

W. ALTMANN

## VORHERSAGE DER RAUCHGASSEITIGEN ANSATZBILDUNG IN FEUERRÄUMEN VON BRAUNKOHLLEN-DAMPFERZEUGERN

### 1. Einleitung

Der Bedarfsanstieg von Wirtschaft und privatem Sektor an Elektroenergie zwingt den Anlagenbau zur Errichtung von Kraftwerksblöcken mit der äußersten technisch beherrschbaren Einheitsleistung (Grenzleistung) und zur Bevorzugung der Monotechnik für alle Funktionselemente

In dieser Entwicklungssituation nimmt die Tragweite aller konstruktiven Entscheidungen immer mehr zu. Gleichzeitig schrumpft die an ausgeführten Objekten gewinnbare Erfahrungsbasis, indem sich die Zeitspanne vom Einsatz einer Leistungsstufe bis zur nächsthöheren ständig verkürzt.

Es gewinnt damit zunehmend an Bedeutung, die technisch und ökonomisch signifikanten Eigenschaften neukonzipierter Anlagensysteme und ihrer Elemente mit geeigneten Verfahren bereits bei der Konstruktion hinreichend zuverlässig vorhersagen zu können. Dabei sind auch solche Erscheinungen zu erfassen, die sich aus dem Größenwachstum, der Anwendung veränderter Wirkprinzipien oder andersgearteter Einsatzbedingungen völlig neu ergeben.

Wie aus den Betriebsergebnissen mehrerer Kraftwerksgenerationen hervorgeht, lassen sich die funktionsbestimmenden Hauptwirkungen (z. B. thermodynamischer Kreisprozeß, Wärmeübertragung in Dampferzeugern, Energieumwandlung in Turbomaschinen) mit vorhandenen und laufend verbesserten Algorithmen im allgemeinen mit guter Genauigkeit vorausbestimmen und bei der Konstruktion berücksichtigen. Demgegenüber gelingt es in vielen Fällen nur unbefriedigend, funktions- und verfügbarkeitseinschränkende Nebenwirkungen (z. B. statische und dynamische Beanspruchungen, thermische Überlastung, Korrosion, Erosion, Ansatzbildung, Substanzausscheidung usw.) zuverlässig vorherzusehen und dadurch bedingte Betriebsausfälle oder Beeinträchtigungen des Umwandlungswirkungsgrades zu vermeiden. Eine Ausnahme bilden hierbei die Erscheinungen, die durch das hochentwickelte Arbeitsgebiet Technische Mechanik und Festigkeitslehre behandelt werden.

Bei eingehenden Analysen des Fehlverhaltens von Anlagen [1,2] konnte der Nachweis erbracht werden, daß für einen hohen Anteil der auslösenden Ursachen Kenntnisse über relevante Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten bereits zum Zeitpunkt der Projektierung und Auslegung existiert haben, jedoch wegen ungenügend entwickelter Informationsbeziehungen nicht oder mangelhaft zur Anwendung gekommen sind.



Es muß beobachtet werden, daß die theoretische und experimentelle Forschung eine kaum noch zu überschauende Fülle spezieller Ergebnisse liefert, deren Verallgemeinerung und Aufbereitung in eine für den (nicht-spezialisierten) Konstrukteur anwendungsbereite Form weit hinter den angestiegenen Bedürfnissen zurückgeblieben ist. Gleichmaßen wird der in der Kraftwerkspraxis angehäuften große Erfahrungsschatz in der Hauptsache individuell verarbeitet und kommt dem kollektiven Erkenntnisgewinn nur in Bruchteilen zugute.

Die Kernfrage einer informationsökonomischen Erfassung und Erschließung des durch Wissenschaft und Praxis ständig neu produzierten Wissens besteht darin, die bei der Untersuchung spezieller Objekte oder Ereignisse gewonnenen Erkenntnisse mit solcher Abstraktion darzustellen und anwendungsfreundlich zu speichern, daß sie innerhalb der Grenzen eines Wahrscheinlichkeitsintervalls für die ganze Klasse ähnlicher Erscheinungen nutzbar werden.

Die Vorhersage der Eigenschaften der wegen ihrer Größe kaum noch vorerprobaren Kraftwerkskomponenten während der Konstruktionsphase (Schwachstellenanalyse) oder der Ursachenaufklärung bei Fehlverhalten in der Betriebsphase (Störungsanalyse) verlangt die Schaffung einer datenbankgekoppelten Konstruktions- und Prozeßdiagnose-Systematik, die Hersteller und Betreiber in die Lage versetzt, das kollektive Wissen auf die Lösung der jeweiligen Aufgabe anzuwenden und gleichzeitig bei der ständigen Erweiterung und Verbesserung des Kenntnisvorrates (lernfähige Datenbank) mitzuwirken.

Grundprinzip einer solchen Systematik ist, die zunächst unüberschaubaren Wirkungsabläufe in technischen Systemen mit Hilfe von Merkmal-Eigenschaften-Zuordnungen in überschaubare Teilvorgänge aufzuspalten, für die der Speicher die aktuelle Informationsmenge bereithält.

Dabei wird es nur in wenigen Fällen möglich sein, die wirkenden Elementarvorgänge vollständig und exakt zu beschreiben. Im wesentlichen muß davon ausgegangen werden, relevante Einflußgrößen oder Aggregationen von Einflußgrößen zu erkennen, zu quantifizieren und in geeigneter Wichtung zur adäquaten Erfassung des Problems heranzuziehen.

Wegen ihrer komplexen Natur und der weitreichenden technischen und ökonomischen Konsequenzen stellen die Ansatzbildungen in Dampferzeuger-Feuerräumen ein besonders drastisches Beispiel für unerwünschte Nebenwirkungen dar, das noch immer zu den unbewältigten Problemen der konventionellen Kraftwerkstechnik gezählt werden muß.

