

NEUE GRUNDLAGEN ZUR VERBRENNUNGSREGELUNG IN WIRBELSCHICHTFEUERUNGEN

Pál SZENTANNAI

Institut für Energetik
Technische Universität Budapest
H-1111 Budapest, Múegyetem rkp. 3., Ungarn
Tel.: (36 1) 463 2562, Fax: (36 1) 463 3273
E-mail: Szentannai@eta.enrg.bme.hu

Eingegangen: July 7, 1998

Abstract

The combustion control at traditional boilers has been scientifically clarified for several years already, and the results are wide-spread used also in the industrial praxis. In case of the modern fluidized bed combustion appear however a number of new requirements as well as new control possibilities for determining the optimal circumstances. This article gives a study of these possibilities, and gives a proposal for defining the expression 'optimal combustion' for the case of fluidized bed boilers by means of formulating a cost function. For solving the control engineering problem occurred, a method is also presented, which is tested by means of a verified mathematical model developed by the author previously.

Keywords: fluidized bed combustion, combustion control, cost function, extremum control.

1. Einleitung

Ein Dampferzeuger mit Wirbelschichtfeuerung muß mit zahlreichen Regelungen ausgerüstet werden. Die meisten von diesen Regelungen können mit den Methoden gelöst werden, die bei traditionellen Kohlenstaubfeuerungen üblich sind, wie zum Beispiel die Regelungen der Dampftemperaturen und die Druckregelung des Feuerraums usw. Bei Wirbelschichtfeuerungen tauchen daneben auch neuartige Aufgaben auf, und der überwiegende Teil davon ist mit der Verwendung von einfachen Regelkreisen lösbar, wie z.B. die Regelung des SO₂-Gehaltes mittels Massenstromregelung der Kalksteindosierung usw. Die Verbrennungsregelung kann man dagegen als eine völlig neue Aufgabe nennen, denn hier sind sowohl die Regelungsaufgaben, als auch die Eingriffsmöglichkeiten vollkommen neuartig.

Die Aufgabe der Verbrennungsregelung ist bei einer gewünschten Feuerungsleistung die optimale Verbrennung zu erreichen. Dies bedeutet bei traditionellen Feuerungen die aufaddierten Verluste, die durch fühlbare Abwärme und durch Unverbranntes im Abgas entstehen, mittels Einstellung des Luftvolumenstroms minimal zu setzen. Bei Wirbelschichtfeuerungen muß

neben dem Gesamtluftvolumenstrom auch seine Verteilung in Primär- und Sekundärluft bestimmt werden. Dazu entstehen hier auch neuartige Aufgaben, wie z.B. eine niedrige NO_x-Emission und ausreichende Luft für die Fluidisierung zu erreichen.

2. Verbrennungsregelung bei traditionellen Feuerungen

Bei der Bestimmung des optimalen Luftvolumenstroms (bei der aktuellen Feuerungswärmeleistung) sind zwei gegenüberstehende Wünsche zu berücksichtigen: der zuzuführende Luftvolumenstrom muß

1. groß genug sein, um die Verluste durch Unverbranntes im Abgas zu minimieren,
2. klein genug sein, um die Verluste durch fühlbare Abwärme zu minimieren.

Diese zwei Verluste sind nach THIEL (1969) auf *Bild 1* grafisch dargestellt, zusammen mit der resultierenden Kurve, die zu minimieren ist.

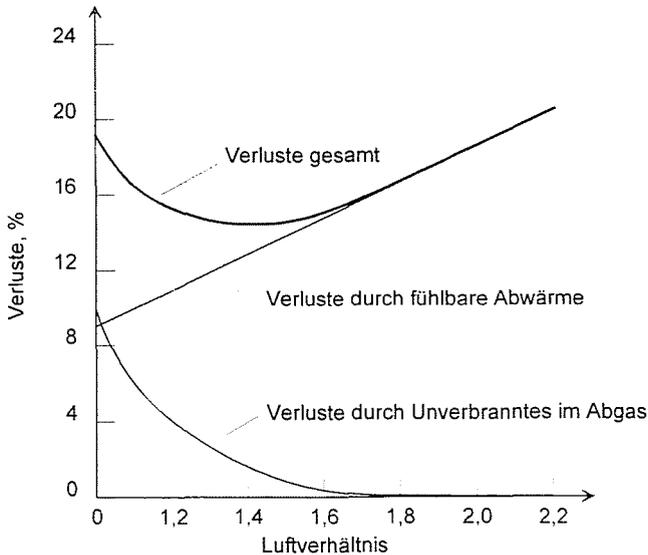


Bild 1. Verluste bei traditionellen Feuerungen bei einer gegebenen Last

Die Aufgabe der Verbrennungsregelung ist also, bei der aktuellen Last das Minimum des obigen Gesamtverlustes (der Kostenfunktion) zu finden und den dazugehörigen Luftvolumenstrom einzustellen.

