrte Filter stattfand.

Eine alleinige On-Line-Abreinigung konnte nicht realisiert werden, weil die Agglomerationsfähigkeit bzw. die Sinkgeschwindigkeit der Staubpartikel im Hochtemperaturbereich zu gering ist, um entgegen der Aufwärtsströmung im Filter schnell genug in den Staubtrichter abzusinken. Die feinen Staubpartikel bleiben zu lange in der Schwebe und lagern sich zumindest teilweise sofort nach dem Abreinigungsdruckstoß wieder auf der Filteroberfläche an. Ein stetiger Differenzdruckanstieg war bei dieser Anlagenfahrweise die Folge. Deswegen mußte der On-Line-Betrieb an der Pilotanlage aufgegeben werden.

Filtrationsabscheider werden üblicherweise dann abgereinigt, wenn ein bestimmter maximaler Druckverlust überschritten wird. Schwankungen der Kessellast verursachten jedoch unterschiedliche Staubbeladungen des Rohgases und damit auch Schwankungen im Differenzdruck der Filter. Weil dies zu unterschiedlich langen Zyklusdauern führte, wurde überwiegend zeitabhängig abgereinigt.

Die zeitabhängige Abreinigungsweise war darüberhinaus in den ersten 100 – 200 Stunden beim Einsatz neuer Filterelemente sinnvoll, da man während dieser Einfahrphase noch keine konstanten Betriebsbedingungen fand. Erst danach stellte sich ein nahezu gleichbleibender Enddruckverlust vor der Abreinigung ein, .der für eine druckabhängige Abreinigungssteuerung notwendig ist.

Am Standort Weiher III führten zunächst Verschlakkungen an der Innenwand des Kessels innerhalb eines Zeitraumes von 6 – 10 Stunden zum Verstopfen der Rohgas-Absaugstelle, wenn sie nicht in regelmäßigen Abständen freigestoßen wurde. Hierzu wurde ein pneumatisch betriebener Zylinder an der Absaugstelle angebracht, der, vom Rechner gesteuert, in periodischen Abständen die Absaugleitung mit einem Meißel freistieß. Auf diese Weise konnte über einen großen Zeitraum ein störungsfreier Filterdauerbetrieb ohne manuelle Wartung gewährleistet werden.

4. Untersuchte Filtermedien

In den vorangegangenen Laboruntersuchungen zeigte sich, daß es eine Reihe von anorganischen Materialien gibt, die sich prinzipiell zur Hochtemperaturentstaubung eignen. Von den getesteten Filterelementen, die bei hohen Temperaturen eine ausreichende Festigkeit und die nötige chemische Beständigkeit gegenüber aggressiven Gasbestandteilen aufweisen, wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Filtermedien ausgewählt und in Dauerstandsversuchen in der Pilotanlage eingesetzt.

Filtermedium	Kurzbezeichnung	Hauptbestandteile
Gewebeschläuche	NG 2	Boraluminium-Sili- katglas
	G 5 .	Quarzglas
Sinterkeramik-Kerze	SK 3	Siliziumkarbid
Faserformteil	CF 3 CF 4	Aluminiumoxyd-Silikat- Mischfaser

Tabelle 4: Eingesetzte Filterelemente

4.1 Gewebeschläuche

Die eingesetzten Gewebe NG 2 und G 5 mußten an den Längsseiten miteinander vernäht werden, so daß ein Schlauch entstand. Eine nahtlose Herstellung war im Institut für Umweltverfahrenstechnik nicht möglich. Anschließend wurden die Schläuche über eine Stützvorrichtung gezogen und mit Schellenbändern festgespannt. Ein direkter Kontakt zwischen dem Metall und dem Gewebe war dabei zu vermeiden, weil im Hochtemperaturbereich aufgrund der Diffusion von Metallionen in das Filtermaterial eine Versprödung des Gewebes verursacht werden kann /2/. Der zuerst eingesetzte Stützkorb wurde deshalb mit einer Keramik-Ummantelung versehen. Nach mehreren Temperaturwechseln jedoch brachen die Ummantelungen, und das Gewebe wurde an den scharfkantigen Bruchstellen zerstört.

Bei der nächsten Stützkorbausführung nach Bild 7 verursachte die größere Wärmedehnung der metallenen Längsstange gegenüber dem Gewebe eine Lockerung des Filterschlauches. Dies führte zu starken Gewebeknickungen an den Einspannstellen und am Stützring, sowie aufgrund von Faltenbildungen zu einem erheblichen Filterflächenverlust. Da die eingesetzten Gewebe keine starken Knickungen vertragen, ohne daß die Fasern brechen, mußte eine Stützvorrichtung gefunden werden, die den Faltenwurf des Schlauches verhindert und nur eine geringe Wärmedehnung aufweist.

Parallel zu den Dauerversuchen im Kraftwerk wurde deshalb eine kleine Laboranlage gebaut und die Ausführung des Stützkorbes weiterentwickelt. Die neue Stützvorrrichtung ist in Bild 8 dargestellt. Innerhalb des Filterschlauches befindet sich ein poröses Keramikrohr, das eine gleich geringe Wärmedehnung wie das Gewebe aufweist. Der untere metallene Boden wird allein durch den Filterschlauch gehalten.