## 2. Ansatzbildungen in Feuerräumen

Das Funktionselement Feuerraum in konventionellen Dampferzeugern hat eine verlustarme Verbrennung des Kohlenstaubes und einen Temperaturabbau des Rauchgases auf Werte um 1000 °C zur Aufgabe. Als zusätzliche Forderung gilt, daß die beabsichtigte Wärmeübertragung über angemessene lange Reisezeiten keine unzulässige Veränderung durch Ansatzbildung auf der Strahlungsheizfläche erfährt und dieser Zustand bei einem Minimum an Einsatz von Reinigungseinrichtungen aufrechterhalten werden kann.

Trotz jahrzehntelanger Erfahrungen mit Braunkohlenstaub-Feuerungen und vielfältigen Forschungsarbeiten müssen immer wieder Feuerraumverschmutzungen hingenommen werden, die zu starken Reisezeitverkürzungen und Lasteinsenkungen zwingen oder Zerstörungen an Feuer-



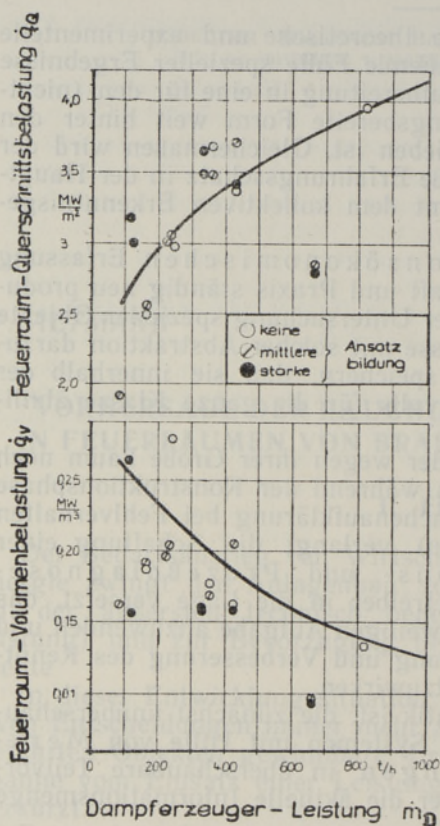


Bild 1.

raumtrichter und Entaschung durch herabfallende Schlackemassen verursachen, die neben Produktionsausfällen eine ernste Gefährdung von Menschenleben bedeuten.

Die Hersteller sind in der Vergangenheit bei der Auslegung von Feuerräumen von Erfahrungswerten der Volumenbelastung  $\dot{q}_V$  und der Querschnittsbelastung  $\dot{q}_Q$  ausgegangen, wobei eine Differenzierung in Abhängigkeit von den bekannten oder vermuteten Ascheeigenschaften bezüglich ihrer Verschmutzungsneigung vorgenommen wurde. Wie die in Bild 1 dargestellte Auswertung der Betriebsergebnisse ausgeführter Anlagen erkennen läßt, werden durch diese Kenngrößen die Vorgänge völlig ungenügend erfaßt. Besonders auffällig ist das Beispiel der 660 t/h-Dampferzeuger von 210 MW-Kraftwerksblöcken, bei denen trotz erheblicher Unterschreitung der üblichen Richtwerte das Ansatzverhalten einer Braunkohle mit schwieriger Asche nicht zufriedenstellend beherrscht werden kann. Offensichtlich wirken hier Einflußgrößen, die bei der Gestaltung keine ausreichende Berücksichtigung erfahren haben.

In der Literatur der letzten Jahre [3,4] häufen sich die Hinweise, daß

für die Feuerraumverschmutzung konstruktiv beeinflussbare Größen wie die Brennergürtelbelastung, Feuerraumtemperatur oder die Mahlfeinheit des Brennstaubes in ihrer komplexen Wirkung zu beachten sind, wenn ein normaler Dauerbetrieb auch unter den Bedingungen einer ungünstigen mineralogischen Zusammensetzung der Brennstoffasche gewährleistet werden muß. Die Ansatzbildungsprobleme sind offenbar keiner befriedigenden Lösung zuzuführen, wenn sich die Betrachtung auf Teilfragen beschränkt. Unerläßlich ist, die Erscheinung als Funktion mehrerer unabhängiger Einflußgrößen zu verstehen, die vollständig erkannt und grundsätzlich als System behandelt werden müssen. Für die dabei auftretenden nichtlinearen Zusammenhänge kann eine mathematische Darstellung

$$\hat{f}_v = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_n z_n \quad (1)$$

Anwendung finden, in der die Einflußgrößen  $z_i$  linear auf die Verschmutzungsneigung  $\hat{f}_v$  einwirken.

Dieser Vorstellung folgend wurde eine große Zahl vorliegender Versuchsdaten von Dampferzeugern mit unterschiedlicher Konstruktion und abweichenden Brennstoff- sowie Aschebedingungen mit Hilfe eines Programmes zur Heizflächenberechnung [5] maschinell ausgewertet und anschließend Regressionsanalysen unterworfen. Dabei zeigte sich, daß der



als Verhältnis der rechnerischen unverschmutzten zur gesamten Feuerraum-Heizfläche gebildete Kennwert

$$f_v = A_{S\text{eff}}/A_S \quad (2)$$

zwar stark streuende, aber deutliche Abhängigkeiten zum Brennstoffheizwert, Flammenvolumen-Belastung und Feuerraum-Austrittstemperatur erkennen läßt, während für die Feuerraum-Volumenbelastung, Querschnittsbelastung und Schlankheitsgrad keine überzeugende Tendenz zu finden ist. Wegen unzulänglicher Meßunterlagen konnte die Mahlfeinheit nicht untersucht werden, ist aber als wichtig einzuschätzen.