Das gesuchte optimale Luftverhältnis im Falle von traditionellen Feuerungen kann ausschließlich als Funktion des Brennstoffs und der Last gegeben werden, und kann durch Messung des O₂- und (oder) des CO₂-Gehalts

im Abgas erhalten werden. Es bedeutet also, daß durch Messung von zwei Konzentrationen (oder in praktischen Anwendungen nur einer Konzentration) die optimale Verbrennung erfüllbar ist.

Hier gibt es aber keine Möglichkeit die Schadstoffemission zu beeinflussen, denn sie ist grundsätzlich von der Brennerkonstruktion abhängig, oder kann durch andere Verfahren (z.B. mittels Rauchgasrezirkulation) beeinflusst werden. Die thermische und prompte NO_x-Bildung kann aber keineswegs verhindert werden, da die Flammentemperatur sehr hoch ist.

3. Übliche Methoden der Verbrennungsregelung bei Wirbelschichtfeuerungen

Die Anzahl der Publikationen zum Thema Verbrennungsregelung der Wirbelschichtfeuerungen ist überraschend niedrig: HÄSELHOFF und SÜWER (1987), MEIER-KORTWIG et al. (1987), EDELMANN (1992). Die veröffentlichten industriellen Lösungen operieren fast ausschließlich mit vorgegebenen Kennlinien, die die einzuführenden Luftvolumenströme als Funktion der Last bestimmen, wie es in *Bild 2* vereinfacht dargestellt ist. Eine interessante Lösung mittels höherer Methoden der Steuerungstheorie haben LUNZE und WOLFF (1996) publiziert, die auch ein einfaches empirisches Modell der untersuchten Laboranlage gebildet haben.

Neben dem Prozeß und der Gesichtspunkte der Bestimmung der Kennlinien stehen fast keine Informationen zur Verfügung, die meisten Firmen behalten sogar auch die genauen Angaben der Kennlinien zurück. Bei EDELMANN (1992) sind z.B. nur die Strukturen der Funktionen gegeben.

4. Mathematisches Modell zur Untersuchung der Regelungsaufgabe

Um die obige Regelungsaufgabe wissenschaftlich zu klären, steht ein mathematisches Modell zur Verfügung, das speziell für regelungstechnische Aufgaben entwickelt worden ist. In diesem Modell ist der Feuerraum auf hintereinander geschaltete diskrete Bilanzräume, auf die sogenannten Zellen aufgeteilt, wie es auf *Bild 4* sichtbar ist. (Ganz rechts, horizontal gestrichelte Linien und Numerierung 1 bis 9.) Jeder Bilanzraum wird als idealer Rührkessel behandelt, in dem Stoff- und Temperaturverteilung (mit Ausnahme der Kokspartikeltemperaturen) als homogen angenommen werden. Im Modell werden Bilanzgleichungen formuliert, wie die Energiebilanz, die Stoffbilanzen der Rauchgaskomponenten und die Massenbilanzen des Inertmaterials und des Brennstoffs. Es gibt zahlreiche Teilprozesse, die auch ins Modell eingebaut sind, wie z. B. die Verbrennung der Kohle, chemische Reaktionen, Temperaturänderungen in den Zyklonen, axiale Feststoffverteilung in der Brennkammer,

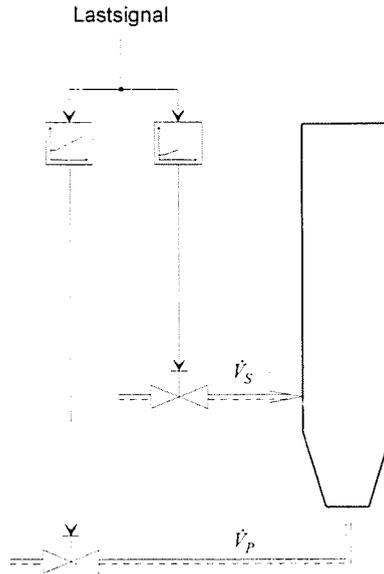


Bild 2. Übliche Verbrennungsregelung bei Wirbelschichtfeuerungen durch vorgegebene Kennlinien der optimalen Primär- und Sekundärluftvolumenströme in Abhängigkeit von der Last

Wärmeübertragung usw.

Hier werden die Einzelheiten des Zellenmodells nicht behandelt (siehe SZENTANNAI, 1997, 1998), wir stellen nur fest, daß es auf der Basis eines industriellen Kessels von $300 \text{ MW}_{\text{th}}$ validiert worden ist. Bild 3 und Bild 4 zeigen die gemessenen und die berechneten Ausgangssignale nach gleichen Änderungen in den Eingangssignalen.

5. Die vorgeschlagene Kostenfunktion

Um eine Aufgabenstellung für die Verbrennungsregelung in Wirbelschichtfeuerungen zu formulieren, muß ganz klar definiert werden, was unter dem Begriff 'optimale Verbrennung' zu verstehen ist. Am einfachsten kann es mittels einer Kostenfunktion (Strafenfunktion) definiert werden, die die gegenüberstehenden Bedingungen numerisch gewichtet (bildet aber in seiner finanziellen Bedeutung keine echten Kosten).