Mit dieser Stützvorrichtung lassen sich auch nach mehreren Temperaturwechseln sowohl eine Lockerung des Filterschlauches als auch Knickungen oder Faltenwürfe des Gewebes vermeiden.



Bild 7: Ungeeignete Stützkorbausführung



Bild 8: Neue Stützkorbausführung

- 33 -

4.2 Starre Filtermedien

Im Gegensatz zu flexiblen Gewebeschläuchen benötigen starre Filterelemente keine Stützvorrichtung, da sie selbsttragend ausgeführt sind.

Die eingesetzten Filterkerzen SK 3 bestehen aus gesintertem Siliziumkarbid mit zusätzlich eingelagerten Aluminiumoxydfasern. Die Abmessungen sind in Bild 9 dargestellt. Nachteilig für eine Filterkonstruktion ist das hohe Eigengewicht der Kerzen von etwa 18 kg/m² Filterfläche, sowie die Sprödigkeit des Materials, die eine dauerhafte Abdichtung zwischen Roh- und Reingasseite erschwert.

Das Faserelement CF 3, das in Bild 10 zu sehen ist, weist dagegen ein Flächengewicht von nur ca. 4 kg/m² auf und läßt sich zur Abdichtung leicht zusammenpressen. Es besteht aus Tonerde-Silikat-Mischfasern, die mit einem organischen und einem keramischen Binder zusammengehalten werden. Zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit wurde der zunächst rechtwinklige Einspannflansch durch eine konische Halterung gemäß Bild 11 ersetzt.

Das endgültig modifizierte Filterelement stand ab Anfang April 1986 für die Langzeitversuche an der Pilotanlage zur Verfügung und wurde bis zum Vorhabensende in einem 1000-Stunden-Test erfolgreich eingesetzt.

Beide Filterelementarten werden mittlerweile kommerziell angeboten. Bemerkenswert ist dabei der relativ hohe Materialpreis pro m² für Sinterkeramikkerzen, der derzeit um einen Faktor 5 über den Faserelementen liegt.

- 34 -



Bild 9: Abmessungen der Filterkerze SK 3



Bild 10: Filterelement CF3


Bild 11: Filterelement CF4

5. Versuchsergebnisse

Die neuentwickelten Filterelemente nach Tabelle 4 wurden an den verschiedenen Standorten bei Filtertemperaturen von 600 bis 920 $^{\circ}$ C und Anströmgeschwindigkeiten zwischen 1,2 und 8 cm/s mit den Rauchgasen der jeweiligen Feuerung beaufschlagt. Der Rohgasstaubgehalt variierte an der Schmelzkammer- und der Trockenfeuerung zwischen 2 bis 5 g/m³ (i.N.), an der Völklinger Wirbelschichtverbrennung lag der Staubgehalt über 100 g/m³ (i.N.)

Die jeweiligen Betriebsbedingungen sind den Tabellen 5 bis 7 zu entnehmen.

sache		an lle	den
Schadensur	Webfehler	Verschleiß Scheuerste	keine Schä
Standzeit	33/45 h	45/67 h	371 h
Reingasstaubgeh.	3-5 mg/m ³	3-5 mg/m ³	3-5 mg/m ³
Rohgasstaubgeh.	1-2 g/m ³	185g/m ³	185 g/m ³
Druckverlust	2,0 kPa		0,45 kPa .
Anströmgeschw.	3,8-6,4 cm/s		1,2 cm/s
Temperatur	089 0	680 ^o C	680 ^o C
iltermaterial	G 2	<u>ی</u>	65

.

Tabelle 5: Betriebsbedingungen am Standort Völklingen

- 39 -

		1					3			
	Schadensursache	defekte Keramikum-	mantelung	Nahtriß	undicht zwischen Roh-	und Reingasseite	undicht zwischen Roh-	und Reingasseite	keine, Umsetzung der Anlane	
	Standzeit	96 h		8 4	225 h		280 h		500 h	
	Reingasstaubgeh.	3-5 mg/m ³		4-8 mg/m ³	< 1 mg/m ³		.1 mg/m ³		< 1 mg/m 3	
-	Kohgasstaubgeh.	5 g/m ³		5 g/m ³	5 g/m ³		5 g/m ³		5 g/m ³	
ŗ	Uruckverlust	1,7 kPa		1,5 kPa	4 kPa		6,5 kPa		2,4 kPa	
Anot wömssenster.	ANS LT UNGSCOM.	3 cm/s		3 cm/s	8 cm/s		8 cm/s		4 cm/s	
Temooratur	TO DE TO CIUNA	680 ⁰ C		680 ⁰ C	680 ⁰ C		680 ⁰ C		680 ⁰ C	
Filterelement		6 5		NG 2	SK 3		с Х Х Х Х		CF 3	

