

BESTIMMUNG DER FEUERUNGSSTABILITÄT AUS DEN DRUCKSCHWANKUNGEN IM FEUERRAUM

A. PENNINGER and L. KÁRPÁTI

Lehrstuhl für Wärmekraftmaschinen
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen: am 20 Dezember 1991.

Abstract

In high-power coal dust steam boilers of power plants the phenomenon of pulsation in the furnace chamber can frequently be experienced. This can be determined through the measurement of pressure fluctuations. They provide a stochastic signal that can be analyzed with the help of probability rules. Such signals can only be defined by statistical features, or characteristic functions, never by direct analysis. The signal processing makes the determination of the stability of burning possible. There is a device for the continuous control of operation.

Keywords: pressure fluctuations, stochastic signal, probability-density.

Für Verbrennungsprozesse in Feuerungsanlagen ist es kennzeichnend, daß die für den Verbrennungsprozess bestimmenden Kenngrößen im allgemeinen zeitlich nicht konstant sind, sondern mehr oder weniger große Schwankungen um den erwünschten Wert aufweisen. Das betrifft die Geschwindigkeitsverteilung der den Feuerraum einströmenden Luft- bzw. Brennstoffströmung und über diese die räumliche und zeitliche Änderung der Brennstoff/Luftkonzentration, deren Folgen Druck- und Temperaturschwankungen im Feuerraum sind.

Die Flamme in der Feuerungsanlage ist zugleich der am besten geeignete "Stabilitätsindikator", da eine Störung in einem beliebigen Systemelement der Anlage in der Regel in der Flamme verstärkt wahrnehmbar ist. In gasgefeuerten Anlagen kommt es oft vor, daß eine Störung in einem der Systemelemente zu einer so starken Schwankung der Wärmefreisetzung führt, daß durch die darauffolgende Druckschwankung die Anlage akustisch — und da die Erscheinung mit dem Freiwerden von Wärme zusammenhängt, thermoakustisch — erregt wird. Derartige Verbrennungsinstabilitäten werden auch als durch die Verbrennung erzeugte akustische Schwingungen oder einfach als pulsierende Verbrennung bezeichnet. Für den Prozess ist kennzeichnend, daß die Frequenz der entstehenden Druckschwingungen von den geometrischen Abmessungen der Anlage abhängig ist.

Auch bei Verbrennungsprozessen in kohlenstaubgefeuerten Anlagen kann eine pulsierende Verbrennung auftreten, was zugleich auf eine gewisse Periodizität der Verbrennungsinstabilitäten deutet; hier ist jedoch die Schwingungsfrequenz von der Geometrie der Anlage unabhängig und hängt entschieden von Gemischbildungs-, Ausgasungs-, Entzündungsprozess ab. Deshalb werden solche Verbrennungsinstabilitäten auch nicht-akustische Schwingungen genannt. Die Höhe der Schwingungsfrequenz ist vor allem von der Brennstoffqualität abhängig.

Durch Messung der Druckschwingungen im Feuerraum erhält man wertvolle Informationen über den Wärmefreisetzungsvorgang in der Flamme.

Die Feuerungsanlage sei als "Blackbox" betrachtet, wo lediglich die Beziehung zwischen Eingabe- und Ausgabeparametern untersucht wird (Abb. 1).