Die von uns vorgeschlagene Form berücksichtigt die folgenden Gesichtspunkte:

1. Es muß im unteren Bereich der Feuerraum ausreichend fluidisiert wer-

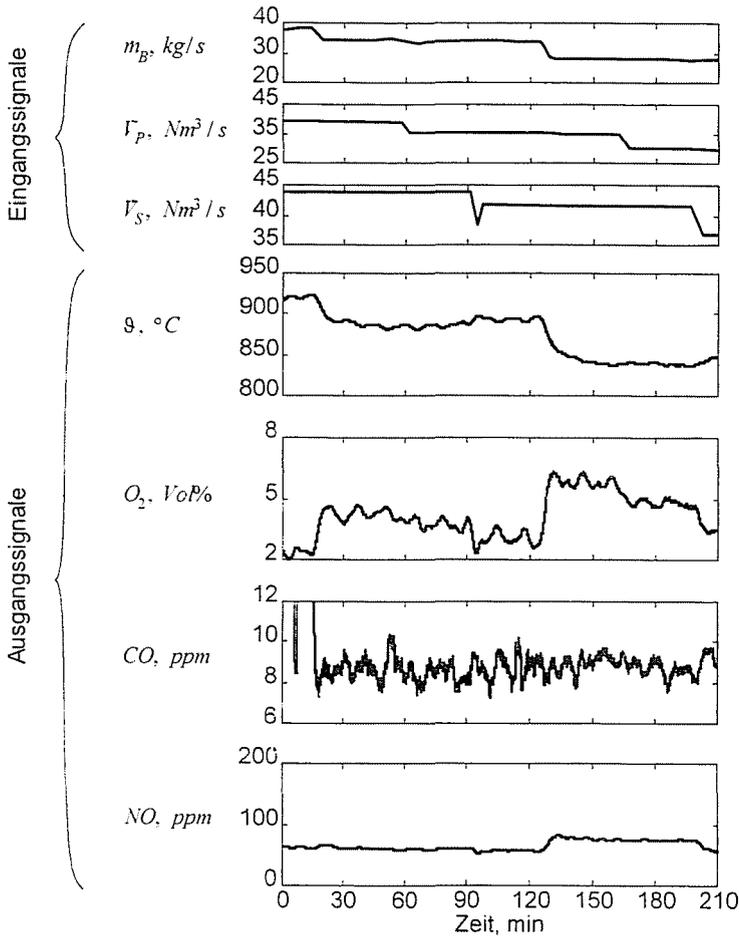


Bild 3. Validierung des Streckenmodells, das für die Entwicklung der Verbrennungsregelung verwendet worden ist. Ergebnisse als Funktionen der Zeit. (durchgezogen: Messung, gestrichelt: Simulation)

den.

2. Es muß im oberen Bereich der Feuerraum ausreichend fluidisiert werden.
3. Die charakteristische Feuerraumtemperatur darf nicht zu hoch sein.
4. Die CO-Emission muß möglichst klein bleiben, bzw. darf eine Grenze nicht überschreiten.
5. Die NO-Emission muß möglichst klein bleiben, bzw. darf eine Grenze nicht überschreiten.

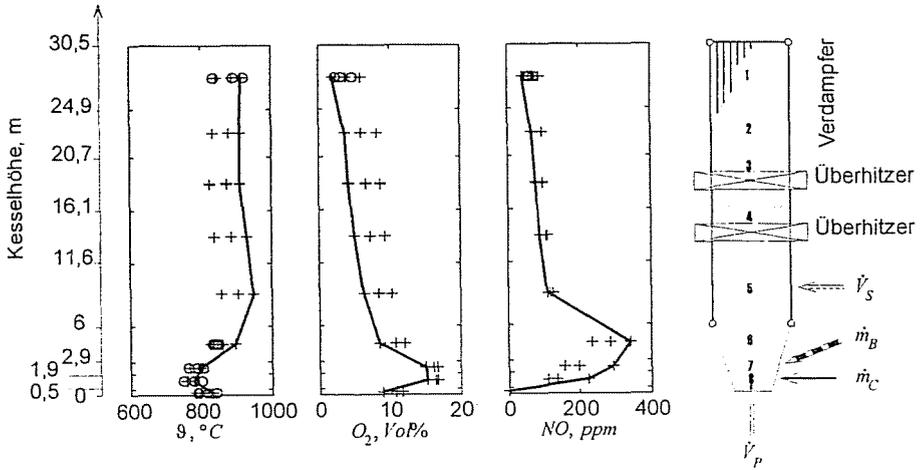


Bild 4. Validierung des Streckenmodells, das für die Entwicklung der Verbrennungsregelung verwendet worden ist. Ergebnisse als Funktionen der Kesselhöhe.

