Die atmosphärische Wirbelschichtfeuerung

Autor(en): **Schenk, Hans-Rudolf**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 39

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75198

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die atmosphärische Wirbelschichtfeuerung

Von Hans-Rudolf Schenk, Winterthur

In jüngster Zeit wurden wir von den Medien mit einer wahren Flut von Beiträgen über den sauren Regen und seine für die Umwelt äusserst schädlichen Folgen geradezu überschwemmt. Es ist unbestritten, dass die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie die Abgase der modernen Fortbewegungsmittel die Hauptverursacher dieser Luftverschmutzung sind. Schwefeldioxid und Stickoxide werden also zur Hauptsache von Feuerungsanlagen erzeugt, während Verbrennungsmotoren Stickoxide an die Atmosphäre abgeben. Die aus Hochkaminen austretenden Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen können durch die Luftbewegungen Hunderte, manchmal sogar Tausende von Kilometern weggetragen werden, wobei die Schadstoffmoleküle neue chemische Verbindungen eingehen können.

Weltweit arbeitet die Industrie an Techniken zur Verminderung dieser Emissionen, ich denke da an Abgasentschwefelungsanlagen zur Reduktion der SO_2Emissionen, an mehrstufige Verbrennung zur Reduktion der NO_x-Bildung usw., aber diese Techniken können vorerst nur bei thermischen Grossanlagen wirtschaftlich eingesetzt werden.

Nachdem die Energieerzeugung unserer Industrie teilweise den Schritt vom Öl oder Gas zurück zur Kohle gewagt hat, müssen die Lieferanten vorbereitet sein, bei Erstellung neuer Feuerungsanlagen dem Wunsch der Betreiber oder den Forderungen des Gesetzgebers für saubere Abgase entsprechen zu können. Und gerade dieses Ziel kann mit der Anwendung der aus der Verfahrenstechnik bekannten Wirbelschichttechnik zur Verbrennung von Kohle erreicht werden.

Das Prinzip

In der Wirbelschichtfeuerung wird *Kohle, vermischt mit feinkörnigen Sand-, Kalk- und Aschepartikeln im schwebenden Zustand verbrannt.* Das Arbeitsgebiet der Wirbelschichtfeuerung liegt also zwischen der *Rostfeuerung,* bei der eine ruhende Schüttung von Kohle verbrannt wird, und der *Staubfeuerung,* bei der mehlfein gemahlene Kohle mittels Tragluft mit hoher Geschwindigkeit in die Brennkammer geblasen wird (Bild 1).

Der Dampf- oder Heisswassererzeuger

Die Wirbelschichtkessel umfassen eine bis mehrere Wirbelzellen, die luftseitig in mehrere Zonen unterteilt werden können. Die Umfassungswände und der Luftdüsenboden der Zellen sind wassergekühlt und in den Natur- oder Zwangsumlauf des Dampf- oder Heisswassererzeugers einbezogen (Bild 2).

Die Verbrennungsluft wird durch den Düsenboden in die Zelle eingeführt und versetzt hier das Material in eine wirbelnde Bewegung. In das Wirbelbett tauchen, je nach Kesselart, Verdampfer-, Überhitzer- oder Heisswasser führende Rohre ein, die bis zu 50 Prozent der eingebrachten Wärme aufnehmen und dadurch die Bett-Temperatur tief halten. Dank der Wirbelbewegung ist der Wärmeübergang auf diese Rohre sehr gut. Über dem Wirbelbett befindet sich ein Freiraum, welcher der Nachverbrennung dient. Vom Freiraum gelangen die Rauchgase in einen Konvektionsteil wie bei einem konventionellen Kessel (Bild 3).