Nach dem bisher vorliegenden Erkenntnisstand nimmt Beziehung (1) auf Grundlage der aus den Betriebsergebnissen abgeleiteten Einflußgrößen die Form

$$f_v = \beta_0 + \beta_1 c_i^* + \beta_2 H_B + \beta_3 \dot{q}_F + \beta_4 \vartheta_F \quad (3)$$

an, in der die Komponenten

— mineralogische Aschezusammensetzung	$c_i^*$ ,	kg/kg
— Brennstoff-Heizwert	$H_B$ ,	MJ/kg
— Flammenvolumen-Belastung	$\dot{q}_F$ ,	MW/m <sup>3</sup>
— Feuerraum-Austrittstemperatur	$\vartheta_F$ ,	°C

enthalten sind. Es erscheint zweckmäßig, die einzelnen Glieder zunächst getrennt auszuwerten, um daraus Rückschlüsse auf konstruktive Einflußmöglichkeiten ziehen zu können und einen den Gesamtvorgang quantifizierenden Durchschnittswert erst zuletzt zu bilden:

$$f_v = \frac{1}{4} (f_{v1} + f_{v2} + f_{v3} + f_{v4}). \quad (4)$$

Die nach diesem Vorgang ermittelte Kenngröße  $f_v$  läßt sich so abgestimmt gewinnen, daß sie für eine normierte Betriebszeit  $t_R^* = 2500$  h Gültigkeit besitzt. In einem weiteren Berechnungsschritt gestattet dann der Kennwert  $f_v$  Vorhersagen über eine zu erwartende Reisezeit  $t_R$ , nach deren Ablauf die Ansatzbildungen im Feuerraum ihre betriebstechnisch zulässige Grenze überschreiten.

### 3. Verschmutzungseigenschaften der Brennstoff-Aschen

Eine Beurteilung der Brennstoff-Aschen nach ihrer chemischen Zusammensetzung oder unter Verwendung thermischer Verfahren, die das Agglomerationsverhalten im Labormaßstab bzw. unter Simulierung betriebsähnlicher Bedingungen zu charakterisieren suchen, hat bisher immer zu widersprüchlichen Ergebnissen geführt. Trotz der allgemein verbreiteten pessimistischen Einschätzung dieser Methoden lehrt die Erfahrung, daß hohe Anteile der Aschen an CaO, MgO und SO<sub>3</sub> in den meisten Fällen mit gefährlichen Hafteigenschaften verknüpft sind. Beim Auftreten von Alkalien verschärft sich die Situation noch wesentlich.

Eine Auswertung repräsentativer Ascheanalysen aus 12 Braunkohlkraftwerken mit Hilfe unterschiedlicher Kombinationen der chemischen Ascheanteile läßt den genannten Zusammenhang erkennen, wenn die Komponenten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und die Summe CaO+MgO+SO<sub>3</sub> in einem Dreieckskoordinaten-Diagramm dargestellt werden (Bild 2).

Andere Kombinationen, darunter die von ZINZEN [6] vor Jahren als allgemeines Schmelzdiagramm empfohlene und später selbst wieder



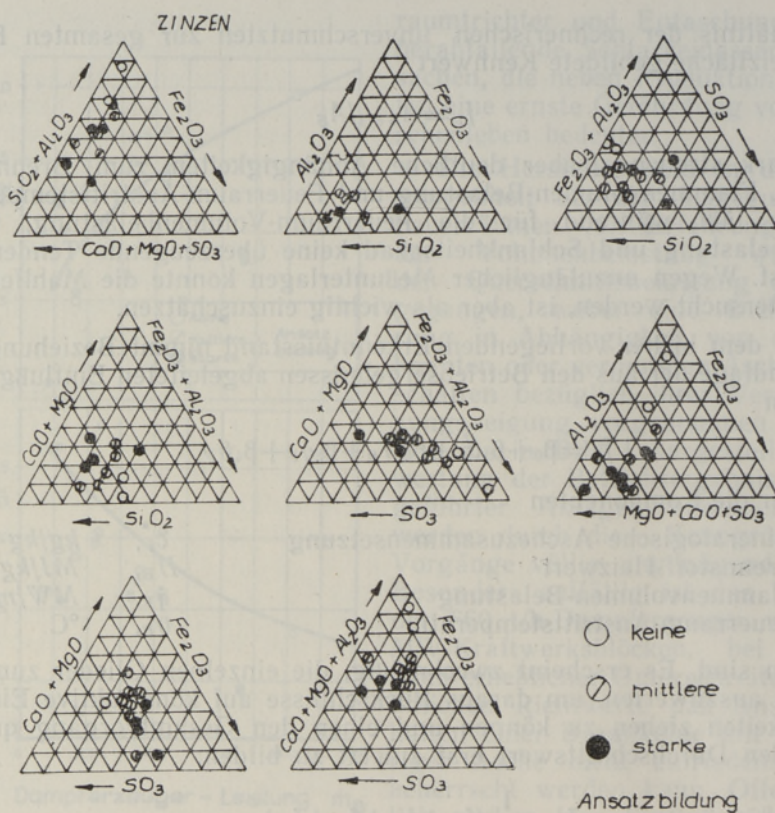
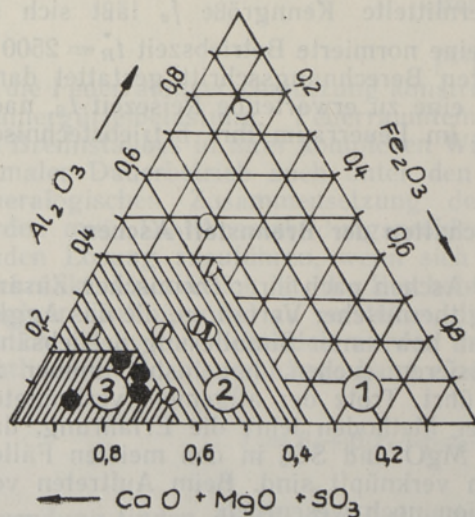


Bild 2.



Bereich	$f_{v0}$
①	0,750
②	0,550
③	0,350
$f_{v1} = f_{v0} - 5 \cdot c_{alk}$	

Bild 3.

aufgegebene Auftragung der Aschenanteile, zeigen diese Tendenz nicht oder weniger deutlich.