•

Tabelle 6: Betriebsbedingungen am Standort Bexbach

and the state of the

- 40 -

Filtermaterial	Temperatur	Anströmgeschw.	Druckverlust	Rohgasstaubgeh.	Reingasstaubgeh.	Standzeit	Schadensursache
G 5	90 00	3,2 cm/s	1,8 kPa	2-3 g/m ³	ca. 4 mg/m ³	310 h	defekte Keramikum- mantelung
CF 3	ე ₀ 089	3 cm/s	1,6 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	2650 h	Umbau der Versuchs- anlage
SK 3	920 ⁰ C	6 cm/s	7,8 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	235 h	keine, Kurzrevision
G 5	920 ⁰ C	6 cm/s	3,5 kPa	2-3 g/m ³	3-5 mg/m ³	315 h	Riß des Gewebes an Knickstelle
CF 3	920 ^o C	5 cm/s	4,5 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	380 h	Abriß
CF 3	850 °C	5 cm/s	7 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	210 h	(schonendere Abreini- gung), Abriß
CF 3	850 ⁰ C	3 cm/s	6,5 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	315 h	Abriß
СF 3	830 ⁰ C	3 cm/s	bis 6 kPa (langsam stei- gend)	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	906 h	Abriß
CF 3	300 °C	3 cm/s	3 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	2506 h	keine, andere Halterung eingebaut
CF 3	30 008	3 cm/s	3 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	950 h	keine, neues Filterele- ment eingebaut
CF 4	800 ⁰ C	3 cm/s	3 kPa	2-3 g/m ³	<1 mg/m ³	1085 h	keine, Vorhabensende

Tabelle 7: Betriebsbedingungen am Standort Weiher III

- 41 -

5.1 Abscheideverhalten

Während des Dauerbetriebs der Pilotanlage wurden Rohund Reingasstaubmessungen in periodischen Abständen durchgeführt.

Beim Rohgasstaubgehalt zeigte sich am Standort Weiher eine Abhängigkeit vom durchgesetzten Gasvolumen, wie Bild 12 zeigt. Die jeweiligen Staubbeladungen an den drei Standorten sind den Tabellen 5 – 7 zu entnehmen. Die unterschiedlichen mittleren Korngrößenverteilungen der Stäube zeigt Bild 13.

Trotz der unterschiedlichen Korngrößen und der variierenden Staubbeladung des Rohgases wurden während der gesamten Versuchsdauer keine Schwankungen im Reingasstaubgehalt festgestellt. Damit wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen bestätigt, wonach der erzielte Reingasstaubgehalt nicht von der Rohgaskonzentration und der Korngrößenverteilung des abzuscheidenden Staubes abhängt. Der Reingasstaubgehalt lag bei den Gewebeschläuchen zwischen 2 und 5 mg/m³ i.N., bei den Faserelementen und den Filterkerzen unterhalb der Nachweisgrenze von etwa 1 mg/m³ i.N.

Damit ergaben sich Abscheideleistungen von 99,7 % bei den Geweben und von ca. 99,9 % bei der Filterung mit Faserelementen und Sinterkeramiken.

Geht man davon aus, daß der Staubgehalt vor einer Gasturbine unter 5 mg/m³ i.N. liegen sollte, so reicht damit bei allen drei untersuchten Filterelementen der Reingasstaubgehalt für einen nachgeschalteten Turbinenbetrieb aus.



43 -



5.2 Druckverlust- und Abreinigungsverhalten

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Eignung von Filtermedien zur Staubabscheidung ist ihr Druckverlustverhalten während des Filterbetriebes. Der Gesamtdruckverlust setzt sich zusammen aus dem Druckverlust des sauberen Filtermediums und dem Druckverlust der wachsenden Staubschicht. Durch das Eindringen von Staubpartikeln in das Filtermaterial (Tiefenfiltration) erhöht sich der Anfangsdruckverlust nach der Abreinigung gegenüber dem neuen, unbestaubten Material.

Für die filtertechnische Beurteilung des Betriebsverhaltens von Filtrationsanbscheidern ist daher die Kenntnis sowohl des zeitlichen Druckverlustverlaufes als auch der Höhe des Druckerlustes vor oder nach der Abreinigung wichtig.

Bild 14 zeigt den Druckverlustverlauf während einer Filterzeit von etwa zwei Stunden am ersten Standort Völklingen. Hier wurde die Pilotanlage ausschließlich mit der Gasweiche betrieben, die eine Aufteilung des Rohgases auf die Filter im Verhältnis 1 : 0,6 bewirkte. Der Darstellung liegen folgende Betriebsbedingungen zugrunde:

0

Filtertemperatur	$T_{\rm F} = 680$ °C
Volumenstrom i.N.	$\dot{v}_{N} = 95 \text{ m}^{3}/\text{h}_{1}$
Volumenstrom i.B.	$\dot{V}_{B} = 232,1 \text{ m}^{3}/\text{h}$
Anströmgeschwindigkeiten	$w_{F,I} = 6,4 \text{ cm/s}$
	W _{F,II} = 3,8 cm/s
	$\overline{w}_F = 5, 1 \text{ cm}$
maximaler Druckverlust	⊿p _{max} = 2 kPa
Abreinigungszyklus	t _A = 30 - 40 min



