

# Minimierung der Kesselverschmutzung durch eine intelligente, modellprädiktive Führungsregelung

M. Starke, C. Blens, M. Mlynski, M. Schreiber EUtech Scientific Engineering GmbH

## 1 Einleitung

Wechselnde Brennstoffzusammensetzungen können bei kohlegefeuerten Kraftwerkskesseln zu einer verstärkten Verschmutzung und Ansatzbildung führen. Diese Verschmutzung beeinträchtigt den Kesselbetrieb – zum einen durch eine Verschiebung der Wärmeauskopplung, zum anderen durch eine verringerte Verfügbarkeit. Durch feuerungstechnische Maßnahmen kann der Bildung der schwer zu reinigenden, schlackeförmigen Ansätze präventiv begegnet werden.

Hierzu wird die bestehende Leittechnik, die i.d.R. auf einen statischen Betriebspunkt optimiert ist, um eine dynamische Führungsregelung erweitert. Die Führungsregelung optimiert die extern vorgegebenden Sollwerte im Hinblick auf verschmutzungsrelevante Zielgrößen - vornehmlich das lokale Brennstoff-Luft Verhältnis und die Temperatur am Feuerraumende. Dies geschieht unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte sowie vorgegebener betrieblicher Randbedingungen (z.B. Mühlintemperaturen). Diese Art der „intelligenten“ Verbrennungsführung vermeidet über die kontinuierliche Anpassung der Kohle-Luft-Aufteilung gezielt Betriebszustände, die zu verstärkter Ansatzbildung führen. Erste Tests an einem mit Braunkohle befeuerten 630 MW<sub>el</sub> Großkessel zeigen erfolgversprechende Ergebnisse.

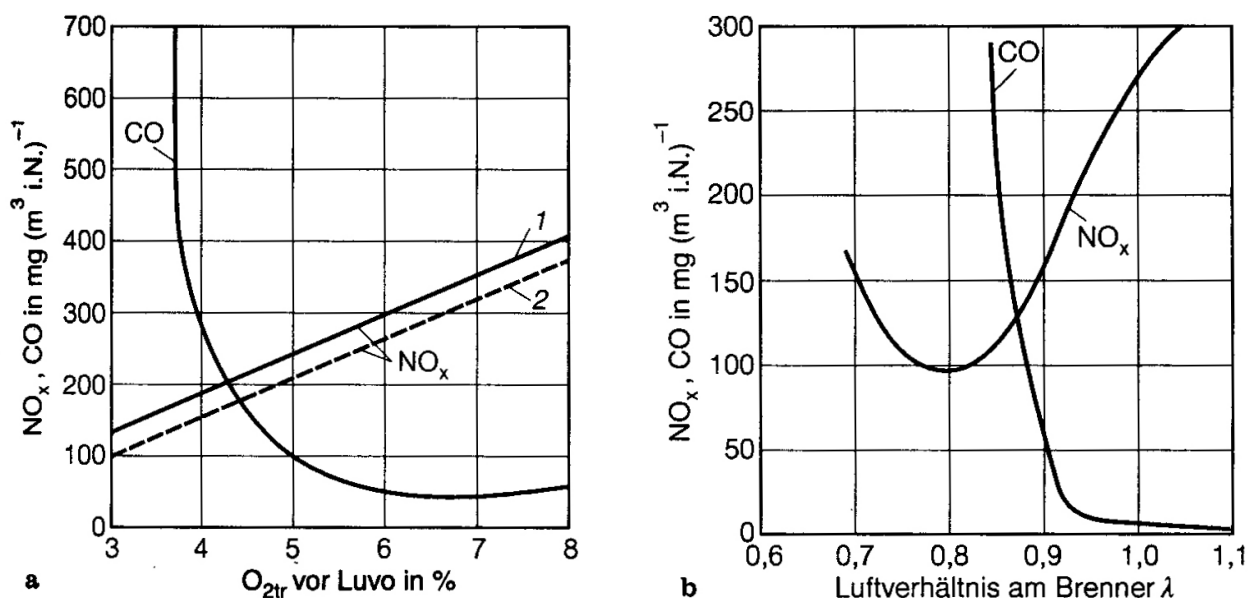
## 2 Hintergrund und Zielsetzung

Die Verschmutzung der Kesselheizflächen, vor allem des Feuerraums und der unmittelbar an den Feuerraum angrenzenden Überhitzer, wird in starkem Maße von der Qualität (Heizwert und Zusammensetzung) der verfeuerten Kohle sowie dem momentan vorliegenden Betriebszustand des Kessels bestimmt. Durch die Ansatzbildung wird die Effizienz des Prozesses deutlich beeinträchtigt, und in Extremfällen muss eine erzwungene Abschaltung erfolgen.

Eine allgemeingültige, verschmutzungsoptimierte Fahrweise existiert aufgrund der mehrdimensionalen und nichtlinearen Wirkzusammenhänge nicht. Insofern muss das zu wählende Optimierungsverfahren adaptiv ausgelegt werden. Im ausgewählten modellprädiktiven Konzept werden daher laufend Prozessmodelle erstellt, die das Kesselverhalten hin-

reichend genau im aktuell vorliegenden „Arbeitspunkt“ beschreiben. Diese Prozessmodelle bilden die Grundlage für die Optimierung.