Damit erscheint eine zumindest grobe Einteilung der Aschen in Kategorien mit geringer, mittlerer und starker Verschmutzungsneigung mög-



lich, wie sie in Bild 3 dargestellt ist. Zur Quantifizierung werden den drei Bereichen durch Erfahrung bestätigte Verschmutzungsfaktoren  $\bar{f}_{v0}$  zugeordnet, für die noch eine Korrekturvorschrift zur Berücksichtigung des Alkaligehaltes im Faktor  $\bar{f}_{v1}$  angegeben wird.

#### 4. Brennstoff-Heizwert

Ungünstige mineralogische Zusammensetzungen der Brennstoffasche führen besonders dann zu verstärkter Ansatzbildung, wenn zugleich ein hoher Heizwert vorliegt, der die Verbrennungstemperaturen heraufsetzt. Eine die Feuerraumverschmutzung begünstigende Situation kommt deshalb bevorzugt bei geringen Asche- und Wassergehalten der eingesetzten Rohbraunkohle zustande. Die genannten Abhängigkeiten werden von der in Bild 4 dargestellten

Regressionsfunktion  $\bar{f}_{v2} = \bar{f}_{v2}(H_B)$  wiedergegeben. Hierzu muß bemerkt werden, daß für derartige Analysen die übliche Methode der kleinsten Quadrate nicht in Betracht kommt, sondern einer Modifikation bedarf. Da sich bei den zur Untersuchung zur Verfügung stehenden Anlagen Häufungen in bestimmten Bereichen ergeben, ist für die bevorzugten Stellen ein gemeinsamer Erwartungswert zu bilden, damit die durch eine geringere Datenmenge vertretenen Bereiche mit angemessener Wichtung in die Berechnung eingehen.

#### 5. Flammenvolumen-Belastung

Kohlenstaubflammen beanspruchen bei dem im Bereich hoher Temperaturen ( $\bar{\vartheta}_F = 1100^\circ\text{C}$ ) überwiegend diffusionsgesteuerten Verbrennungsvorgang für Mischung, Zündung und Ausbrand eine Raumausdehnung, die von der umgesetzten Wärmemenge, den Mischeigenschaften der Brenner und dem Luftüberschuß abhängig ist. Bei niedrigen Verbrennungstemperaturen (geringer Brennstoff-Heizwert, starke Feuerraumkühlung) wirken sich zusätzlich reaktionskinetische Vorgänge auf die Flammengeometrie aus und führen zu einem vergrößerten Volumen. Innerhalb des Feuerraumes beeinflussen sich die Brenner gegenseitig durch Turbulenzwirkungen, die eine Flammenverkürzung herbeiführen. Für die in modernen Dampferzeugern üblichen, untereinander meist ähnlichen Kohlenstaub-Brennertypen kann zur Berechnung des Volumens der diffusionsgesteuerten Einzelflamme näherungsweise gesetzt werden:

$$V_{FBr} = \dot{Q}_{Br}^{1,35} [1,84e^{(1-\lambda)} - f_h]. \quad (5)$$

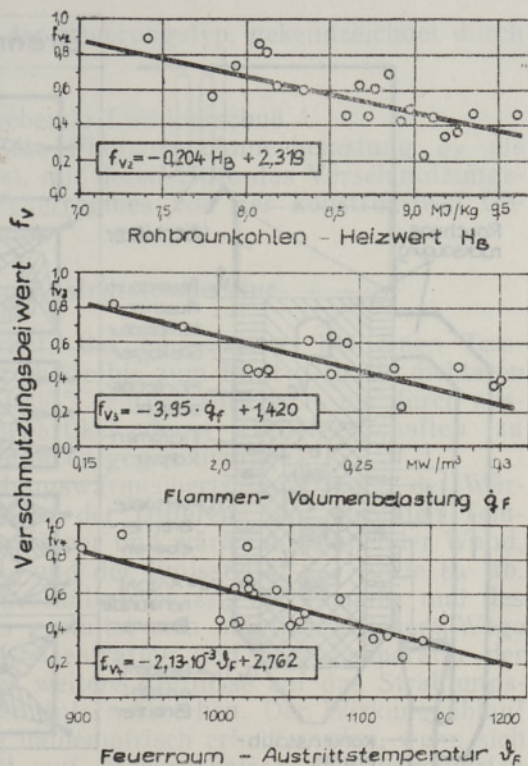


Bild 4.