Die Entschwefelung der Rauchgase

Die Entschwefelung der Rauchgase geschieht durch *Zugabe von feingebrochenem Kalkstein* direkt in der Wirbelschichtfeuerung. Eine Kalkdosierung von 5 Prozent der Brennstoffmenge garantiert bei Bett-Temperaturen von 800–850 °C und bei einem Schwefelge-

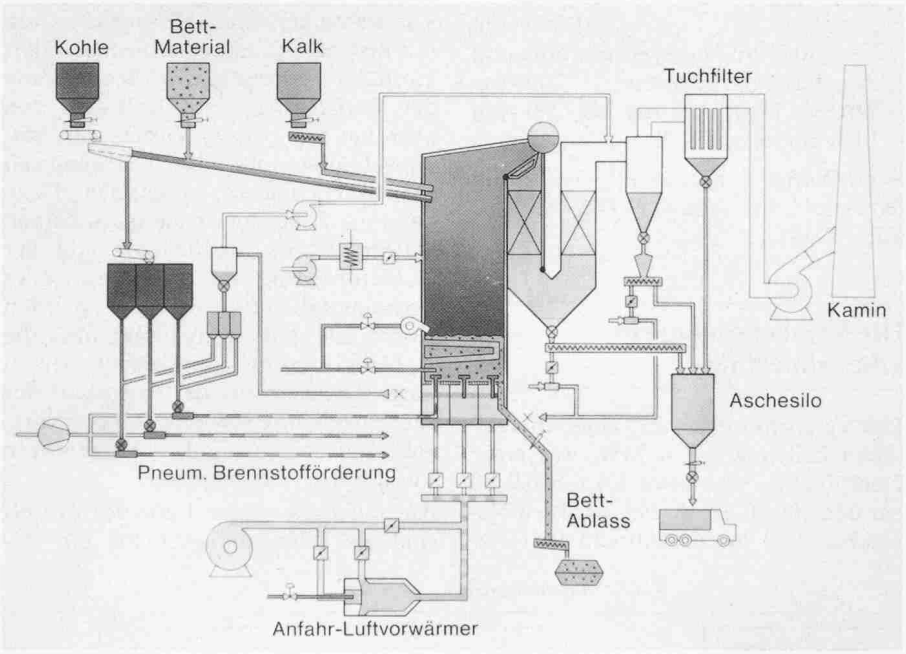


Bild 2. Flussschema einer Wirbelschichtfeuerung

Bild 1. Charakteristika und Einordnung der Wirbelschichtfeuerung

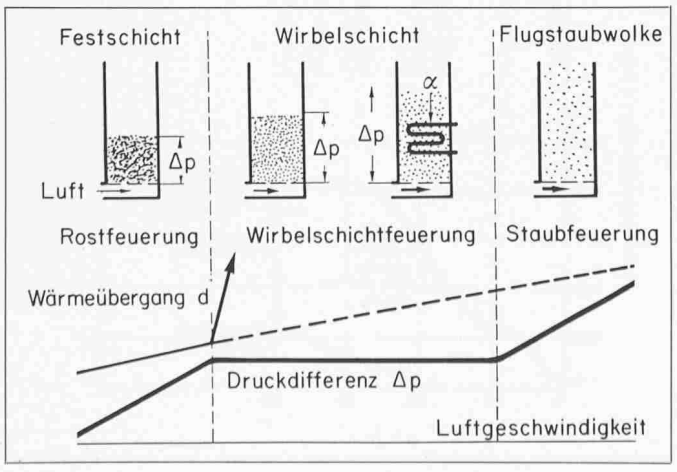


Bild 3. Typische Merkmale der Wirbelschichtfeuerung

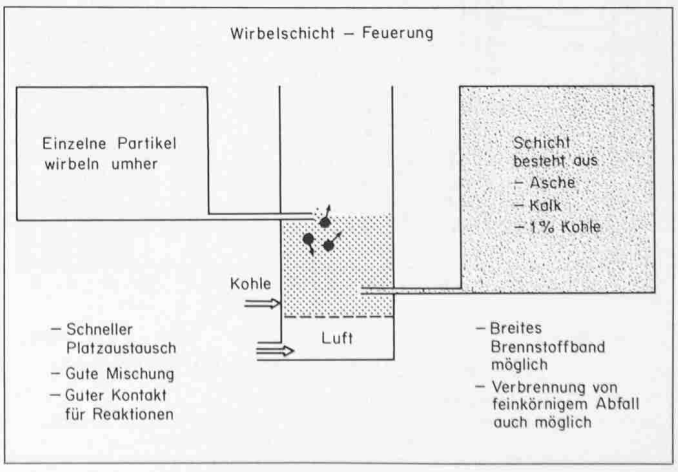


Tabelle 1. Technische Daten der Versuchsanlage

Dampfdruck	29 bar
Dampfmenge	5,4 t/h
Thermische Leistung	4 MW
Brennstoff	Steinkohle
Brennstoffmenge	700 kg/h
Kohlekörnung	0–20 mm, 30% <1 mm
Unterer Heizwert	29 300 kJ/kg
Bettfläche	1,5×2 = 3 m²
Wirbelgeschwindigkeit	1,8–2 m/s
Bett-Temperatur	850 °C
Fluidisierte Schichthöhe	1 m
Freiraum oberhalb Bett	3,5 m
SO_2-Absorption durch	Kalk
Kalkkörnung	1–3 mm

halt der Kohle von 1 Prozent eine Entschwefelung der Rauchgase von über 80 Prozent. Das Ca/S-Mol-Verhältnis bewegt sich dabei um die Werte 2–3.

Wird Kohle mit höherem Schwefelgehalt verfeuert, muss entsprechend mehr Kalkstein zugeführt werden, um den gleich hohen Entschwefelungsgrad zu erreichen.

Die *Entschwefelung* verläuft nach der Formel:

$$CaO + SO_2 + \tfrac{1}{2} O_2 = CaSO_4$$

Der bei dieser Reaktion entstehende *Gips* kann zusammen mit der Asche abgelagert werden.

Stickoxid-Emissionen

Die Wirbelschichtfeuerung reduziert die NO_x-Emissionen auf einen Drittel der bei konventionellen Feuerungen auftretenden Werte. Die von Wirbelschichtfeuerungen emittierten Stickoxide stammen zum grössten Teil direkt aus dem Brennstoff selbst, da in Wirbelschichtfeuerungen, die zur Bildung thermischer Stickoxide notwendigen Temperaturen von etwa 1400 °C nicht auftreten können.