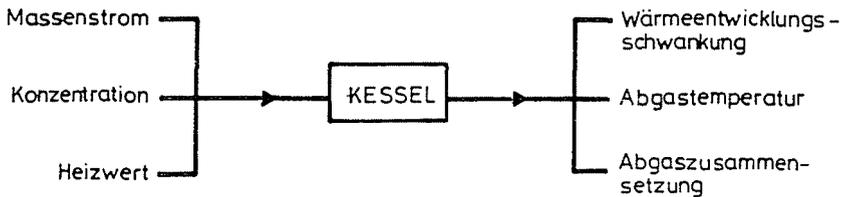


Abb. 1. Ein- und Ausgabekenngrößen einer Feuerungsanlage

Durch die Schwankungen bzw. Änderungen der Eingabeparameter werden das Freisetzen von Wärme und über dieses die Druckschwankung im Feuerraum und der Wirkungsgrad der Feuerung beeinflusst. Durch Druckschwankungen im Feuerraum wird — besonders im Falle einer hohen periodischen Komponente derselben — die Kesselkonstruktion einer hohen wiederholten Beanspruchung ausgesetzt, was zu rascher Materialermüdung und schliesslich zum Bruch führt. Im Falle rotierender Maschinen ist die schädigende Wirkung der verschiedenen Schwankungen hinreichend bekannt. An Feuerungsanlagen wurden bis jetzt nur in einigen Fällen dergartige Untersuchungen gemacht [1, 3]. Im weiteren soll dargelegt werden, wie das Signal der in der Feuerungsanlage gemessenen Druckschwankung analysiert wird, und welche Schlußfolgerungen auf Konstruktion oder Betrieb von den Informationen in der Zeitfunktion gezogen werden können.

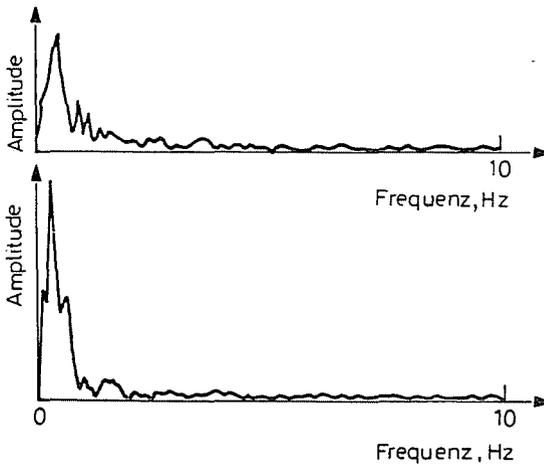


Abb. 2. Einfluss einer Verminderung um 5–6 Prozent des Kohlenheizwertes auf die Druckschwankung im Feuerraum

Messtechnische Erfassung des Feuerungsprozesses

Bei feuerungstechnischen Messungen hat man es meistens mit Systemen mit bestimmten Übertragungseigenschaften zu tun. Aus der Art der Aufgabe folgt, dass es wesentlich ist, wie das System diese Übertragungseigenschaften zustande bringt, d.h. es ist wichtig, die innere Struktur des Systems, die Wechselwirkungen innerhalb des Systems zu kennen. In solchen Fällen werden mathematische Modelle aufgestellt, bzw. messtechnische Verfahren angewandt, welche diese Übertragungskenngrößen ergeben, sowie über die Wechselwirkungen innerhalb des Systems Auskunft erteilen.

Was das Verhalten anbelangt, dürfen feuerungstechnische Anlagen als dynamische Systeme betrachtet werden. Sind die Zeitfunktionen sämtlicher Veränderlichen eines dynamischen Systems bekannt, ist unter Anwendung der inneren Zustände eine vollständige Beschreibung möglich. Diese Veränderlichen werden üblicherweise Zustandsgrößen genannt.

Ein Momentanwert dieser Veränderlichen ist in einem gegebenen Zeitpunkt für das System kennzeichnend, d.h. er gibt den Zustand des Systems an. Die Zustandsgrößen sind Träger von Informationen über das Innere des Systems. Damit das System messtechnisch vollständig bestimmt ist, müssen noch bekannt sein: der Einfluß des Eingangssignals des Systems auf die Zustandsgrößen, das für die Messung der Zustandsgrößen benutzte Messverfahren, ferner ist das Verfahren zur Analyse der Ausgangssignale zu wählen [3]. Bei der in der Feuerungstechnik üblichen Feuer-

raumgeometrie sind die Zustandsgrößen wie folgt: Feuerraumzug, Konzentrationsverteilung, Temperatur, usw.

Eingangssignale des Systems: Messendurchsatz, Konzentration, Heizwert (*Abb. 1*).

Bei kohlenstaubgefeuerten Hochleistungsdampfkesseln in Kraftwerken ergeben die in einem bestimmten Punkt der Feuerungsanlage gemessenen Druckschwankungen entschieden stochastische Signale, deren Informationsgehalt mit Hilfe mathematisch-statistischer Methoden ermittelt wird.