Erste Untersuchungen haben ergeben, dass die vom Kesseldiagnosesystem bilanziell berechneten Heizflächeneffektivitäten kein geeignetes Maß für die Verschmutzung darstellen. Dies liegt zum einen an dem implizit einfließenden (unbekannten) Heizwert der Kohle, zum anderen an dem schlechten Signal-/Rauschverhältnis und der nach Filterung nicht mehr ausreichenden zeitlichen Auflösung. Daher müssen sekundäre (indirekte) Zielgrößen definiert werden, die sich zuverlässiger ermitteln lassen. Verschiedene Langzeituntersuchungen belegen, dass eine Erhöhung des  $O_2$  Überschusses vor Luvo sowie eine Erhöhung des lokalen Luftverhältnisses in Brennernähe der Ansatzbildung entgegenwirkt. Beide Maßnahmen führen zu einer Erhöhung der  $NO_x$  Emissionen, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.



**Abbildung 1:** Verlauf der  $NO_x$  und CO Emissionen als Funktion des Luftüberschusses [1]

Somit können die  $NO_x$  Emissionen indirekt als Maß für die gewünschte, erhöhte Sauerstoffeinbringung gewertet werden. Erhöhte  $NO_x$  Konzentrationen sind ein Indiz für eine intensivere und schnellere Verbrennung, da der relative Sauerstoffüberschuss die für die Brennstoff-NO Bildung erforderlichen HCN/NH Verbindungen oxidiert.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass niedrigere Temperaturen am Feuerraumende verhindern, dass der Schmelzpunkt überschritten wird und sich Ansätze bilden können. Die Temperatur am Feuerraumende wird zuverlässig über ein Quotientenpyrometer erfasst.

Mangels einer unmittelbaren Messgröße für die Verschmutzung werden daher zwei (mittelbare) Zielgrößen, nämlich die Temperatur am Feuerraumende  $T_{BK}$  sowie die  $NO_x$ -

Konzentration herangezogen, da beide Größen einen signifikanten Einfluss auf die Ansatzbildung haben. Ein verbesserter Ausbrand reduziert zusammen mit einer reduzierten Temperatur die Gefahr, dass die Asche an den Überhitzerrohren versintert oder gar schmilzt.

Dabei ist zu beachten, dass durchaus Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen bestehen: So führt eine Verringerung der Temperatur am Feuerraumende  $T_{BK}$  ceteris paribus zu einer  $NO_x$  Reduktion. Verringert man jedoch  $T_{BK}$  und *erhöht gleichzeitig*  $NO_x$  kann dies nur über den gewünschten, verbesserten Ausbrand (erhöhte Einbringung von  $O_2$  im Flammenbereich) geschehen.

Es handelt sich somit um eine multikriterielle Optimierungsaufgabe. Dabei müssen zu jedem Zeitpunkt die Emissionsgrenzwerte ( $CO$ ) zuverlässig eingehalten werden. Weitere betriebswichtige Randbedingungen (Mühlentemperaturen und -drehzahlen, Luftpressung etc.) sind zu berücksichtigen.

### 3 Konzept

Das System besteht aus einem handelsüblichen PC und greift über eine flexibel anpassbare Datenbankschnittstelle online auf aktuelle Betriebsdaten zu. Im Kern setzt es sich aus einem Prozessmodell und einem Optimierer zusammen. Das Prozessmodell ist adaptiv und wird kontinuierlich aktualisiert. Dadurch passt es sich fortlaufend an die sich ändernden Betriebsbedingungen an (Mühlenwechsel, Veränderungen der Kohlequalität). Der Optimierer ermittelt anhand des Prozessmodells die optimalen Betriebseinstellungen für den Kessel.

Um ein robustes und zuverlässiges Verhalten gewährleisten zu können, werden fortlaufend Ensembles von Prozessmodellen berechnet, die sich hinsichtlich des zugrunde liegenden Datenzeitraums, der Anzahl der Eingangsgrößen sowie des Modelltyps unterscheiden. Die Modellgüte wird anschließend anhand verschiedener Kriterien bewertet. Nur Modelle mit einer hohen Prognosegüte werden berücksichtigt. Für alle Zielgrößen werden jeweils eigene Prozessmodelle erstellt.