Versuche mit *Petrolkoks-Partikeln* zeigten, dass ein Partikel von ursprünglich 9 mm Durchmesser nach etwa 15 Minuten Verweilzeit in der Wirbelschicht ein Temperaturmaximum erreicht, das etwa 200 K über der mittleren Wirbelschichttemperatur liegt. Wesentlichen Einfluss auf die NO_x-Bildung in der Wirbelschicht haben:

- Bett-Temperatur,
- Luftüberschusszahl,
- Verhältnis Primär-/Sekundärluft,
- Kohlezusammensetzung,
- Kalkzugabe.

Dabei ist zu beachten, dass tiefe Luftüberschusszahlen, also eine stöchiometrische oder, im Fall der Sekundärluft-eindüsung, unterstöchiometrische Verbrennung in der Wirbelschicht, die NO_x-Emissionen zusätzlich reduzieren, der Kalk jedoch infolge des geringeren Sauerstoffangebotes in der Schicht weniger SO_2 einbinden kann.

Beispiele von NO_x-Emissionen

- Konventionelle Kohlefeuerung etwa 800 vpm
- Feuerung mit stöchiometrischer Luftzufuhr und Nachverbrennung durch Einblasung von Sekundärluft im oberen Teil der Brennkammer 250–350 vpm
- Feuerung mit Nachverbrennung und Rauchgasrezirkulation 200 vpm
- Wirbelschichtfeuerung 150–200 vpm
- EPA-Standards 1979 360 vpm

Alle Werte bezogen auf 5 Prozent Sauerstoff im Abgas (VGB, Heft 2, Febr. 1980).

Die Versuchsanlage in Oberwinterthur

Die Versuchsanlage mit einer thermischen Leistung von 4 MW, was einer Dampfmenge von etwa 5,4 t/h bei 30 bar und 300 °C entspricht, wird seit November 1979 jeweils während der Heizperiode zu Versuchszwecken betrieben (Tabelle 1). In Erkennung der Bedeutung des Projektes beteiligt sich der *Nationale Energie-Forschungs-Fonds* (NEFF) an dessen Finanzierung. Die Wirbelschicht-Versuchszelle wurde anstelle einer Unterschubfeuerung in einen alten gemauerten Naturumlaufdampferzeuger eingebaut. Umfassungswände und Zellenboden mit Luftdüsen sind wassergekühlt und in den Naturumlauf des Dampferzeugers einbezogen.