(Kreis: Messung, Kreuz: Simulation;

durchgezogen: $t = 15$ min, gestrichelt: $t = 110$ min, punktiert: $t = 170$ min)

Diese Liste der Bedingungen haben wir in praktischen Fällen für befriedigend gefunden, um den optimalen Arbeitspunkt zu definieren. Eine untere Begrenzung der Feuerraumtemperatur oder obere Begrenzung des Luftvolumenstroms haben wir z. B. für nicht erforderlich gefunden, denn andere Bedingungen der Liste sichern schon zu, daß diese Verfälschungen nicht vorkommen. Die in Bedingung 3 genannte charakteristische Feuerraumtemperatur wird sowohl in praktischen Fällen, als auch in dieser Arbeit oberhalb der Sekundärlufteinführung, also an der Grenze des unteren und des oberen Bereiches gemessen.

Die Liste kann aber natürlich ergänzt werden z.B. den Fall beschreibend, wenn der Brennstoff einen ungewöhnlich hohen Flüchtigenanteil hat, und deshalb einen größeren Primärluftanteil braucht (LINZER, 1998).

Zur mathematischen Formulierung der obigen Bedingungen wird die folgende Form der Kostenfunktion vorgeschlagen:

$$\begin{aligned}
 K &= \exp(a_1 \cdot \dot{V}_P + b_1) \\
 &+ \exp(a_2 \cdot (\dot{V}_P + \dot{V}_S) + b_2) \\
 &+ \exp(a_3 \cdot \vartheta + b_3) \\
 &+ \exp(a_4 \cdot C_{CO} \cdot (\dot{V}_P + \dot{V}_S) + b_4)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$+ \exp \left(a_5 \cdot C_{NO} \cdot (\dot{V}_P + \dot{V}_S) + b_5 \right) .$$

Zur qualitativen Untersuchung dieser Formel sehen wir *Bild 5*, das die Begrenzungsrichtungen der einzelnen Bedingungen in der Fläche der zwei Stellgrößen, Gesamtluftvolumenstrom $\dot{V}_L = \dot{V}_P + \dot{V}_S$ und Verteilung $r = \dot{V}_P / \dot{V}_L$ darstellt.

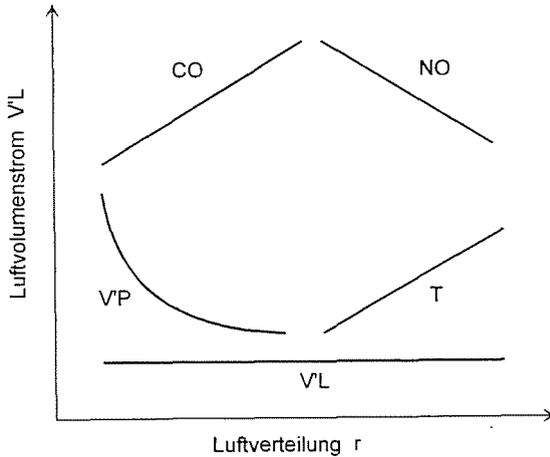


Bild 5. Effekt der einzelnen Komponenten der Kostenfunktion zur Begrenzung des optimalen Arbeitspunktes. *T* spielt bei höheren, dagegen \dot{V}_P und \dot{V}_L bei niedrigeren Lastzuständen eine bedeutende Rolle.

Die vorgeschlagene Kostenfunktion wurde mit Hilfe des Modells untersucht. Es wurden zahlreiche Simulationen bei verschiedenen Lastzuständen durchgeführt, jeweils bei verschiedenen Werten der beiden Stellgrößen. Aus den simulierten statischen Ergebnissen sind die *Bilder 6* und *7* aufgebaut, die die Flächen der einzelnen Kostenkomponenten und auch der gesamten Kostenfunktionen darstellen.

Mit der Verwendung des Modells und der Kostenfunktion können auch die optimalen Einstellungen als Funktionen der Last bestimmt werden. Diese sind auf *Bild 8* zusammen mit einigen Ausgangsgrößen in den optimalen Arbeitspunkten dargestellt.

Hiermit haben wir also ein Verfahren bekommen, das die gesuchten Kennlinien der üblichen Methode liefert (Vergleich mit *Bild 2!*).

Als Validierung der vorgeschlagenen Kostenfunktion und des gewählten Verfahrens wird die Tatsache herangezogen, daß die auf *Bild 8* dargestellten berechneten Kennlinien den publizierten Charakteristiken entsprechen. Ebenso entsprechen den praktischen Kenntnissen die in der zweiten und dritten Reihe dargestellten Ausgangscharakteristiken.