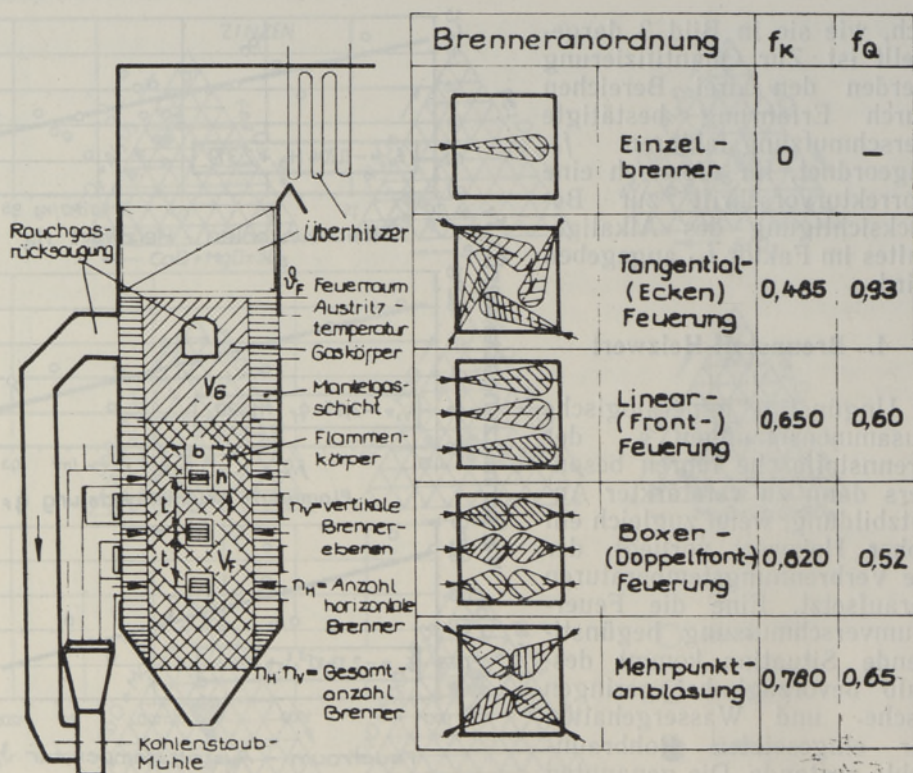


Bild 5.

Die Größe  $f_h$  drückt darin die wechselseitige Beeinflussung der Brenner in Abhängigkeit von ihrer Einblaserichtung in den Feuerraum aus. Bild 5 liefert hierfür Anhaltswerte nach Versuchsergebnissen.

Zur Verminderung des Verschmutzungsverhaltens werden gefährliche örtliche Temperaturmaxima durch Aufteilung der Brenner auf möglichst große Feuerraumhöhen umgangen. Die vertikale relative Brennerteilung  $u_{Br} = t_{Br}/d_{Br}$  bewirkt eine Streckung des Flammenkörpers im Feuerraum, die in folgender Beziehung für das Flammen-Gesamtvolumen

$$V_F = \dot{Q}_{Br}^{1,35} \{n_V n_H [1,84e^{(1-\lambda)} - f_h] + n_H (n_V - 1) 0,35 u_{Br}\} \quad (6)$$

Berücksichtigung findet. Mit dieser Größe errechnet sich die für Verschmutzungsverhalten und Strahlungswärmeübertragung gleichermaßen wichtige Flammenvolumen-Belastung:

$$\dot{q}_F = \frac{Q_{ges}}{V_F} = \frac{\dot{m}_B (H_B + 0,85 V_L C_{pML} \theta_{LW})}{V_F} \quad (7)$$

Damit läßt sich der durch die Feuerungskonzeption beeinflusste Verschmutzungsfaktor nach der in Bild 4 angegebenen Regressionsfunktion  $f_{v3} = f_{v3}(q_F)$  errechnen. Wie aus Gl. 6 abgelesen werden kann, gehen hier zugleich 6 konstruktive oder betriebstechnische Faktoren ein:

- die Aufteilung der Verbrennungsleistung auf  $n_V n_H$  Einzelbrenner
- die Anzahl  $n_V$  der vertikal angeordneten Brennerreihen
- das Teilungsverhältnis  $u_{Br}$  der Brenner in vertikaler Richtung



- die Einblaserichtung bzw. der Feuerungstyp, gekennzeichnet durch den Wert  $f_h$
- die Heißlufttemperatur  $\vartheta_{Lw}$
- der als Regelgröße vorzugebende Luftüberschuß  $\lambda$

Daraus ist ersichtlich, daß die Flammenvolumenbelastung  $\dot{q}_F$  als entscheidende Größe anzusehen ist, mit deren Hilfe das Verschmutzungsverhalten eines Dampferzeuger-Feuerraumes von der konstruktiven Gestaltung her beeinflußt werden kann.

## 6. Feuerraum-Austrittstemperatur

Die Wärmeübertragung innerhalb des Feuerraumes hat einen Temperaturabbau der Verbrennungsprodukte bis zum Eintritt in die dichteren Überhitzer-Heizflächen auf rund 1000 °C zu gewährleisten, um durch ausreichende Abkühlung der Aschepartikel deren Hafteigenschaften zu vermindern und einer Ansatzbildung entgegenzuwirken.

Nach den Gesetzen der Strahlungswärmeübertragung hängt der Wärmestrom  $\dot{Q}_S$  von der vierten Potenz der Differenz der absoluten Temperaturen zwischen Flammen-Gas-Körper und wärmeaufnehmender Wand, dem Oberflächenverhältnis  $A_{FG}/A_S$  und der Emissivität  $\varepsilon_{FG}$  sowie  $\varepsilon_W$  ab.

Die Ermittlung des Emissionsverhältnisses  $\varepsilon_{FG}$  der Flamme und des daran anschließenden Gaskörpers gestaltet sich auf theoretischem Wege schwierig, da über Verteilung, Konzentration und Eigentemperatur der Ruß- und Staubanteile sowie über weitere Einflüsse auf das Strahlungsverhalten nur unvollkommene Kenntnisse bestehen. Der Wirkungsablauf kann dagegen in guter Näherung halbempirisch erfaßt werden, wenn sich die Berechnung der Emissivität auf Meßergebnisse an ausgeführten Anlagen stützt, die in Anlehnung an das Beersche Gesetz als Funktion der Flammenvolumen-Belastung  $\dot{q}_F$  und der Schichtdicke  $s_F$  darzustellen sind:

$$\varepsilon_{FG} = 1 - e^{-K \dot{q}_F s_{FG}} = 1 - e^{-4,15 \dot{q}_F s_{FG}} \quad (8)$$

Bei anderen Brennstoffen als Braunkohle ändert sich der Wert  $K$ . Für die zutreffende Wiedergabe der Wärmeübertragungsvorgänge im Feuerraum ist es unerläßlich, die Strahlungsabsorption in einer Mantelgasschicht zu berücksichtigen, die zwischen Flammenkörper und Feuerraumwand in Abhängigkeit von der Einblaserichtung der Brenner entsteht. Je nach der Feuerungsbauart kann dieser Störeffekt eine Heraufsetzung der Feuerraum-Austrittstemperatur um 100–200 °C bewirken.