Die mit der Anlage erzeugte Energie wird dem Dampfnetz der Sulzer-Energiezentrale Oberwinterthur zugeführt.

Kohle der Körnung 0–10 mm wird pneumatisch von unten in die Wirbelschicht eingebracht, während das Überkorn grösser als 10 mm von oben aufgegeben wird.

Der als Bettmaterial und zur Entschwefelung der Rauchgase benötigte Kalkstein wird mit Schwerkraftförderung von oben aufgegeben. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Wirbelschicht über einen weiteren kleinen Vorratsbunker zu Versuchszwecken mit Bettmaterialien verschiedener Herkunft zu versorgen. Die Beschickung der Wirbelschicht mit Kalkstein von oben hat den grossen Vorteil, den Entschwefelungsgrad im Störungsfall schnell korrigieren zu können. Dazu kann die Zelle, sofern sie im Stillstand entleert wurde, unabhängig von der Kohleförderung mit Kalkstein oder Bettmaterial gefüllt werden. Würden Kohle und Kalk gemeinsam über die Kohlendosierung eingebracht, träten lange Totzeiten bei der Korrektur der Entschwefelung sowie bei einer aus regeltechnischen Gründen notwendigen Variation der Betthöhe auf.

Am rauchgasseitigen Ende des Kessels sind als Entstaubungsorgane ein *Zy-*

Bild 4. Fortschritte im Verbrennungswirkungsgrad

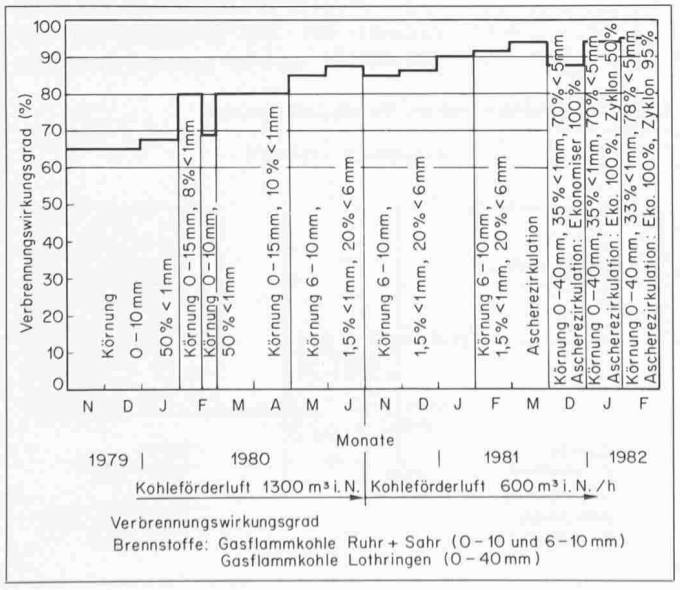
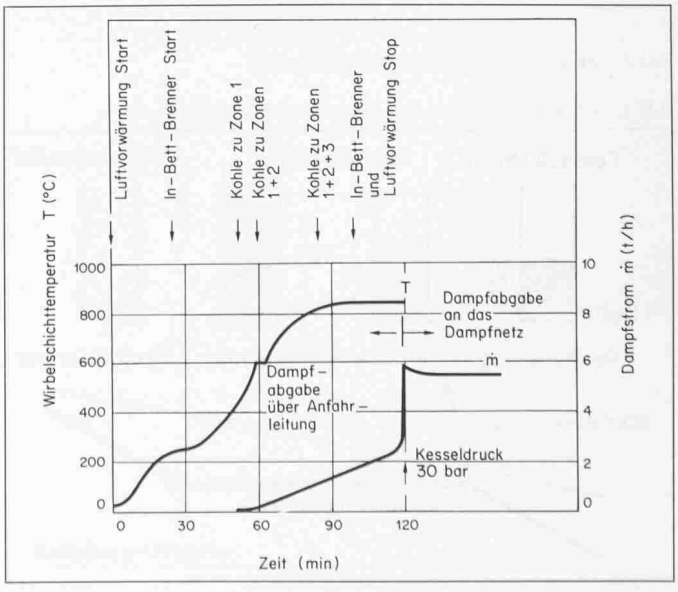