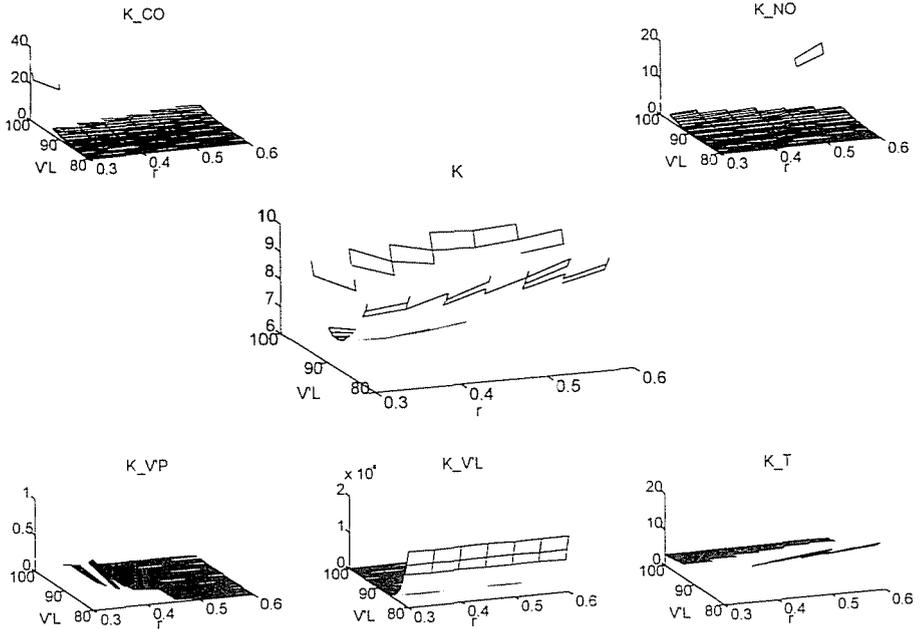


Bild 6. Grafische Darstellung der vorgeschlagenen Kostenfunktion und ihre Komponenten bei einem Brennstoffmassenstrom von 34 kg/s. Die Abbildung entstand nach Simulationsuntersuchungen in zahlreichen $[\dot{V}_L, r]$ Punktpaaren und nach Einsetzen der Ergebnisse in die Kostenfunktion

6. Die regelungstechnische Aufgabe: Extremwertregelung

Es wurde ein Verfahren ausgearbeitet, das bei der üblichen Methode mit der Berechnung der Kennlinien helfen kann. Die nächste Frage lautet, was wir tun können, wenn im Prozeß irgendeine Störungen auftreten, z.B. der Heizwert des Brennstoffs sich ändert, oder wenn andere Parameter des Kessels sich verändern. Diese unmeßbaren Modifizierungen kann kein vorgegebenes Wissen kompensieren, hier muß man eine Regelung verwenden.

Die Aufgabe der Verbrennungsregelung ist also: bei einem vom Lastregler vorgegebenen Brennstoffmassenstrom das $[\dot{V}_L, r]$ -Paar so zu wählen, daß die Kostenfunktion ihr Minimum annimmt. Diese Aufgabe unterscheidet sich von den gewöhnlichen regelungstechnischen Aufgaben darin, daß hier kein vorgegebener Wert (der Sollwert), sondern der unbekannte Minimalwert einer Fläche zu erreichen ist. Diese Fläche ist natürlich für den Regler nicht sichtbar, und sie kann sich durch verschiedene Störungen ändern, die auch grundsätzlich nicht, oder nur selten und begrenzt meßbar sind.

Diese Aufgabe ist in der Literatur natürlich nicht unbekannt, sie wird

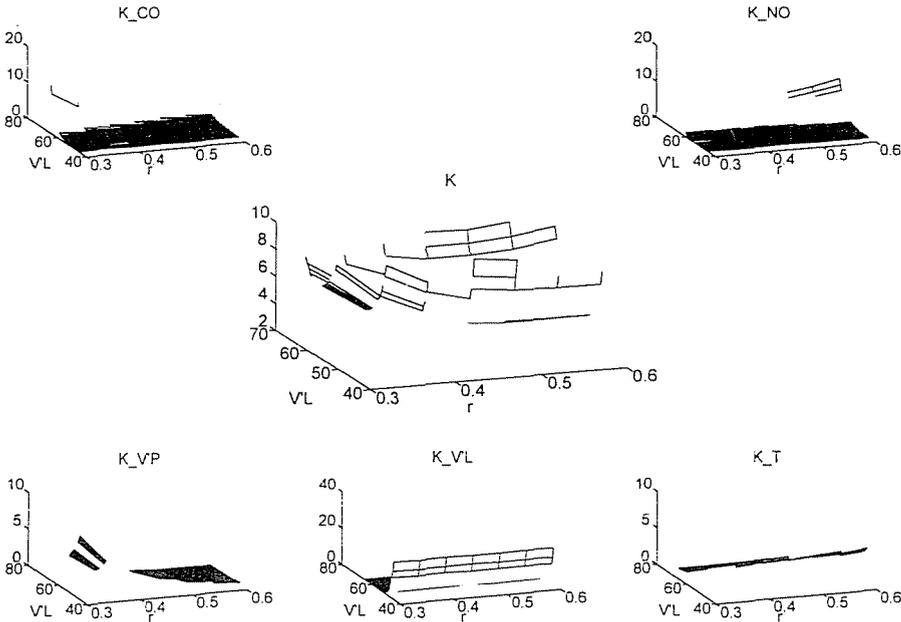


Bild 7. Grafische Darstellung der vorgeschlagenen Kostenfunktion und ihre Komponenten bei einem Brennstoffmassenstrom von 20 kg/s. Die Abbildung entstand nach Simulationsuntersuchungen in zahlreichen $[\dot{V}_L, r]$ Punktpaaren, und nach Einsetzen der Ergebnisse in die Kostenfunktion

Extremwertregelung (auf Englisch: Extremum Control, oder manchmal auch: Optimizing Control) genannt.