Bild 14. Druckverlustverhalten bei optimalem Filterbetrieb

46

Zur Verdeutlichung des Abreinigungsvorganges ist in Bild 15 der Druckverlustverlauf während der Abreinigung zeitlich gespreizt aufgetragen. Im dargestellten Fall wurde zunächst Filter I angesteuert. Aufgrund des hohen Staubgehaltes des Wirbelschichtabgases von im Mittel 185 g/m³ i.N. stiegen die Druckverluste der beiden Filter relativ steil mit einer Differenz von ca. 500 Pa parallel an. Bei Erreichen des maximalen Druckverlustes im angesteuerten Filter I wurde zum Zeitpunkt t₁ zunächst das nichtangesteuerte Filter - in diesem Fall Filter II mit vier Druckstößen abgereinigt. Die Abreinigungsimpulse bewirkten im Filter I durch die Kopplung über die Gasweiche kleine Druckschwankungen, die jedoch keinen Abreinigungseffekt erzielten. Vielmehr wurde Filter I durch die Abreinigung von Filter II ebenfalls entlastet und sein Druckverlust sank um den gleichen Betrag wie der von Filter II. Nach der Abreinigung des nicht angesteuerten Filters II wurde zum Zeitpunkt t₂ der Hauptrohgasstrom mit Hilfe der Gasweiche von Filter I auf Filter II umgelenkt. Das nunmehr nichtangesteuerte Filter I wurde zum Zeitpunkt t $_3$ ebenfalls mit vier Druckströßen abgereinigt. Zum Zeitpunkt t₄ begann wieder der normale Filterbetrieb; der gesamte Abreinigungsvorgang dauerte somit 80 s. Ein Anstieg des Anfangsdruckverlustes im Laufe der Betriebszeit wurde in Völklingen bei Einsatz des Gewebes G 5 nicht festgestellt.

Ein anderes Druckverlustverhalten ergab sich am Standort Bexbach und in Weiher III bei Einsatz der starren Filterelemente SK 3 und CF 3. In Bexbach wurde bei Filtertemperaturen von maximal 800 ^OC das in Bild 16 dargestellte Druckverlustverhalten

- 47 -



Druckverlust Dp

Bild 15: Druckverlustverlauf während des Abreinigungsvorganges



Druckverlust [kPa]

- 49 -

ermittelt. Sowohl das Faserformteil als auch die Filterkerze benötigten eine Betriebszeit von ca. 100 h zum Ausbilden eines stabilen Druckverlustniveaus. Dargestellt ist der maximale Druckverlust vor der Abreinigung bei zeitabhängiger Abreinigung, der beim Faserformteil bei 2 kPa und bei der Filterkerze bei 6,5 kPa lag.

Bild 17 zeigt für das Faserformteil CF 3 den dazugehörigen Druckverlustverlauf während einer Filterbetriebszeit von 90 min. Der Anstieg des Druckverlustes war hier nicht mehr so steil wie in Völklingen, da der Rohgasstaubgehalt um eine Zehnerpotenz niedriger lag. Bei der dargestellten Fahrweise erfolgte die Abreinigung durch periodisches Absperren und Pulsen eines Filters, während das zweite Filter in dieser Phase den gesamten Filtervolumenstrom übernahm. Dies führte zu einer kurzzeitigen Überlastung dieses Filters, was sich jedoch für den Gesamtdruckverlust nicht negativ auswirkte. Die leichte Differenz zwischen den Druckverlusten der beiden Filter war durch eine gering ungleichmäßige Aufteilung des Gasvolumenstroms infolge unsymmetrischer Rohrleitungsführung zu erklären.

Ein ungünstigeres Filterdruckverlustverhalten ergab sich zunächst am Standort Weiher III bei Filtertemperaturen oberhalb 800 °C. Der Anstieg maximalen Druckverlustes während der ersten 300 Betriebsstunden ist in Bild 18 für verschiedene Versuchsreihen dargestellt. Bei Filtertemperaturen um 900 °C stabilisierte sich der Druckverlust des Filterelementes CF 3 erst oberhalb 6 kPa, während mit der Filterkerze SK 3 zumindest im Untersuchungszeitraum kein stabiler Betriebszustand erreicht wurde. Die Ursache hierfür war beim Faserelement CF 3 ein Verkleben des Staubes auf der Filteroberfläche, wie in Bild 19 zu sehen ist.





Bild 19: Verklebte Staubschicht beim Faserelement Durch das Anbacken des Staubes kam es zu einem schichtweisen Aufbau des Staubkuchens auf der Oberfläche der starren Filterelemente, der durch die Impulsabreinigung nur teilweise wieder entfernt werden konnte. Diese teilweise Entfernung des Staubes reichte bei der Filterkerze SK 3 offensichtlich nicht aus, um ein stabiles Druckverlustniveau einzuhalten. Lediglich mit dem Gewebe G 5 konnten bei 900 ^OC maximale Druckverluste unter 4 kPa eingehalten werden, da durch die Bewegung des flexiblen Filterschlauches der verfestigte Staubkuchen aufgebrochen wurde. Der abgeblasene Staub fiel dann nicht pulverförmig, sondern in kleinen Plättchen im Staubsammelbunker an, wie Bild 20 zeigt.

Das schlechte Abreinigungsverhalten der Filterelemente CF 3 ließ sich durch das Absenken der Filtertemperatur und durch die Kalkverwendung wieder soweit verbessern, daß ein stabiler Filterbetrieb möglich wurde. Durch die Zugabe von Kalk zum Rohgas konnte das Verkleben des Staubes soweit verhindert werden, daß ein stabiler Filterbetrieb bei 820 ^OC gemäß Bild 21 mit einer Anströmgeschwindigkeit von 3 cm/s erreicht werden konnte. Die Abhängigkeit der Druckverluste bei diesen Betriebsbedingungen von der Anströmgeschwindigkeit zeigt Bild 22. Aufgetragen sind der Druckverlust des sauberen Elementes sowie die Druckverluste vor und nach der Abreinigung. Die Streubreite bei den beiden letzteren ergab sich aufgrund von Schwankungen des Rohgasstaubgehaltes.