Bild 5. Anfahrdiagramm



klonabscheider und ein *Tuchfilter* eingebaut. Mit dem Tuchfilter kann ein sehr geringer Reststaubgehalt der Abgase erzielt werden. Ein *Elektrofilter* eignet sich zur Abgasreinigung einer Wirbelschichtfeuerung weniger gut, da zur Reinigung der schwefelarmen Abgase bei Temperaturen bis zu 200 °C eine sehr kleine Wandergeschwindigkeit durch den Filter gewählt werden muss, was zu grossen Filterabmessungen führt. Der Grund liegt im hohen elektrischen Widerstand der schwefelarmen Staubpartikel, deren elektrische Ladung sich demzufolge zu langsam abbaut. Jedoch sind beim Tuchfilter Standzeiten der Filtermaterialien, die Möglichkeit von Filterbränden sowie die durch den höheren Druckabfall über den Filter notwendig werdende grössere Gebläseleistung in die Wirtschaftlichkeitsrechnung einzubeziehen.

Die Versuchsanlage hat ihre hohe Verfügbarkeit und Betriebssicherheit bewiesen, obgleich sie nur mit minimalem Aufwand erstellt wurde. Mit einer Feinkohle der Körnung 0–20 mm und einem Feinanteil von 33 Prozent < 1 mm wurde das gesteckte Ziel in bezug auf den Verbrennungswirkungsgrad übertroffen. Bild 4 zeigt die seit 1979 erzielten Fortschritte.

Um beim Einsatz von Feinkohlen in atmosphärischen Wirbelschichtfeuerungen hohe Verbrennungswirkungsgrade zu erreichen, muss der grobe Teil des mit den Rauchgasen aus der Wirbelschicht ausgetragenen Flugstaubes wieder in die Wirbelschicht zurückgeführt werden. Dazu wird der in einem *Grobstaubabscheider* abgeschiedene Flugstaub mit Hilfe einer pneumatischen Förderung zurückgeführt.

Das Anfahren

Bevor Kohle in einer Wirbelschichtfeuerung verbrannt werden kann, muss das *Bettmaterial mit Hilfsbrennern bis zur Zündtemperatur der Kohle vorgewärmt* werden. Dazu werden zur Hauptsache folgende zwei Methoden angewendet.

A) Ein oder mehrere Öl- oder Gasbrenner grosser Leistung werden gezündet und brennen von oben auf die Oberfläche des Wirbelbettes. Damit die Wärme jedoch in die Schicht einfliesst, muss diese in regelmässigen Zeitabständen *fluidisiert* werden. Der *Nachteil* dieser Methode liegt im *hohen Hilfsenergiebedarf*, da die eingebrachte Wärme gegen die Fluidisierungsrichtung ins Wirbelbett einfliessen muss. Als Regel gilt: nur 40 Prozent der von Über-Bett-Brennern eingebrachten Wärme fliessen in die Wirbelschicht.

B) Die Fluidisierungsluft wird mit Öl- oder Gasbrennern vorgewärmt und mit 500 °C über den Düsenboden der Wirbelschicht zugeführt. Erreicht das Bettmaterial eine bestimmte Minimaltemperatur, werden Gas- oder Leichtöllanzen, die direkt in die Schicht hineinragen, mit Hilfe eines oberhalb der Schichtoberfläche eingebauten Zünd- und Sicherheitsbrenners gezündet. Diese Anfahrmethode gewährleistet *kurze Anfahrzeiten mit geringem Hilfsenergiebedarf*.

Regel: Anfahrenergie = etwa 50 Prozent der stündlichen Kesselleistung bei Wirbelschichtfeuerungen bis zu 10 MW thermischer Leistung. Bei grösseren Einheiten verringert sich dieser Wert auf etwa 25–30%, da die Wirbelschichtfeuerung in diesem Falle aus mehreren Einzelzellen besteht.

Bild 5 zeigt das Anfahrdiagramm der Versuchsanlage Oberwinterthur nach der Anfahrmethode B. Das Diagramm zeigt eindrücklich, wie schnell ein Wirbelschichtdampferzeuger vom kalten, drucklosen Zustand auf Vollast gefahren werden kann.