Dieser Bereich war sehr populär in den 50-er, 60-er Jahren, HOOKE und VAN NICE (1959) schreiben z.B. über ein Produkt, das gewisse Aufgaben automatisch lösen kann. BLACKMAN (1962) gibt eine bis heute gültige, relevante Zusammenfassung der Methoden statischer Ein- und Mehrvariablen-Systeme.

Die Arbeiten des wiederaufgegriffenen Themas im letzten Jahrzehnt basieren auf der Suche nach einer quadratischen Näherung der zu minimierenden Funktion, wie es WELLSTEAD und SCOTSON (1990) machen. Ihre Ergebnisse können bei Einvariablen-Systemen ohne Dynamik verwendet werden. ZARROP und ROMMENS (1993) erweitern die Methode der quadratischen Schätzung auf Systeme, die mehrere Eingangsvariablen haben, bei denen aber die Dynamik keine oder nur eine vernachlässigbare Rolle spielt. NAVARRO und ZARROP (1995) präsentieren eine Methode, die auch bei Systemen mit bedeutender Dynamik einsetzbar ist. Diese Methode kann aber nur bei Einvariablen-Systemen verwendet werden, wobei Dynamik von größerer Ordnung einen viel größeren rechnerischen Aufwand benötigt.

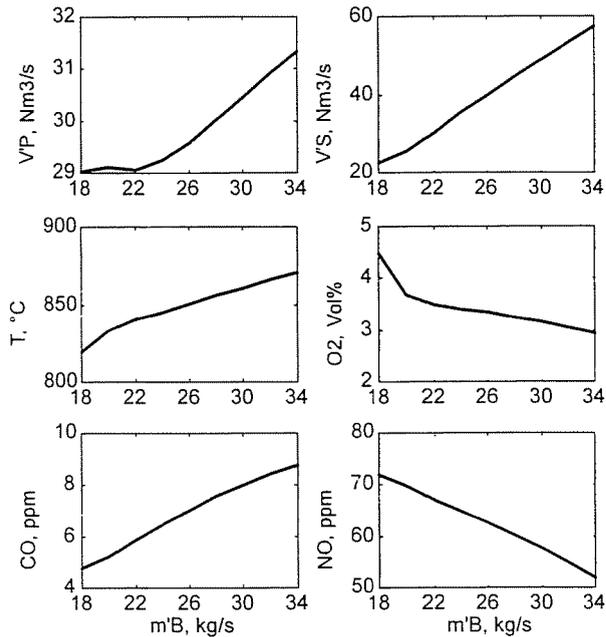


Bild 8. Berechnete Kennlinien zur üblichen Lösung der Verbrennungsregelung (erste Reihe), und einige Ausgangssignale in den optimalen Arbeitspunkten (zweite und dritte Reihen)

Eine Lösung für unsere Aufgabe, für die Extremwertregelung eines zweidimensionalen Systems mit bedeutender Dynamik ist zur Zeit in der Literatur leider nicht zu finden. Deshalb ist eine Lösung für die konkrete Aufgabe mit der Verwendung des vorhandenen Modells entwickelt worden, und diese Lösung wird wie folgt präsentiert.

7. Lösungsvorschlag zur Verbrennungsregelung bei Wirbelschichtfeuerungen

Die vorgeschlagene Struktur ist in *Bild 9* dargestellt. Im mittleren Teil des Bildes sehen wir den Prozeß und die traditionellen Einrichtungen mit den vorgegebenen Kennlinien. Diese Kennlinien können entweder durch gewöhnliche Verfahren im Laufe der Inbetriebnahme bestimmt werden, oder können mit der Verwendung des Modells schnell berechnet werden.

Die Extremwertregelung erfolgt nach unserem Vorschlag durch eine Regelung des Gradienten der Kostenfunktion auf Null.

Zum Schätzen des Gradienten wird eine bekannte Identifikationsmet-

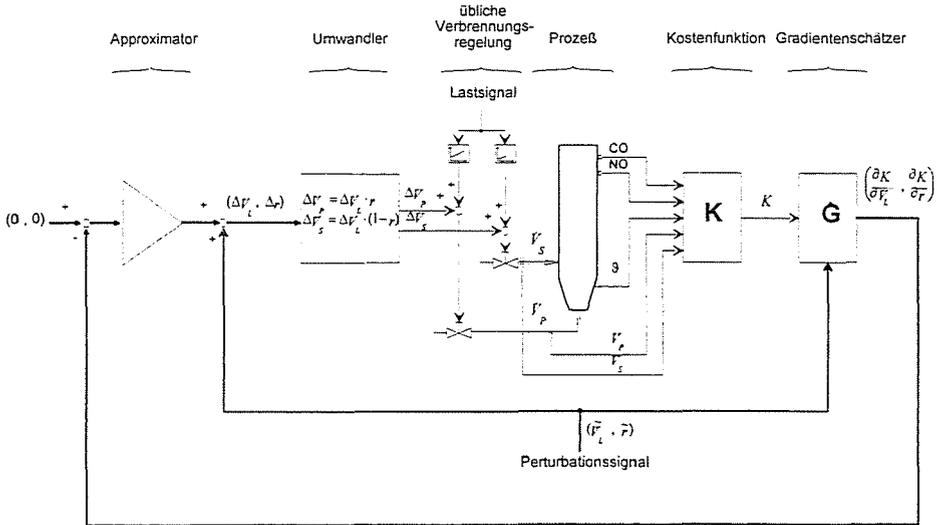


Bild 9. Die vorgeschlagene Struktur der Verbrennungsregelung in Wirbelschichtfeuerungen mittels Extremwertregelung