Die deterministischen Komponenten des stochastischen Signals, die Größe derselben, durch welche die kausalen Zusammenhänge der inneren Zustandsänderungen des Kessels aufgedeckt werden, werden mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsgesetzen bestimmt.

Messverfahren und Auswertungsprinzip

Die für die Kennzeichnung des Grades der Verbrennungspulsation als Ausgangspunkt gewählte Größe der Druckschwankung im Feuerraum wurde mit einem Piezoquarz-Druckmesser Typ Kistler 7261 gemessen. Die Messungen wurden an dem Dampfkessel mit 620 t/h Leistung des Wärmekraftwerks "Gagarin" und an dem mit 100 t/h Leistung des Wärmekraftwerks Ajka durchgeführt.

Die Messwerte wurden mit Hilfe eines Flüssigkeitsstrahl-Registriergeräts der Siemens-Werke und eines Magnetbandmessgerätes MBS-5 von Hottinger-Baldwin aufgezeichnet. Die mit dem letzteren Gerät aufgenommenen Prozesse wurden auf einem Computer Typ PDP 11/34 analysiert.

Die Auswertung wurde mit den in der Messtechnik stochastischer Signale angewandten statistischen Methoden durch die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion und des Leistungsdichtespektrums durchgeführt. Durch das Leistungsdichtespektrum wird die auf eine Frequenz von Einheitsbandbreite fallende, aus der Druckschwingung herrührende Beanspruchung einer kohlenstaubgefeuerten Anlage angegeben.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion der im Feuerraum gemessenen Druckschwingungen läßt sich durch die Summenhäufigkeitsfunktion annähern, von der abgelesen werden kann, wie gross die Wahrscheinlichkeit dessen ist, daß in einem zu einem vorgegebenen Druckwert — als liebigen Zeitpunkt kleiner als, oder gleich dem Druckwert der Funktion im gegebenen Punkte sein wird

$$P[f] = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{f \cdot T} \int_0^T f^2[t, f, \Delta f] dt \right],$$

mit der Dimension $\frac{P_a^2}{Hz}$.

Die Signalanalyse ist bei der Auswertung an mehrere Bedingungen gebunden.

Eine dieser Bedingungen ist, dass die Zeitfunktion des gemessenen Signals stochastisch ist; das bedeutet, dass sich lange Beobachtungsperioden einander ähnlich verhalten, ihre statistischen Kennwerte in der Zeit konstant sind [4, 5]. Eine andere Bedingung besteht darin, dass die Voraussetzung der Wahl der Probenahmefrequenz erfüllt ist.

Auswertung der Messung

Bei der Messung der Druckschwingungen im Feuerraum wurden in drei verschiedenen Zeitpunkten, an vorgegebenen Probenahmeorten Proben von 4 bis 5 Minuten Dauer mit Hilfe eines Flüssigkeitsstrahl-Schnellregistriergeräts registriert, sowie auf Magnetband aufgezeichnete Signale wurden nach folgenden Grundsätzen rechentechnisch verarbeitet: Bedingung der eindeutigen Reproduzierbarkeit des Messwertes nach dem Probenahmesatz von Shannon:

$$f_M \geq 2 \cdot f_{\max}.$$

Dabei bedeuten:

f_M die Probenahmefrequenz

f_{\max} die obere Grenzfrequenz des Signals.

Das bedeutet, dass für die Reproduktion eines Signals der Bandbreite f_{\max} eine Probenahme mit der Frequenz von mindestens $2 \cdot f_{\max}$ erforderlich ist.

In der Praxis ist es üblich, das 4 bis 5 fache dieser Frequenz zu wählen, um die Überdeckung von Spektrenteilen zu vermeiden [6].

Nach den mit Hilfe des Flüssigkeitsstrahl-Registriergeräts registrierten Proben ließ sich eindeutig feststellen, dass die Druckschwankungen in kohlenstaubgefeuerten Feuerräumen keine Frequenzkomponenten über 15 bis 20 Hz enthalten.

In Kenntnis dieses Umstands wurde die Probenahmefrequenz $f_M = 200$ Hz gewählt.

Die Zahl der von den Signalen entnommenen Proben betrug $N = 512$.

Die Messdauer des Computers ergab sich nach dem Zusammenhang

$$T = N \frac{1}{f_M}$$

zu ~ 2.5 s.