Bild 20: Gesinterte Staubplättchen

.







5.3 Dauerstandsverhalten

Mit den Gewebeschläuchen konnten lediglich Standzeiten bis 370 Stunden erzielt werden. Dies lag an den verwendeten Stützvorrichtungen, die nicht für den Hochtemperatureinsatz geeignet sind. Bei den untersuchten Geweben sind Kontakte mit metallischen Werkstoffen sowie übermäßige Biegungen und Knickungen zu vermeiden, weil dies zum Bruch der Fasern führt. Mit der neuentwickelten Stützvorrichtung, bei der diese Gegebenheiten eingehalten werden, ist eine wesentliche Verlängerung der Standzeiten der Gewebeschläuche zu erwarten. Aufgrund des vorrangigen Testes des neuen Faserelementes CF 4 konnte ein Dauerversuch mit dieser Ausführung bei hohen Temperaturen nicht mehr durchgeführt werden.

Die getesteten Filterkerzen eignen sich wegen ihrer Festigkeit gut für die Hochtemperatur-Filtrationsabscheidung, wegen ihrer Sprödigkeit wird aber eine dauerhafte Abdichtung zwischen Roh- und Reingasseite erschwert. Dies war letztlich auch der Grund für ihre Außerbetriebnahme. Man kann aber davon ausgehen, daß sich mit einer verbesserten Einspannung die Filterkerzen über einen längeren Zeitraum störungsfrei.einsetzen lassen. Ungeklärt ist geblieben, ob und wann sich bei Filtertemperaturen um 800 ^OC ein stabiler Druckverlust einstellt und wie sich das höhere Druckverlustniveau auf die Dauerstandsfestigkeit auswirkt.

Die Faserelemente CF 3/CF 4 lassen sich gut zur Filtrationsabscheidung bei hohen Temperaturen einsetzen. Zur Abdichtung lassen sie sich an der Einspannstelle etwas zusammenpressen. Dabei wirkt sich jedoch der rechtwinklige Einspannflansch des Faserelementes CF 3 festigkeitsmäßig nachteilig aus. Nach einer Betriebszeit von ca. 2500 Stunden wies dieser Flansch radikale Risse auf, dessen Ursache im anfänglichen leichten Schwinden des zusammengepreßten Filterflansches bei Temperaturen über 600 ^oC liegt. Zur Verbesserung der Festigkeitseigenschaften wurde beim Nachfolge-Faserelement CF 4 der Einspannflansch konisch ausgeführt (Bild 11). Das Problem des anfänglichen Schwindens wurde durch eine entsprechende Wärmebehandlung der Filterelemente vor deren Einbau beseitigt. Der Einbau der neuen Elemente erfolgte gemäß der Anordnung in Bild 23.

Während eines 1000-Stunden-Dauertests konnten keinerlei Beschädigungen an den Elementeinspannungen, die beim Filterelement CF 3 stets der alleinige Grund für ein mechanisches Versagen waren, festgestellt werden. Aufgrund der günstigeren mechanischen Gegebenheiten kann davon ausgegangen werden, daß sich mit der Faserelementausführung CF 4 wesentlich längere Standzeiten erreichen lassen. Dies muß schließendlich der großtechnische Einsatz im Hochtemperaturbereich erweisen, bei dem dann eine Vielzahl von Elementen über längere Betriebszeiten im Einsatz sind.



Bild 23: Einspannung des Faserelementes mit konischem Halteflansch

6. Konzeption einer Großanlage

Auf der Basis der bei den durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen läßt sich die Verfahrenstechnik einer Großfilteranlage für die Heißgasentstaubung konzipieren. Dies wird im folgenden am Beispiel einer druckaufgeladenen Wirbelschichtverbrennung dargestellt.

In Bild 24 ist der prinzipielle Aufbau einer Druckwirbelschicht mit nachgeschalteter Hochtemperatur- und Hochdruck-Entstaubung dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen kombinierten Dampf- und Gasturbinenprozeß. Neben der konventionellen Energieumwandlung mittels Dampf soll der Enthalpieinhalt des verdichteten Abgases in einer Gasturbine genutzt werden.

Für die Auslegung der Entstaubungsanlage werden folgende Betriebsdaten zugrunde gelegt:

Rauchgasmenge:	150.000 m ³ /h i.N.
	≙ 39.065 m ³ /h i.B.
Rauchgastemperatur:	850 [°] C
Betriebsdruck:	16 bar
Gasdichte:	1,3 kg/m ³ i.N.
Rohgasstaubgehalt:	75 g/m ³ i.N.
Staubmassenstrom:	11,25 t/h
zul. Druckverlust:	5,0 kPa

Als Filterelemente werden bei der Auslegung Faserelemente vom Typ CF 4 mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Länge von 1,5 m vorgesehen. Um den maximal zulässigen Druckverlust von 5 kPa sicher einzuhalten, wird von einer Anströmgeschwindigkeit von 3,5 cm/s ausgegangen. Damit ergibt sich eine benötigte Filterfläche von 317 m², was einer Filterelementanzahl von 455 entspricht.