Mit der aus den Angaben für die Querschnittsbeaufschlagung  $f_Q = A_{QFG}/A_{QFR}$  in Bild 5 zu errechnenden Schichtdicke  $s_M$  dieser staubbeladenen Gasschicht wird das Absorptionsvermögen aus der Näherungsbeziehung

$$\varepsilon_M = 1 - e^{-0,25 s_M} \quad (9)$$

gefunden.

Das Emissionsverhältnis  $\varepsilon_W$  der Heizfläche  $A_S$  ergibt sich aus der durch Rohrteilung  $t$  und Wandabstand  $a$  gegebenen Heizflächenwertigkeit  $\psi_{AS}$  und dem Verschmutzungsfaktor  $f_v$  zu:

$$\varepsilon_W = \psi_{AS} f_v \quad (10)$$

Die Oberfläche  $A_{FG}$  des quaderförmig angenommenen Flammen-Gas-Körpers bis zu der Höhe  $l_H$ , für welche die Feuerraum-Austrittstemperatur  $\vartheta_F$  gesucht wird, geht aus

$$A_{FG} = 2 \sqrt{f_Q} (l_H l_B + l_H l_T + \sqrt{f_Q} l_B l_T) \quad (11)$$



hervor. Mit dem Volumen des Flammen-Gas-Körpers

$$V_{FG} = l_H l_B l_T f_Q \quad (12)$$

kann die gleichwertige Schichtdicke hinreichend genau aus

$$s_{FG} = 3,4 V_{FG} / A_{FG} \quad (13)$$

errechnet werden. Für die Schichtdicke des Mantelgases wird gesetzt

$$s_M = 1/2 (s_{FR} - s_{FG}), \quad (14)$$

worin  $s_{FR}$  die analog Gl. 13 gebildete Schichtdicke des gesamten Feuerraumes bedeutet.

Die Bestimmung der Feuerraum-Austrittstemperatur  $\vartheta_F$  erfolgt dann auf graphischem Wege durch Gleichsetzung der durch Strahlung übertragenen Wärmemenge

$$\dot{Q}_S = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_{FG} - \varepsilon_M} + \frac{A_{FG}}{A_S} \left( \frac{1}{\psi_{AS} f_v} - 1 \right)} A_{FG} \left[ \left( \frac{T_F}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_W}{100} \right)^4 \right] \quad (15)$$

mit der aus der Rauchgasabkühlung von der adiabaten Verbrennungstemperatur auf Feuerraum-Austrittstemperatur hervorgehenden Wärmemenge

$$\dot{Q}_R = m_B^* [(H_B + h_L) - V_{Rf} C_{p,mR} \vartheta_F], \quad (16)$$

indem die Berechnung von  $\dot{Q}_S$  und  $\dot{Q}_R$  für mehrere geschätzte Temperaturen erfolgt und der gesuchte Wert  $\vartheta_F$  als Schnittpunkt der beiden gegenläufigen Kurven gefunden wird.

Den Zusammenhang zwischen  $\vartheta_F$  und dem durch  $f_{v4}$  charakterisierten Verschmutzungsverhalten stellt die aus Bild 4 zu entnehmende Regressionsfunktion  $f_{v4} = f_{v4}(\vartheta_F)$  her.

Die vorangegangenen Darlegungen weisen darauf hin, daß nicht nur eine ausreichend bemessene Feuerraumhöhe bis zum Eintritt in die Überhitzerheizflächen vorhanden sein muß, sondern die Wärmeübertragung in der Brennkammer keine nennenswerte Behinderung durch die Ausbildung strahlungsabsorbierender Gasschichten erfahren darf. Die Beherrschung der Aerodynamik des Feuerraumes hat für die Zurückdrängung der rauchgasseitigen Ansatzbildung eine bisher unterschätzte Bedeutung.

## 7. Zeitverhalten der Ansatzbildung

Ansatzbildungen entwickeln sich während der Anlaufphase zunächst relativ langsam, weisen nachfolgend einen steileren Anstieg auf und schreiten schließlich wegen der Zunahme von Trennkräften gegenüber den Haftkräften bis zur Erreichung eines Grenzwertes in geringerem Maße fort. Die Vorgänge gehorchen einem allgemeinen Wachstumsgesetz [7,8], das durch die Diff. Gl.

$$\frac{dx}{dy} = ax(1-x) \quad \text{mit der Lösung} \quad y = \frac{1}{a} \ln \left( \frac{x}{1-x} \right) + C \quad (17)$$

beschrieben werden kann. Unter Einführung eines Zusatzgliedes, das mit Hilfe eines Parameters  $n$  eine unterschiedliche Wichtung der Variablen gestattet, und bei Beschränkung auf den Abschnitt  $x = 0,01$  bis  $x = 0,99$  lautet die Gleichung:



$$y = \frac{1}{e^{0,99n} \ln(99^2)} e^{nx} \ln\left(99 \frac{1}{1-x}\right). \quad (18)$$

Bei geeigneter Maßstabsfestlegung läßt sich in Auswertung statistisch erfaßter Erfahrungsdaten der zeitliche Ablauf von Verschmutzungsvorgängen mit brauchbarer Wirklichkeitsnähe darstellen.

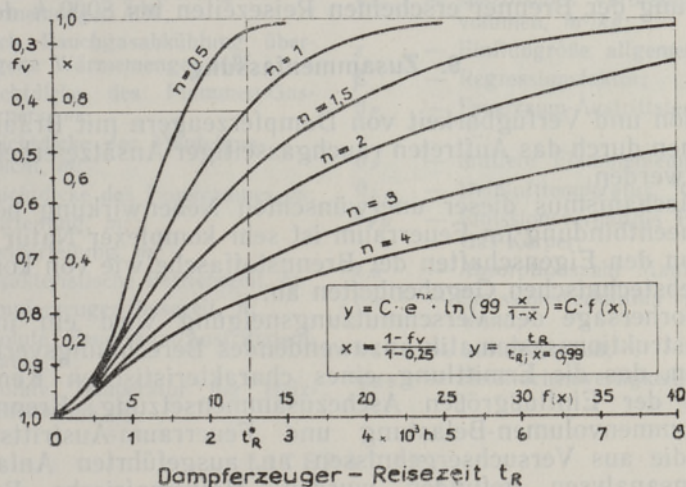


Bild 6.