Betrieb

Die Wirbelschichtbefeuerung ermöglicht *schnelle und grosse Lastwechsel bei gleichbleibendem Luftüberschuss* in der Feuerung. Im Extremfall kann eine Wirbelschichtfeuerung sogar im Ein/Aus-Betrieb gefahren werden, ohne dass für den nachfolgenden Heiss-Start Hilfsbrennstoffe benötigt werden.

Die Versuchsanlage in Oberwinterthur erlaubt im Dauerbetrieb schnelle Laständerungen im Regelbereich 1:2 von 10 Prozent der Vollast je Minute und mit Hilfe von Zonenabschaltungen Laständerungen von 1:3 bis 1:4 von 20 Prozent der Vollast je Minute.

Eine solche Versuchsreihe ist in Bild 6, dem Registrierstreifen der Dampfmengenmessung, dargestellt. Die Bettemperatur variierte dabei bei den Lastsprüngen ohne Zonenabschaltung um ± 15 °C, beim Lastsprung mit Zonenabschaltung um ± 30 °C.

Der Stillstand bis zu einem nachfolgenden Heiss-Start ohne Hilfsbrennstoffe kann bei kleinen Zellenabmessungen bis zu acht Stunden dauern. Bei grösseren Wirbelschichtzellen wird, infolge der geringeren Kühlwirkung der Zellenwände auf das Bettmaterial, diese Stillstandszeit verlängert.

Anhand der Kurve auf Bild 7 kann der Verlauf der Bettemperatur bei einem Heiss-Start nach vier Stunden Stillstand sowie beim Auskühlen der Wirbelschicht mit Fluidisierungsluft verfolgt werden.

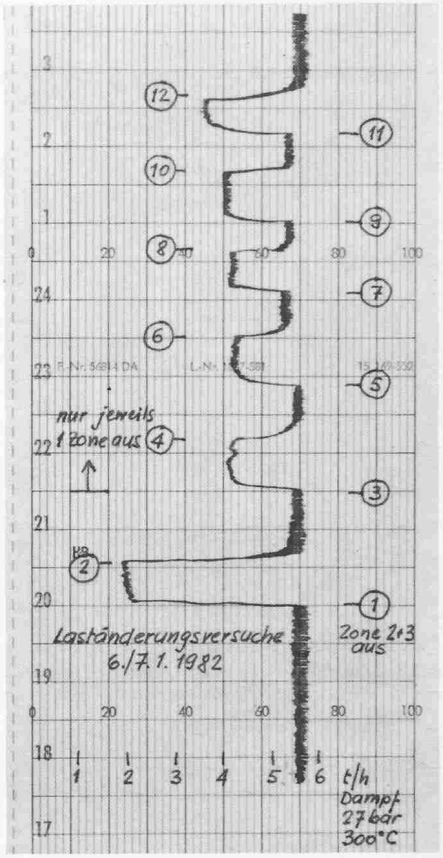


Bild 6. Registrierstreifen Laständerungsversuche
Pkt. 1– 2: Ab- und Zuschalten 2 von 3 Zonen
Pkt. 3– 4: Ab- und Zuschalten 1 von 3 Zonen
Pkt. 5–12: alle 3 Zonen im Betrieb. Lastvariationen mit Luft/Brennstoff-Menge.

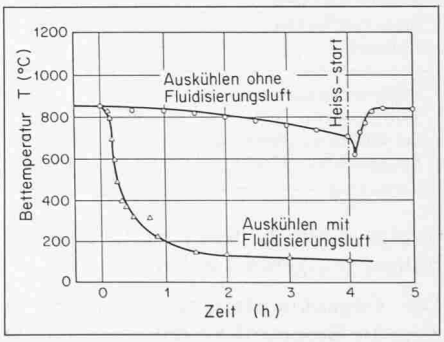


Bild 7. Heiss-Start ohne Hilfsbrennstoffe. Verhalten der Wirbelschichttemperatur beim Abschalten für nachfolgenden Heiss-Start. Versuch vom 12.12.1980

Einsparung von Brennstoffkosten

Die Wirbelschichtfeuerung stellt nur *geringe Ansprüche an das Körnungsband und den Aschegehalt der Kohle.* Hingegen erhöht der moderne Bergbau mit seinen maschinellen Abbaumethoden den Feinkornanteil in der geförderten Kohle. Dadurch wird der Anfall an Grobkohle geringer und demzufolge die für Rostfeuerungen notwendige Nuss-Kohle teurer. Hingegen muss die sogenannte Fein- oder Kraftwerkskohle mit dem Körnungsband 0–20 (50) mm