- 62 -

Um die Durchmesser der Filterdruckbehälter zu begrenzen und eine Off-Line-Abreinigung zu ermöglichen, wird die Filteranlage in fünf Einheiten aufgeteilt. Jeder Filterbehälter ist dann mit 91 Filterelementen bestückt und hat einen Durchmesser von etwa 3,5 m. Für die Abreinigung und den Staubaustrag wird jeweils ein Filter außer Betrieb genommen. Während dieser Betriebsphase erhöht sich die Filteranströmgeschwindigkeit in den belasteten Filtern auf vertretbare 4,4 cm/s.

Die für Druckwirbelschichten erwartete relativ hohe Staubbeladung stellt für den reinen Filtervorgang kein Problem dar, wie die Versuche an der Wirbelschicht in Völklingen gezeigt haben. Aufwendig wird jedoch die Gestaltung des Staubaustrages, wenn der gesamte Rohgasstaub in den Filtern abgeschieden wird.

Es ist daher sinnvoll, wenn dem Filtrationsentstauber ein Massenkraftabscheider (Tangential- oder Axialzyklon) vorgeschaltet wird, um Filter und Staubaustrag zu entlasten und um darüber hinaus den Gasmengenverlust beim Staubaustrag zu minimieren. Vorteilhafterweise sollte der Vorabscheider direkt in der Wirbelschichtanlage integriert sein, so daß der abgeschiedene Grobstaub in das Wirbelbett zurückgeführt wird und kein separater Staubaustrag benötigt wird.

Die verfahrenstechnische Konzeption einer derartigen HD-HT-Filtrationsanlage ist in Bild 25 dargestellt. Nach der Staubvorabscheidung in einem Zyklon wird das Rohgas gleichmäßig auf die fünf Filtereinheiten aufgeteilt. Für die Absperrung der Filtereinheiten während der Abreinigung mittels Druckstöße sind Wirbelkammerventile mit Luftrückströmung vorgesehen. Diese Rückströmung ist nach den Erkenntnissen aus den Versuchen



Bild 25. HD – HT- Filtrationsanlage (Teilabsperrung der Filtereinheiten)

in Weiher III notwendig, um eine Entfernung des Feinstaubes aus dem Rohgasraum zu gewährleisten. Bei Verwendung mechanisch wirkender Verschlußorgane müßte man Spülluft anderweitig zuführen oder eine Teilentspannung des abzureinigenden Filters durchführen.

Diese Ausführung der Filteranlage ist nach den vorliegenden Ergebnissen für den drucklosen Betrieb auf jeden Fall geeignet. Für den Betrieb bei hohen Drücken gibt es noch einige offene Fragen, die in der Folgezeit pilottechnisch geklärt werden müssen, nämlich:

- Veränderung der Gegebenheiten für die Abreinigung
- notwendige Spülluftmenge
- Modalitäten des Pulsens (Vordruck, evtl. Verzicht des Pulsens bei Teilentspannung der Filterdruckbehälter).

Zeigen die vorgesehenen Untersuchungen, daß ein Filterbetrieb mit Teilabsperrung unter Druck nicht möglich ist, stellt das in Bild 26 dargestellte Schema auf jeden Fall eine geeignete technische Lösung dar. Wesentliche Unterschiede zum Verfahrensschema nach Bild 25 sind einmal, daß hier 6 Filter (ein Filter befindet sich laufend in Abreinigung) und eine Rohgasabschieberung der Filterelemente notwendig sind. Dieses Verfahrensschema läßt folgende Funktionen erkennen:

Der Staubaustrag aus dem Zyklon erfolgt wie bereits in Bild 25 gezeigt. Das aus dem Sender abgeleitete, entspannte und gekühlte Gas wird in einem Spülfilter nachentstaubt und in die Atmosphäre abgeleitet.



Die 6 Filterelemente sind in 2 Gruppen mit jeweils einem Spülfilter eingeteilt. Soll eine Filtereinheit abgereinigt werden, so geschieht dies in folgender Reihenfolge:

> Verschluß 1 schließen, Verschluß 2 schließen, Verschluß 1 öffnen, Verschluß 3 öffnen.

Es steht jetzt das ganze System bis zum Spülfilter unter Druck. Durch kontrolliertes Öffnen des Entspannungsventiles wird nun aus dem zur Abreinigung anstehenden Filterelement über den Reingaskanal eine bestimmte Abgasmenge, zusammen mit abgeschiedenem Staub, aus der Filtereinheit abgesaugt, wobei die Filterelemente evtl. zusätzlich gepulst werden. Ausreichend für die Staubabführung aus dem Filter dürfte eine Gasmenge sein, die dem Rohgasvolumen der Filtereinheit entspricht. Als Absaugezeit werden zunächst 3 min festgelegt. Das im Spülfilter ankommende verschmutzte und gekühlte Abgas wird weitestgehend entstaubt und über Verschluß 4 abgeleitet, der gleichzeitig Steuerelement ist. Nach Ende der Abreinigung wird hintereinander folgendermaßen verfahren:

```
Verschluß 4 schließen,
Verschluß 3 schließen,
Verschluß 1 schließen,
Verschluß 2 öffnen,
Verschluß 1 öffnen.
```

Durch diese Vorgehensweise ist sichergestellt, daß kein Rohgasverschluß bei bewegtem Gas betätigt werden muß.