Für den speziellen Fall der Feuerraum-Ansatzbildung ist in Diagramm Bild 6 der Zusammenhang zwischen dem Verschmutzungsfaktor  $f_v$  als kennzeichnendem Wert für den jeweiligen Betriebszustand und der Reisezeit  $t_R$  eines Dampferzeugers wiedergegeben. Im Schnittpunkt des für eine Norm-Betriebszeit von  $t_R^* = 2500 \text{ h}$  ermittelten Kennwertes  $f_v$  mit einer in ihrem Verlauf durch den Scharparameter  $n$  festgelegten Kurve ergibt sich die jeweils gültige Zeitfunktion, aus der unter Annahme annähernd konstanter Arbeitsbedingungen die wahrscheinliche Reisezeit  $t_{R\max}$  des untersuchten Dampferzeugers an der Stelle  $f_v = 0,25$  entsprechend  $x = 0,99$  abgelesen werden kann. Nach Ablauf dieses Zeitraumes tritt die Notwendigkeit zur Außerbetriebnahme der Anlage infolge Überschreitung technischer und ökonomischer Grenzen ein.

### 8. Zahlenbeispiel

Für einen Großdampferzeuger wurde an Hand eines Arbeitsblattes QK 81: «Ansatzbildung in Dampferzeuger-Feuerräumen» eine Vorausberechnung der rauchgasseitigen Ansatzbildung bei Einsatz einer Braunkohle mit starker Verschmutzungsneigung vorgenommen, wobei gleichzeitig der Vergleich zwischen Tangentialfeuerung und Boxerfeuerung erfolgte. Dabei ergaben sich die nachstehend zusammengestellten Ergebnisse:

Kennwerte	Tangentialfeuerung	Boxerfeuerung
$f_{v1}$	0,285	0,285
$f_{v2}$	0,359	0,359
$f_{v3}$	0,582	0,275
$f_{v4}$	0,475	0,288
$f_v$	0,425	0,302
$\vartheta_F$	1072 °C	1163 °C
$t_R$	$5 \cdot 10^3 \text{ h}$	$3,5 \cdot 10^3 \text{ h}$



Die Unterschiede zwischen beiden Feuerungsvarianten zeigen den starken Einfluß der technischen Ausführung auf die Betriebseigenschaften eines Dampferzeugers und dürfen als Hinweis dafür gelten, in welchem Umfang konstruktive Möglichkeiten zur Bewältigung auch schwieriger Brennstoffe bestehen. Dabei sind bei der betrachteten Tangentialfeuerung noch nicht alle Mittel ausgeschöpft. Durch Vergrößerung der Bauhöhe des Feuerraumes bis zum Eintritt in die Überhitzerheizfläche und weitere Auflockerung der Brenner erscheinen Reisezeiten bis 8000 h denkbar.

## 9. Zusammenfassung

Funktion und Verfügbarkeit von Dampferzeugern mit Braunkohlefeuerung können durch das Auftreten rauchgasseitiger Ansätze erheblich beeinträchtigt werden.

Der Mechanismus dieser unerwünschten Nebenwirkung beim Prozeß der Wärmeentbindung im Feuerraum ist sehr komplexer Natur und hängt sowohl von den Eigenschaften der Brennstoffasche wie von konstruktiven und betriebstechnischen Gegebenheiten ab.

Zur Vorhersage der Verschmutzungsneigung wird ein im Rahmen einer Konstruktionssystematik anzuwendendes Berechnungsverfahren vorgeschlagen, das die Ermittlung eines charakteristischen Kennwertes  $f_v$  mit Hilfe der Einflußgrößen Aschezusammensetzung, Brennstoff-Heizwert, Flammenvolumen-Belastung und Feuerraum-Austrittstemperatur vorsieht, die aus Versuchsergebnissen an ausgeführten Anlagen durch Regressionsanalysen gefunden wurden. Halbempirische Beziehungen gestatten, die wirkenden Elementarvorgänge zu erfassen und quantitative Beziehungen zwischen den Einflußgrößen und dem Verschmutzungsverhalten herzustellen. Durch Anwendung eines allgemeinen Wachstumsgesetzes lassen sich mit der gefundenen Größe Vorhersagen über die zu erwartende Reisezeit eines Dampferzeugers treffen. Indem das Verfahren nicht nur für den Konstruktionsprozeß herangezogen wird, sondern dem Betreiber im Sinne einer Prozeß-Diagnose zur Aufklärung von Schäden oder des Fehlverhaltens ausgeführter Anlagen dient, läßt sich durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit dem untersuchten Funktionselement eine ständige Verbesserung des Programmsystems herbeiführen.