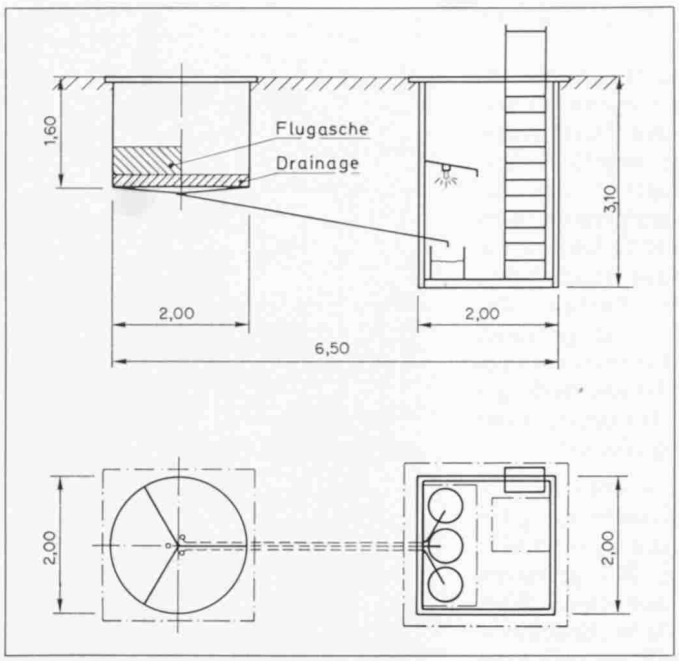


Bild 8. *Granulierter Flugstaub aus dem Tuchfilter, in einem Deponiebehälter den natürlichen Wetterbedingungen ausgesetzt. Versuchsanordnung.*

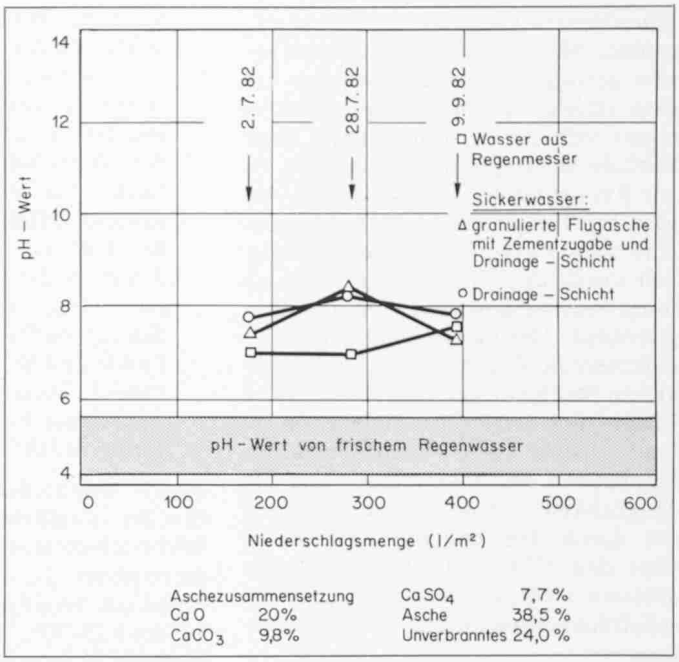


Bild 9. *Ergebnisse des Asche-Deponieversuches*

Tabelle 2. Brennstoffkosten. Energiepreise franko Winterthur, Stand 11. Nov. 1982

		Heizöl EL	*Heizöl* S	*Rost* Nuss 5	*Wirbelschicht* (Kraftwerkskohle aus den USA)
Nettowärme	MW	20	20	20	20
Wirkungsgrad	%	90	90	88	85
Bruttowärme	MW	22,2	22,2	22,7	23,5
Heizwert	KJ/kg	42 000	40 000	28 000	28 000
Brennstoffverbrauch	kg/h	1 908	2 004	2 644	2 980
Brennstoffkosten	Fr./t	730	440	288	202
Brennstoffkosten	Fr./h	1 393	882	761	602
Kalkstein	Fr./h	-	-	-	8 (150 kg/h)
Differenzen zugunsten Wirbelschicht:	Fr./h	783	272	151	
Bei 4000 h/a u. 80% Last	Fr.	$2{,}5\times10^6$	$0{,}87\times10^6$	$0{,}48\times10^6$	
Bei 8000 h/a u. 80% Last	Fr.	$5{,}0\times10^6$	$1{,}74\times10^6$	$0{,}96\times10^6$	

infolge ihrem höheren Feinkornanteil billiger abgegeben werden.