Durch den Computer wurden der Messdauer entsprechend die von der Druckschwingung abgeleiteten Zeitfunktionen in Zeitintervalle von $\Delta\tau = 2.5$ s unterteilt, dann wurden durch eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) die Amplitudenspektren getrennt bestimmt. Auf dem an den Computer angeschlossenen Plotter wurden die Zeitfunktionen und Amplitudenspektren der gemessenen Signale gezeichnet (Abb. 3).

Aus den Amplitudenspektren läßt sich feststellen, dass die Frequenzkomponentenmaxima aller Proben im Frequenzbereich 0.45–2 Hz, und alle wichtigen Frequenzkomponenten (>50 Pa) im Frequenzbereich 0.45–2 Hz liegen. Bei den Amplitudenspektren für verschiedene Zeitintervalle der von demselben Betriebszustand aufgenommenen Druckschwingungszeitfunktion ist die statistische Verteilung der wichtigen Frequenzkomponenten gut wahrnehmbar.

Aus der statistischen Verteilung der Frequenzkomponenten ist zu erkennen, dass die Druckschwingung ein sehr wenige periodische Komponenten enthaltendes Signal mit stark stochastischem Verlauf ist, dessen Informationsgehalt hauptsächlich durch das aus dem Mittelwert der Amplitudenspektren gebildete Leistungsdichtespektrum bestimmt wird.

Durch die rechenstechnisch ermittelten Leistungsdichtespektren wird die Leistungsdichteverteilung der Druckschwankungen im Frequenzbereich 0–10 Hz angegeben (Abb. 4). Aus dem Bild ist es zu erkennen, dass die Signale im Frequenzbereich 0.2–1.5 Hz die höchsten Leistungskomponenten haben und mit wachsenden Frequenzen eine stark abnehmende Tendenz zeigen.

Das ist für jeden Betriebszustand kennzeichnend. Mit Unterschieden in der Belastung der Feuerungsanlage oder mit Veränderungen des Heizwertes der Kohle verhältnismäßig ändern sich die Leistungskomponenten bzw. die dominanten Frequenzkomponenten der Amplitudenspektren (Abb. 2).

Für die Kennzeichnung der Druckschwankung im Feuerraum ist — neben der Bestimmung des Leistungsdichtespektrums — die prozentuale Häufigkeit der während einer festen Probenahmezeit registrierten Druckschwingungen am besten geeignet [4], die wie folgt ermittelt wird:

N — Gesamtzahl der Proben

P_k — Wert einer momentanen Probenahme

n_k — Zahl der P_k -Werte in der Gesamtzahl der Proben.

Es gilt die Gleichung:

$$\sum_{k=1}^m n_k = N.$$

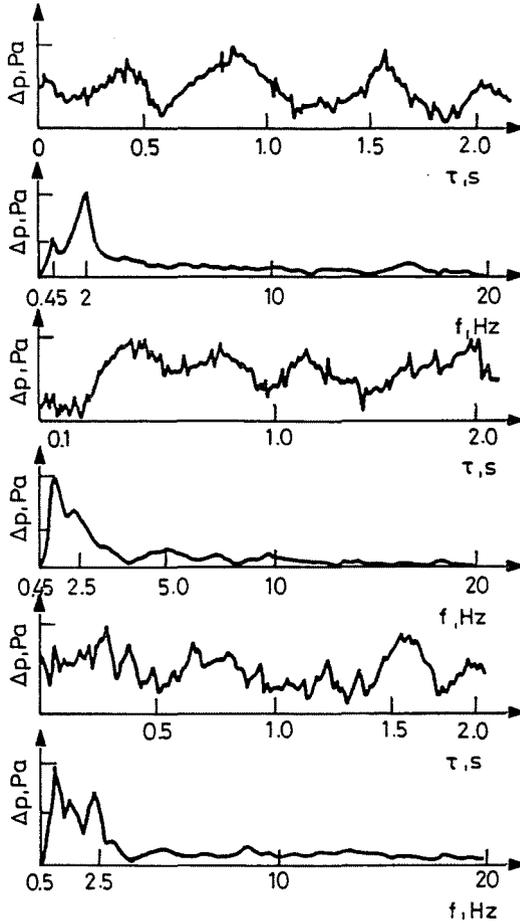


Abb. 3. Zeitfunktion und Amplitudenspektrum der in verschiedenen Zeitpunkten zu dem gleichen Zeitintervall gehörenden Druckschwingungen

Ist der Wert von N sehr hoch, so ist $\frac{n_k}{N}$ konstant, und der Wert kann als die Vorkommenswahrscheinlichkeit p_k betrachtet werden.