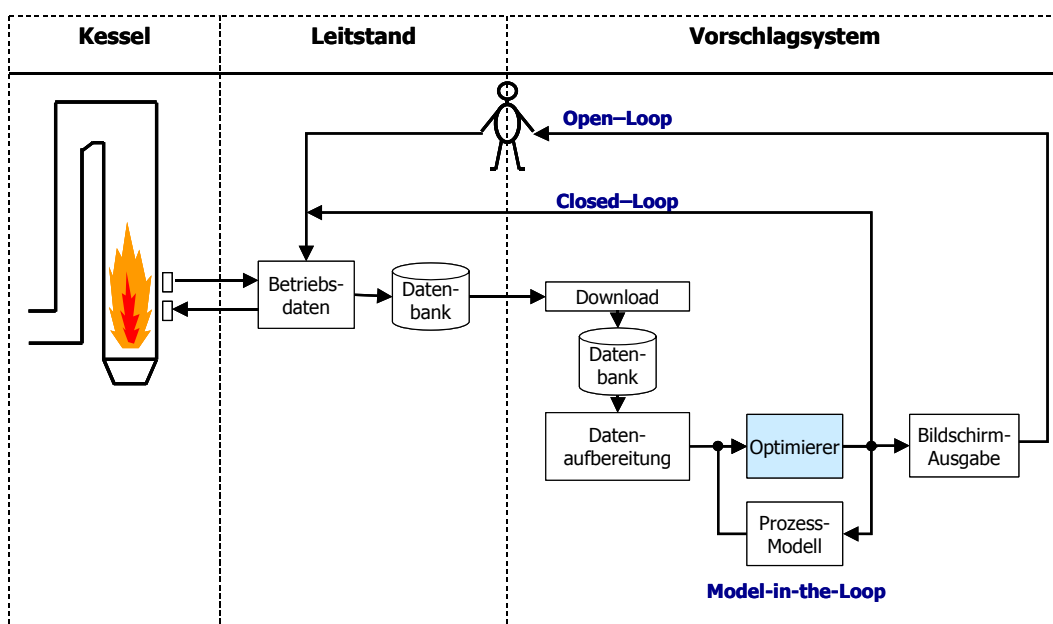
Die Strategie basiert auf einer multikriteriellen Optimierung der verschiedenen Zielgrößen unter Berücksichtigung zustandsabhängiger Gewichtungen. Dazu werden verschiedene Prozessmodelle vom Optimierer parallel verwendet und daraus optimale Einstellungen für die Stellgrößen ermittelt.

Der Erfolg der umgesetzten Empfehlungen wird an Hand des zeitlichen Verlaufs der  $NO_x$ -Konzentration, der Feuerraumendtemperatur  $T_{BK}$  sowie der  $CO$ -Konzentration bewertet.

## 4 Systembeschreibung und Versuche

Die Prozessdaten werden im Rohformat aus einer Datenbank bzw. der Leittechnik ausgelesen und einer Datenaufbereitung unterzogen. Dabei finden verschiedene Verfahren zur Filterung, Glättung, Ausreißerbehandlung und Ersatzwertbildung Einsatz.

Als Ergebnis der Optimierung wird ein Stellvorschlag generiert, der die im jeweiligen Betriebspunkt optimale Einstellung der Brennstoff-Luft-Verteilung darstellt. Der Vorschlag wird im Open-Loop Fahrbetrieb manuell vom Leitstandpersonal umgesetzt, dabei erfolgt eine periodische Ergebnisausgabe. Im später geplanten „Closed-Loop“-Fahrbetrieb werden die Vorschläge direkt in die Leittechnik zurückgespeist, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 2:** Aufbau und Anbindung des Vorschlagsystems

Im Januar und Februar 2005 erfolgten eingehende Tests des modellprädiktiven Reglers. Dazu wurden in regelmäßigen Zeitintervallen (ca. 15 min) Stellvorschläge ermittelt, die vom Leitstandpersonal manuell umgesetzt wurden. Die  $\text{NO}_x$ -Konzentration wurde innerhalb des zulässigen Bereichs angehoben, und die Feuerraumendtemperatur verringert. Die CO-Emissionen wurden substantiell reduziert. Dies deutet auf einen optimierten Verbrennungsablauf hin, der zu geringerer Verschmutzung führen sollte. Um eine zuverlässige und statistisch abgesicherte Bewertung des Verschmutzungsverhaltens durchführen zu können, werden Langzeitversuche durchgeführt, die sich über mehrere Wochen erstrecken.

Die Versuche zeigten ferner, dass die manuelle Regelung in relativ langen, diskreten Zeitintervallen kurzfristige Betriebsstörungen z.B. in Folge von Lastschwankungen nur be-

grenzt kompensieren kann. Insofern muss genügend „Reserve“ zu den unbedingt einzuhaltenden Randbedingungen belassen werden. Eine weitere Optimierung unter Ausnutzung dieser Reserve ist nur im „Closed-Loop“ Fahrbetrieb möglich.

## 5 Resümee

Die Funktionalität des Konzeptes konnte anhand einer Demonstrationsanwendung mit zahlreichen Tests belegt werden. Dabei wurden im „Open-Loop“-Modus gute Ergebnisse erzielt und die gesetzten Optimierungsziele erreicht, ohne dass die NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzen überschritten wurden. Die CO Emissionen wurden reduziert, während die mittlere Temperatur am Brennkammerende abgesenkt werden konnte. Die Auswirkung auf das langfristige Verschmutzungsverhalten des Kessels wird in einem mehrwöchigen Dauertest im Herbst dieses Jahres geprüft. Der Einsatz im „Closed-Loop“-Modus lässt zusätzliche Verbesserungen erwarten.

[1] Effenberger, Helmut: Dampferzeugung, S. 145 ff, Berlin, Heidelberg, New York, 2000