hode verwendet. Dazu haben wir ein zweidimensionales zeitdiskretes ARX Modell angenommen, das das Modell im Arbeitspunkt linearisiert:

$$A(q) \cdot \Delta y(t) = B_1(q) \cdot \Delta u_1(t) + B_2(q) \cdot \Delta u_2(t) + e(t), \quad (2)$$

wo q der Verschiebungsoperator, $A(q)$, $B_1(q)$ und $B_2(q)$ Polynome sind. Diese Polynome können unter Verwendung der Lösungsverfahren der Theorie geschätzt werden, wenn sowohl die Eingänge (Δu_1 , Δu_2 in der Gleichung (2); $\Delta \dot{V}_L$, Δr im konkreten Fall) als auch die Ausgänge (Δy in der Gleichung (2); ΔK im konkreten Fall) gemessen werden. Die statischen Verstärkungen, d.h. die Komponenten des Gradienten können dann wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{V}_L} = \left. \frac{B_1(q)}{A(q)} \right|_{q=1}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial K}{\partial r} = \left. \frac{B_2(q)}{A(q)} \right|_{q=1}. \quad (4)$$

Beim Bestimmen des Prüfsignals muß man sehr sorgfältig umgehen, denn eine unglückliche Wahl kann zu sehr ungenauen und unsicheren Schätzungen führen – besonders beim Schätzen der Eigenschaften nullter Ordnung. Hier wird nach KORB (1998) ein flaches Sägezahnsignal verwendet, das zu einer zufälligen Binärfolge relativ kleiner Amplitude addiert wird.

Der Approximator, der im *Bild 9* als Verstärker dargestellt ist, könnte auch einen komplizierteren Algorithmus enthalten, der ähnlich wie die numerischen Methoden einen besseren Vorschlag zum Weitersuchen geben könnte. Wir glauben aber, daß die Meßfehler in einer wahren Realisation keinen Vergleich (bzw. Unterschiedsbildung) zwischen den aktuellen und früheren Gradienten erlauben. Die quadratische Näherung der Kostenfunktion empfiehlt jedenfalls eine lineare Entfernungsschätzung, also eine reine Multiplikation des Gradienten.

8. Simulationsuntersuchungen

Die vorgeschlagene Regelungsstruktur wurde in der Simulationsumgebung Matlab-Simulink unter Verwendung der 'System Identifikation Toolbox' realisiert. *Bild 10* stellt verschiedene Trajektorien der Extremwertregelung dar, wenn die vorgegebenen Kennlinien wegen Änderungen in den Systemparametern nicht den optimalen Arbeitspunkt ergeben haben.

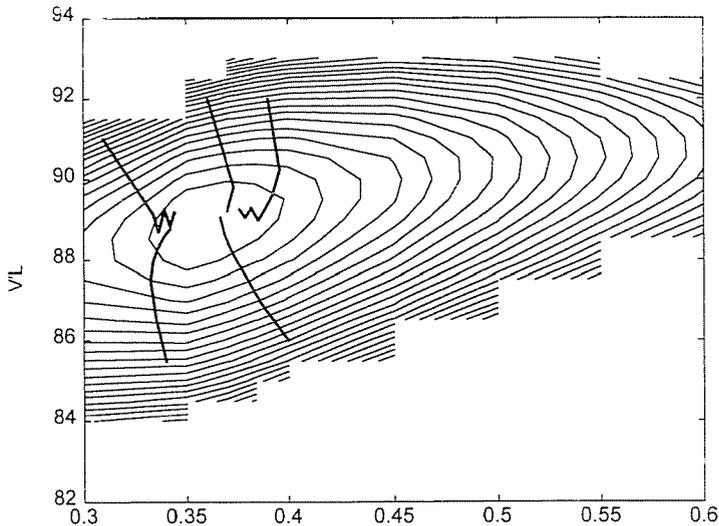


Bild 10. Trajektorien der Extremwertregelung aus verschiedenen Anfangspunkten, die durch die traditionellen Verbrennungsregelungen gegeben sind

9. Zusammenfassung

Die Verwendung einer Kostenfunktion wurde vorgeschlagen um eine klare Aufgabenstellung zur Verbrennungsregelung in Wirbelschichtfeuerungen formulieren zu können. Die konkrete Form dieser Kostenfunktion wurde entwickelt, und die aus Modelluntersuchungen resultierenden Kennlinien entsprechen gut den in der Praxis verwendeten Kennlinien und Ausgangsfunktionen, was die Güte des Vorschlags validiert.