Die Gegenüberstellung in Tabelle 2 zeigt die Brennstoffkosten für eine Kesselanlage von 20 MW thermischer Leistung. Die Brennstoffpreise basieren auf dem Stand vom 11. Nov. 1982, geliefert franko Winterthur.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Wirbelschichtfeuerung von der Brennstoffseite her betrachtet sehr grosse jährliche *Kosteneinsparungen* bringen kann. Mit diesen Einsparungen können die *systembedingten Mehrkosten* für:

- aufwendigere Bekohlung als ein Rostkessel,
- zusätzliche Bunker für Kalkstein und Bettmaterial und
- höhere Gebläsepressung an Frischluft- und Saug-Zug-Gebläse

in kurzer Zeit amortisiert werden.

Nicht in Geld ausgedrückt ist die *Reduktion der Schadstoffe im Abgas*. Die Tuchfilteranlage reduziert den Staubauswurf auf Werte < 30 mg/m³ i.N., die stark reduzierten SO_2-Emissionen sind systembedingt und wären ohne die Wirbelschichtfeuerung nur mit Rauchgaswaschanlagen erreichbar. *Rauchgaswaschanlagen* sind aber kompliziert und für Industriekessel noch nicht Stand der Technik.

Entsorgung

Der bei Wirbelschichtfeuerungen im Tuchfilter anfallende trockene Flugstaub kann unter Zugabe von 4–5 Gewichts-Prozent Zement und Wasser auf industriellen Granulieranlagen zu Kugeln von 8–10 mm Durchmesser verfestigt werden. Natürlich kann dabei auch überflüssiges Bettmaterial diesem Granulierprozess beigemischt werden.

In Oberwinterthur wurden 1030 kg granulierter Flugstaub aus dem Tuchfilter in einem speziell gefertigten Deponiebehälter den natürlichen Wetterbedingungen ausgesetzt (Bild 8). Das aus der Deponiezelle austretende Sickerwasser wird aufgefangen und analysiert. Parallel dazu werden die Niederschlagsmengen gemessen und analysiert. Die ersten Resultate der Versuchsreihe sind in Bild 9 dargestellt.

Auf Grund dieser Messungen können wir heute sagen, dass Sickerwasser aus Deponien granulierter Flugasche von Wirbelschichtfeuerungen die Schweizerischen Vorschriften über Abwasserleitungen in Gewässer in bezug auf den pH-Wert erfüllt.

Vorschrift vom 8. Dez. 1975: pH 6,5–8,5
Deponieversuch: pH 7,3–8,3

Ausblick

Gerade wegen den Schwefel-NO_x und staubarmen Abgasen eignet sich die Wirbelschichtfeuerung für Fernheizungen und Industriekraftwerke in der Nähe oder inmitten von Ballungszentren. Dazu ermöglicht die Wirbelschichtfeuerung die Verwendung von Kohle unterschiedlicher Qualitäten, auch solchen mit hohem Asche- und Schwefelgehalt. Dadurch erreicht der Betreiber die notwendige *Flexibilität*, um sich den wechselnden Verhältnissen auf dem Kohlemarkt anzupassen.

Der heutige Stand der Technik ermöglicht es den Herstellern, statische atmosphärische Wirbelschichtfeuerungen für Dampf- oder Heisswassererzeuger im Leistungsbereich bis 60 MW thermischer Netto-Wärmeleistung, also bis 80 t/h Dampfleistung zu liefern.

Adresse des Verfassers: *H.-R. Schenk*, Masch.-Ing. HTL, Gebrüder Sulzer Aktiengesellschaft, 8401 Winterthur.