## 10. Formelzeichen

$a$	— Wandabstand, $m$ ;	$f_k$	— Anordnungsfaktor Brenner;
$A_{FG}$	— Oberfläche Flammen-Gas-Körper, $m^2$ ;	$f_Q$	— Querschnittsbeaufschlagung Feuerraum;
$A_{QFG}$	— Querschnittsfläche Flammen-Gas-Körper, $m^2$ ;	$f_v$	— Verschmutzungsfaktor;
$A_{QFR}$	— Querschnittsfläche Feuerraum, $m^2$ ;	$H_B$	— Brennstoff-Heizwert, $mJ/kg$ ;
$A_S$	— Feuerraum-Heizfläche, $m^2$ ;	$h_L$	— spez. Enthalpie Verbrennungsluft, $kJ/kg$ ;
$A_{S\,eff}$	— effektive (unverschmutzte) Feuerraum-Heizfläche, $m^2$ ;	$l_B$	— Feuerraum-Breite, $m$ ;
$C_{p\,mL}$	— spezif. Wärmekapazität Verbr. Luft, $kJ/m^3K$ ;	$l_H$	— Feuerraum-Höhe, $m$ ;
$C_{p\,mR}$	— spezif. Wärmekapazität Rauchgas, $kJ/m^3K$ ;	$l_T$	— Feuerraum-Tiefe, $m$ ;
$c_i, c_i^*$	— Massegehalt, $kg/kg$ ;	$\dot{m}_B^*$	— umgesetzte Brennstoffmenge, $kg/s$ ;
$C_s$	— Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers, $W/m^2K$ ;	$n_H$	— Anzahl Brenner in horizontaler Anordnung;
$d_{Br}$	— hydraulischer Durchmesser Brenner, $m$ ;	$n_V$	— Anzahl Brenner in vertikaler Anordnung;
		$\dot{q}_F$	— Flammenvolumen-Belastung, $MW/m^3$ ;



$\dot{q}_Q$ — Feuerraum-Querschnittsbelastung, $MW/m^2$ ;	$u_{Br}$ — relative Brennerteilung;
$\dot{q}_V$ — Feuerraum-Volumenbelastung, $MW/m^3$ ;	$V_F$ — Volumen Flammenkörper, $m^3$ ;
$\dot{Q}_{Br}$ — Wärmemenge Einzelbrenner, $MW$ ;	$V_{FG}$ — Volumen Flammen-Gas-Körper, $m^3$ ;
$\dot{Q}_{ges}$ — Gesamt-Wärmemenge Feuerraum, $MW$ ;	$V_{Br}$ — Volumen-Einzelflamme, $m^3$ ;
$\dot{Q}_S$ — durch Strahlung übertragene Wärmemenge, $MW$ ;	$V_{Rf}$ — feuchtes spezifisches Rauchgasvolumen, $m^3/kg$ ;
$\dot{Q}_R$ — durch Rauchgasabkühlung übertragene Wärmemenge, $MW$ ;	$V_L$ — spezifisches Verbrennungsluftvolumen, $m^3/kg$ ;
$s_{FG}$ — Schichtdicke des Flammen-Gas-Körpers, $m$ ;	$z$ — Einflußgröße allgemein;
$s_M$ — Schichtdicke der Mantelgas-Schicht, $m$ ;	$\beta$ — Regressionsfaktor;
$s_{FR}$ — Schichtdicke des Feuerraumes, $m$ ;	$\vartheta_F$ — Feuerraum-Austrittstemperatur, $^{\circ}C$ ;
$t$ — Rohrteilung, $m$ ;	$\vartheta_F$ — mittlere Flammentemperatur, $^{\circ}C$ ;
$t_{Br}$ — Brennerteilung, $m$ ;	$\vartheta_{Lw}$ — Heißlufttemperatur, $^{\circ}C$ ;
$t_R$ — charakteristische Betriebszeit, $h$ ;	$\varepsilon_{FG}$ — Emissionsverhältnis Flammen-Gas-Körper;
$t_R$ — Dampferzeuger-Reisezeit, $h$ ;	$\varepsilon_M$ — Absorptionszahl Mantelgas;
$T_F$ — absolute Feuerraum-Austrittstemperatur, $K$ ;	$\varepsilon_W$ — Emissionsverhältnis Heizflächenwand;
$T_W$ — absolute Temperatur der Heizflächenwand, $K$ ;	$\lambda$ — Luftüberschuß;
	$\psi_{AS}$ — Heizflächenwertigkeit.

## LITERATUR

1. Altmann W. u. a., *Energietechnik*, 23, H. 4, 152—159 (1973).
2. Splittgerber E., *Allianz-Berichte*, Nr. 14, 5—10 (1970).
3. Schindler K., *IfK-Information*, 57, 6—10 (1972).
4. Miller C., Lenkewitz K. H., *Braunkohle*, 24, Nr. 11, 382—387 (1972).
5. Reich W., *Energietechnik*, 18, H. 10, 453—458 (1968).
6. Zinzen A., *Dampfkessel und Feuerungen*, Berlin, 1957.
7. Schrauber H., *Die Technik*, 22, H. 7, 425—431 (1967).
8. Kahlert A., *Regionale Bevölkerungsprognosen GWF*, H. 6, 148—153 (1969).

Technische Universität  
Dresden

Eingegangen  
am 12. Juli 1974

W. ALTMANN

# PRUUNSOEKÜTTEGA AURUGENERAATORI KOLDEKAMBRI GAASID)EPOOLSE SADESTISE TEKKIMISE PROGNOOSIMINE

Soojuselektrijaamade kiire tehnilise arengu ja ühikvõimsuste suurenemise tõttu ei suudeta uute seadmete konstrueerimisel küllaldaselt arvesse võtta juba töötavate seadmete eksploatatsiooni omandatud kogemusi. Seetõttu on äärmiselt oluline energiaploki funktsionaalseid parameetreid usaldusväärne prognoosimine. Artiklis vaadeldakse kolde küttepindade saastumist põhjustavate tegurite määramise võimalust regressioonanalüüsi meetodil. Esitatakse korrelatsiooniparameetrid, mis võimaldavad määrata aurugeneraatori küttekolde soojuslikku efektiivsust.

В. АЛТМАНН

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ТОПКАХ БУРОУГОЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Непрерывный рост единичных мощностей энергоблоков в значительной мере уменьшает вклад эксплуатационного опыта в конструкции новых агрегатов. Разработка научно обоснованной методики прогнозирования функциональных параметров становится поэтому крайней необходимостью. В статье приведены основные теоретические концепции создания такой методики, причем более детально изучению подвергнуты образования золовых отложений в топках парогенераторов. Найдены коррелирующие параметры, позволяющие определять тепловую эффективность работы топок парогенераторов.