Mit Hilfe der Kostenfunktion und eines mathematischen Modells kann die übliche Lösung der Verbrennungsregelung in Wirbelschichtfeuerungen mittels Lieferung der gesuchten Kennlinien gefunden werden. Für die Ausregelung von unmeßbaren Abweichungen vom Originalzustand wurde eine Regelungsstruktur entwickelt, die durch Simulationen untersucht wurde.

Diese Regelungsstruktur basiert auf der üblichen Lösung. Sie ergibt nur kleine Änderungen der Eingangssignale, die durch den üblichen Regler bestimmt sind. Diese Eigenschaft der vorgeschlagenen Struktur ermöglicht eine sichere Anwendung und Auswertung der Lösung auch in der Praxis, was begrüßenswert wäre.

Formelzeichen

Form 1	Form 2	Einheit	Erklärung
$A(q)$		-	Polynom
$a_1 \dots a_5$		1	Parameter der Gleichung (1)
$B(q)$		-	Polynom
$b_1 \dots b_5$		1	Parameter der Gleichung (1)
C_{CO}	CO	ppm	CO-Konzentration bei dem Kesselaustritt
C_{NO}	NO	ppm	NO-Konzentration bei dem Kesselaustritt
C_{O_2}	O ₂	Vol%	O ₂ -Konzentration bei dem Kesselaustritt
K	K	1	Kosten (Ergebnis der Kostenfunktion)
$K_{\dot{V}_P}$	K_V'P	1	Teilkosten Primärluftvolumenstrom
$K_{\dot{V}_L}$	K_V'L	1	Teilkosten Gesamtluftvolumenstrom
K_{ϑ}	K_T	1	Teilkosten Temperatur
K_{CO}	K_CO	1	Teilkosten CO
K_{NO}	K_NO	1	Teilkosten NO
\dot{m}_B	m'B	kg/s	Brennstoffmassenstrom
q		-	Verschiebungsoperator
r	r	1	Luftverteilung
ϑ	T	°C	Temperatur

u	1	Eingangsgröße
\dot{V}_L	$V'L$	Nm^3/s Gesamtluftvolumenstrom
\dot{V}_P	$V'P$	Nm^3/s Primärluftvolumenstrom
\dot{V}_S	$V'S$	Nm^3/s Sekundärluftvolumenstrom
y	1	Ausgangsgröße

Literatur

- [1] BLACKMAN, P. F.: Extremum-Seeking Regulators, In: An Exposition of Adaptive Control, ed. Westcott, J. H. Oxford, U.K.: Pergamon Press (1962).
- [2] EDELMANN, H.: Modellierung der Dynamik und des Regelverhaltens für einen Dampferzeuger mit zirkulierender Wirbelschichtfeuerung. Dissertation Universität GH Siegen. *Fortschrittsbericht VDI*, Reihe 6, Nr. 275 (1992).
- [3] HÄSELHOFF, H. – SÜWER, W.: Leittechnische Planung und Ausführung. *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 67, Heft 5 (1987) pp. 463–466.
- [4] HOOKE, R. – VAN NICE, R. I.: Optimizing Control by Automatic Experimentation. *ISA Journal*, Vol. 6 (1959) No. 7. pp. 78–79.
- [5] KORB, R.: Persönliche Mitteilung am 18.5.1998 in Wien.
- [6] LINZER, W.: Persönliche Mitteilung am 20.5.1998 in Wien.
- [7] LUNZE, J. – WOLFF, A.: Robuste Regelung einer Wirbelschichtverbrennungsanlage für Klärschlamm. *Automatisierungstechnik*, Bd. 44 (1996) 11. pp. 522–532.
- [8] MEIER-KORTWIG, F. W. – DREHER, I. – WINKLHÖFER, P.: Erste Betriebsergebnisse, Betriebs- und Regelverhalten, Entsorgung. *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 67, Heft 6 (1987) pp. 559–566.
- [9] NAVARRO, L. B. – ZARROP, M. B.: Extremum Control Approach to Stochastic Control. *Proceedings of 3rd European Control Conference*, 1995. pp. 1312–1317.
- [10] SZENTANNAI, P.: Modellierung einer Wirbelschichtfeuerung. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* Vol. 41/2 (1997).
- [11] SZENTANNAI, P.: Energetics for the Environment: Modelling of Fluidized Bed Combustion. *GÉPÉSZET '98. Proceedings of First Conference on Mechanical Engineering*, (1998) pp. 750–754.
- [12] THIEL, H.-J.: Kraftwerksregelungstechnik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1969. p. 281.
- [13] WELLSTEAD, P. E. – SCOTSON, P. G.: Self-Tuning Extremum Control. *IEE Proceedings-D*, Vol. 137 (1990) No. 3. pp. 165–175.
- [14] ZARROP, M. B. – ROMMENS, M. J. J. J.: Convergence of a Multi-Input Adaptive Extremum Controller. *IEE Proceedings-D*, Vol. 140 (1993) No. 2. pp. 65–69.