Es bedeuten:

$\frac{n_k}{N}$ relative Häufigkeit des p_k -Wertes.

$\frac{n_k}{N} \cdot 100$ prozentuale Häufigkeiten summiert, erhält man die sogenannte prozentuale Summenhäufigkeit:

$$P_{[p]} = \left[\frac{n_1[p_1]}{N} + \frac{n_2[p_2]}{N} + \dots + \frac{n_M[p_M]}{N} \right] \cdot 100\%.$$

Die Amplitudenverteilung der Druckschwingungen wurde von den Verfassern in einer solchen Summenhäufigkeitsfunktion dargestellt. Für wiederholte mechanische Beanspruchungen sind nämlich das maximale Vorkommen der erwartungsmässigen Druckamplituden, bzw. die Vorkommenshäufigkeit der einen gewissen Druckschwingungswert unterschreitenden Druckschwingungen massgebend.

Das wird durch Summenhäufigkeitskurven (Abb. 5) veranschaulicht, die aus bei der Verbrennung von Kohlensorten mit verschiedenen Heizwerten gemessenen Registrierungen ermittelt wurden.

Die Leistungsdichtespektren stimmen mit der relativen Summenhäufigkeitsfunktion, welche die relative Vorkommenshäufigkeit der für dieselben Messzeitintervalle bestimmten, verschiedenen Druckschwingungswerte dargestellt, gut überein.

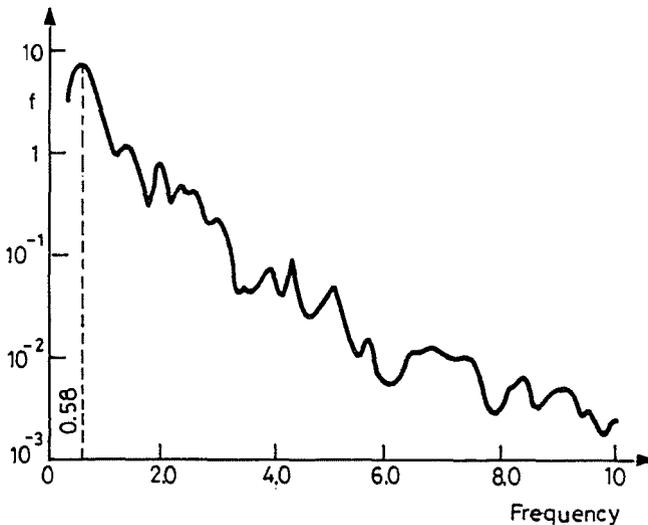


Abb. 4. Leistungsdichtespektrum der Druckschwingung im Feuerraum des Kessels 3 des Wärmekraftwerks "Garagin"

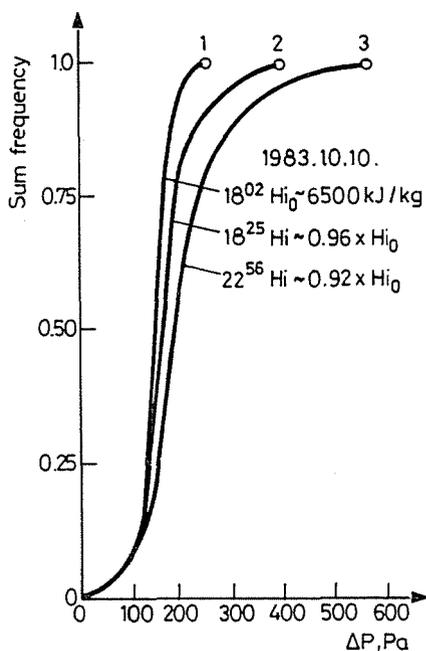


Abb. 5. Verlauf der relativen Summenhäufigkeitsfunktion bei der Verbrennung von Kohlenarten mit verschiedenen Heizwerten

Schlußfolgerungen

In kohlenstaubgefeuerten Kesseln führen Änderungen in den Feuerungsbedingungen zur Verschlechterung der Feuerungsstabilität und dadurch zum Auftreten der sogenannten Feuerraumpulsation.