In periodischen Zeitabständen wird jetzt Verschluß 4 wieder kontrolliert geöffnet und damit das Spülfilter entspannt. Abhängig von seiner Bunkergröße ist diese Filterentspannung und der Staubaustrag bei drucklosem Filter höchstens stündlich nötig. Die Filterabreinigung im Spülfilter erfolgt bei ruhendem Gas durch Pulsen des Filtermaterials. Nach Austrag des Staubes in einen eigenen oder mit Zyklon und anderem Spülfilter gemeinsamen Bunker wird das Spülfilter wieder mit Reingas bespannt. Es ist dann wieder einsatzfähig. Das Staubgasgemisch ist jeweils so in das Spülfilter einzuleiten, daß Zentrifugalkräfte (z. B. durch tangentialen Eintritt) bereits einen Großteil des Staubes an die Behälterwand transportieren.

Für die Abmessungen des Spülfilters ergeben sich folgende Daten:

. .

Abgasmenge pro Filter (300 ⁰ C)	13,78 m ³ /3 min 0,077 m ³ /s
Gewählte Filteranströmgeschwindigkeit	1,4 cm/s
Notwendige Filterfläche	5,4 m ²
Gewählte Filterfläche (Berücksichtigung der Zyklonabgasmenge)	5,5 m ²
Filterelementabmessungen Länge Durchm.	1,25 m 0,2 m
Filterelementanzahl	7
Behälterdurchmesser	1,36 m
Behälterhöhe	ca. 2,0 m
Staubbunkervolumen	2,2 m ³
Gesamtvolumen	ca. 3,5 m ³

Für den ungünstigsten Fall, nämlich stündlich

- 2 x Filterabreinigung
- 1 x Zyklonsenderentspannung,
- 1 x Spülfilterbespannung

ergibt sich ein Betriebsgasmengenverlust von etwa O,7 % der Gesamtgasmenge. Dieser Verlust dürfte für den Gesamtprozeß von untergeordneter Bedeutung sein.

Eine Vermeidung dieses Verlustes wäre möglich, wenn man das gereinigte Spülgas auf möglichst hohem Temperaturniveau vor der Gasturbine wieder in den Prozeß zurückführt. Hierfür wären zwei weitere Komponenten erforderlich:

- Hochtemperatur-Spülgasfilter,
- Heißgas-Fördereinheit.

Das Hochtemperatur-Spülgasfilter kann prinzipiell so gestaltet werden wie die Hauptfiltereinheiten. Allerdings ergibt sich auch hier wieder das Problem, daß die Effektivität der Abreinigung bisher nicht zuverlässig abgeschätzt werden kann. Für eine Heißgas-Fördereinheit kommen prinzipiell zwei Systeme in Frage:

- Heißgas-Umwälzgebläse,
- Dampfstrahlgebläse.

Heißgas-Umwälzgebläse werden heute für Temperaturen bis 1000 ^OC angeboten, allerdings nur für drucklose Gase und bei Temperaturen ab 800 ^OC nur für Förderhöhen von maximal 2 mbar. Mit einem Dampfstrahlgebläse läßt sich bei Einsatz von Hochdruckdampf aus dem Prozeß die Spülgasförderung sicher realisieren; allerdings sind die Auswirkungen des zusätzlichen Dampfes auf den Gasturbinenbetrieb ungeklärt. Desweiteren steht der Hochdruckdampf erst ca. 1 1/2 Stunden nach der Inbetriebnahme der Großanlage zur Verfügung, so daß während dieser Betriebsphase eine Abreinigung der Heißgasfilter nicht erfolgen könnte.

Im Gegensatz dazu ist davon auszugehen, daß die in Bild 26 dargestellte Staubabscheideanlage in jedem Betriebszustand der Gesamtanlage ordnungsgemäß funktioniert.

7. Zusammenfassung

--_

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die im Labor für die Hochtemperatur-Filtrationsabscheidung entwickelten Materialien unter realen Gasbedingungen im Dauerbetrieb getestet. Zu diesem Zweck wurde eine Pilotanlage konstruiert und hinter verschiedenen Kohlefeuerungen betrieben (Wirbelschicht-, Schmelzkammer- und Trockenfeuerung). Dabei wurden folgende Filterelemente eingesetzt:

- Faserformteile CF 3/CF 4
- Filterkerzen SK 3
- Gewebeschläuche G 5/NG 2

Bei der Verwendung konventioneller Stützkörbe erreichte man mit den Filtergeweben lediglich Standzeiten zwischen 310 und 370 Stunden. Danach wiesen die Schläuche an den Knick- oder Umlenkstellen Risse auf. Der Grund für diese kurze Versuchsdauer liegt darin, daß bei Gewebeschläuchen im Hochtemperaturbereich in jedem Fall eine starke Biegung oder Knickung zu vermeiden ist, weil dies den Bruch der Fasern herbeiführt. Die in der Normaltemperaturtechnik verwendeten Stützkörbe eignen sich nicht für hohe Temperaturen, weil das Gewebe an den Stützstäben um enge Radien gebogen wird. Hinzu kommt die Wärmedehnung des Metalles, die zusätzlich zu einer Lockerung des Filterschlauches führt.

Im Laufe des Versuchszeitraumes konnte eine Stützvorrichtung für Gewebe entwickelt und getestet werden, bei der keine Knickungen des Filterschlauches auftreten und nur geringe Wärmedehnungen erfolgen. Diese Ausführung soll im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens bei Filtertemperaturen bis 400 ^OC getestet werden.