Die Feuerraumpulsation äussert sich in einer mehr oder weniger periodischen Niederfrequenz-Druckschwankung (0.1–5 Hz) im Feuerraum, durch die eine ebenfalls periodisch wiederholte Biegebeanspruchung der Wärmeübertragungsflächen des Kessels verursacht wird. Diese Beanspruchung führt zum Ermüdungsbruch von Konstruktionsteilen. Aus einer Verschlechterung der Feuerung herrührende, wiederholt auftretende kurze Beanspruchungen (von 10 bis 15 Min. Dauer), sogenannte kurzzyklische wiederholte Beanspruchungen, können zu einem unvorhergesehenen Ausfall des Kessels führen.

Beanspruchungen infolge einer verschlechterten Feuerung können durch Vergrößerung der deterministischen Druckschwankungskomponenten, d.h. der Niederfrequenzkomponenten des Leistungsdichtespektrums,

sowie durch die Steilheitsänderungen der durch den Inflexionspunkt der Summenhäufigkeitsfunktion gezogenen Berührungslinien gut bestimmt werden. Unter Anwendung des beschriebenen Signalanalysenverfahrens lassen sich Grad und Dauer der mechanischen Beanspruchungen ermitteln, die Instandhaltung kann diesen angepaßt geplant, der Gefahr eines unvorhergesehenen Ausfalls vorgebeugt werden.

Für die laufende Überwachung der Feuerungsstabilität wurde von den Verfassern ein Gerät — bestehend aus einem induktiven Druckmesser und einer Signalverarbeitungseinheit — entwickelt. Das Instrument ist für die Analyse stochastischer bzw. stochastisch-deterministischer Signalmischungen geeignet, und zwar über die Bestimmung einer die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion annähernden, empirischen Druckamplituden-Summenhäufigkeitsfunktion.

Das Gerät eignet sich für die messtechnische Bestimmung der Vorkommens der von dem Inbetriebhalter auf empirischem Wege gewonnenen Grenzwerte, ferner für die Beurteilung von während des Betriebs in der Feuerungsstabilität laufend oder in bestimmten Zeitintervallen auftretenden Veränderungen.

Literatur

1. LEITHNER, E. — HERMANN, W. — TRAUTMANN, G.: Rauchgasdruckschwingungen in Dampferzeugern bei Ausfall der Feuerung. *VGB - Kraftwerkstechnik*, 1974, Heft 4, S. 305-316.
2. LEIKERT, K.: Stand und Erkenntnis über Feuerraumschwingungen und Massnahmen zu ihrer Beseitigung. *VGB-Kraftwerkstechnik*, 1976, Heft 5, S. 327-333.
3. SCHNELL, L.: Signal- und Systemmesstechnik, Müszaki Könyvkiadó, 1985. (In ungarischer Sprache).
4. PENNINGER, A.: Ergebnisse der Untersuchungen an dem Kessel 3 des Wärmekraftwerks "Gagarin", Forschungsbericht, Lehrstuhl für kalorische Maschinen, TU Budapest, Budapest, 1984. (In ungarischer Sprache).
5. PENNINGER, A.: Untersuchung der Druckschwingungen im Feuerraum des kohlenstaubbeheizten Kessels 12 des Wärmekraftwerks Ajka, Forschungsbericht, Lehrstuhl für kalorische Maschinen, TU Budapest, Budapest 1985. (In ungarischer Sprache).
6. PENNINGER, A. — KÁRPÁTI, L.: Messverfahren zur Diagnostizierung durch Verbrennung erzeugter Druckschwingungen in kohlenwasserstoffgeheizten Industriekesseln. *Mérés és Automatika* Jg. 31 (1983) Heft 5. (In ungarischer Sprache).

Address:

Dr. Antal PENNINGER
László KÁRPÁTI
Department of Heat Engines
Technical University
H-1521 Budapest, Hungary