Mit den Faserformteilen vom Typ CF konnten Abscheideelemente entwickelt werden, die ein sehr gutes Abscheideverhalten bei vertretbarem Druckverlust aufweisen. Im Hochtemperaturbereich konnte ein stabiler Filterbetrieb über Zeiträume zwischen 2500 und 3000 Stunden durchgeführt werden. Schwierigkeiten ergaben sich im Laufe des Versuchszeitraumes lediglich mit der Einspannung der Filterelemente. Es zeigte sich, daß ein rechtwinkliger Einspannflansch für einen erfolgreichen Langzeitbetrieb nicht stabil genug ist. Es wurde das Faserelement CF 4 mit einem konischen Einspannflansch entwickelt. Mit diesem Filterelement wurde ein 1000 h Test durchgeführt, ohne daß Veränderungen am Einspannflansch festgestellt wurden.

Es ist daher davon auszugehen, daß mit dieser modifizierten Form wesentlich höhere Standzeiten zu erreichen sind.

Gesinterte Filterkerzen sind bei hervorragenden Abscheideeigenschaften zwar stabil genug für den industriellen Einsatz, sie weisen aber eine Reihe von Nachteilen auf:

Ihr hohes Eigengewicht erschwert eine Filterkonstruktion im Hochtemperaturbereich, sie besitzen einen verhältnismäßig hohen Druckverlust, und die roh- und reingasseitige Abdichtung wird durch die Sprödigkeit des Materials erschwert. Bei Lösung dieser Probleme sollte jedoch auch mit dieser Filterelementart eine erfolgreiche Hochtemperaturfiltration möglich sein.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden am Beispiel einer druckaufgeladenen Wirbelschichtverbrennung zwei alternative Verfahrensschemata für eine entsprechende Großanlage entwickelt. Für den großtechnischen Einsatz ist - zusammenfassend gesehen - nicht zu erwarten, daß die gegenüber den vorgestellten Verfahren kostengünstigere Methode mit On-Line-Abreinigung bei hohen Temperaturen anwendbar ist. Auch beim Filtersystem mit Off-Line-Abreinigung und Teilabsperrung der Gase müssen für den Hochdruckbereich noch eine Reihe von wichtigen Fragen pilottechnisch geklärt werden, bevor Verbindliches über eine einwandfreie Funktionsweise des Verfahrens wie auch über einzelne Stoffströme gesagt werden kann. Sicher am aufwendigsten, aber auch heute bereits erfolgreich realisierbar, ist die Verfahrensweise mit Vollabsperrung der Filter für die Abreinigung. Zur Optimierung und Kostenminderung steht aber auch dabei noch die Lösung einzelner Fragen an.

Es ist davon auszugehen, daß nach Abschluß der jetzt angelaufenen Pilotuntersuchungen im nächsten Jahr alle offenen Fragen geklärt sind und dann ein in jeder Beziehung optimaler Hochdruck- und Hochtemperatur-Staubabscheider zur Verfügung stehen wird.
- 8. Literatur
 - /1/ Krieb, K. H.

Mögliche Wirkungsgradverbesserungen durch den Einsatz neuer Kohleumwandlungstechnologien Technische Mitteilungen 69 (1976) Nr. 9/10, S. 468 - 475

/2/ Weber, E.; Schulz, R.

Untersuchungen über die Eignung von Filtrationsabscheidern zur energiesparenden Gasreinigung bei hohen Gastemperaturen und hohen Gasdrücken BMFT-Forschungsbericht T 83-292, Dez. 1983

/3/ Schmid, W.

Wirtschaftliche Kriterien für die Feststoffabscheidung bei Kohleumwandlungsverfahren Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 31

/4/ Reijnen, K.; van Brakel, J.

Gas Cleaning at High Temperatures and High Pressure: A Review Powder Technology 40 (1984) S. 81-111

- /5/ Shackleton, M.; Chang, R.; Sawyer, J. u.a. High-Temperature High-Pressure Gas Cleanup with Ceramic Bag Filters. DOE-Report No. ET/17092-1504, Jan. 1984
- /6/ Ganz, R. und Escher, A.

Herstellung und Veredelung feuerfester Faserwerkstoffe für den Einsatz in Reaktionsräumen mit thermischer, mechanischer und chemischer Beanspruchung. BMFT-Forschungsbericht T 83-019, Febr. 1983 /7/ Reed, G.P.

How Hot Gas Cleaning Improves the Economics of Electricity-from-Coal. Filtration & Separation (1984) Nr. 2, S. 120-124

/8/ Chang, R.

Ceramic Fabric Material Testing Interim Report Acurex Corporation, Energy & Environmental Division US Department of Energy

/9/ White, L.R.; Forester, R.J.

Ceramic fabrics for filtration at high temperatures, 290 - 870 ^OC. The Institution of Chemical Engineers Symposium Series No. 99, Gas Cleaning at High Temperatures, University of Surrey, Sept. 1986

/10/ Weber, E.; Holzapfel, C.

Entwicklung fluidischer Absperr- und Steuerelemente für staubhaltige Gasebei hohen Temperaturen und Drücken. BMFT-Forschungsbericht T 86-054, Juli 1986