

# **Modellprädiktive Führungsregelung zur Verschmutzungs- minderung - Konzept und Betriebserfahrung**

## **Model predictive control for the reduction of boiler fouling- concept and operational experience**

**Dipl.-Ing. M. Starke**, Dipl.-Inf. C. Blens, Dr.-Ing. A. Sadatsakkak, Dr.-Ing. Michael Schreiber, EUTech Scientific Engineering GmbH, Aachen  
Dipl.-Ing. A. Mittelstädt, Dr.-Ing. W. Derichs, RWE Power AG,  
Niederaußem

### **1. Kurzfassung**

Der durch den Einsatz neuer Kohlesorten bedingten verstärkten Verschmutzung von Kraftwerkskesseln soll durch feuerungstechnische Maßnahmen frühzeitig entgegengewirkt werden. Die daraus resultierenden erweiterten regelungstechnischen Aufgabenstellungen werden durch eine externe Führungsregelung, die auf die bestehende Leittechnik aufsetzt, realisiert. Diese „intelligente“ Verbrennungsführung vermeidet gezielt Betriebszustände mit verstärkter Ansatzbildung und überwacht die Einhaltung wichtiger Emissionsgrenzwerte sowie Betriebsparameter. Das neue Konzept wurde bereits erfolgreich getestet.

### **Abstract**

Changing coal quality may lead to increased boiler fouling and must be countered by an optimized adjustment of the combustion parameters. This is a challenging control and optimization task, that can be tackled using modern engineering tools. An external, “add-on” pilot control upgrades the existing control system. This “intelligent” combustion control avoids operating conditions with increased boiler fouling and furthermore controls important emission parameters and operating conditions. The strategy and operation of the combustion optimizer are explained based on extensive tests.

## **2. Hintergrund und Zielsetzung**

Eine Zunahme der Ansatzbildung ist im Kraftwerk Niederaußem der RWE Power AG aufgrund des Einsatzes neuer Braunkohlevorkommen festzustellen. Der effiziente Kesselbetrieb kann dadurch merklich beeinträchtigt werden. Die Wirkzusammenhänge der Ansatzbildung sind mehrdimensional und stark nichtlinear. Daher gibt es keine allgemeingültige optimierte Fahrweise, vielmehr ist die optimale Fahrweise in starkem Maße vom momentanen Anlagenzustand bestimmt. In vorausgegangenen Studien konnte dargelegt werden, dass sich modellprädiktive Regelungsansätze sehr gut eignen, um Handlungsempfehlungen für eine optimierte Betriebsweise des Kessels abzuleiten.

Ein modellprädiktives Vorschlagssystem zur Verminderung der Ansatzbildung wurde daher im Frühjahr 2004 auf dem Leitstand des 600 MW Kessels G im Kraftwerk Niederaußem installiert und nachfolgend intensiv getestet. Mit Hilfe dieses Systems werden Handlungsempfehlungen für eine optimierte Fahrweise des Kessels ermittelt, die das Leitstandpersonal bei der Betriebsführung unterstützen. Die Verbrennungsführung wird durch das System über die Anpassung der Luft und Kohleaufteilung dahingehend optimiert, dass die Ansatzbildung reduziert und die Kesselverfügbarkeit erhöht wird. Betriebswichtige Randbedingungen werden dabei berücksichtigt, und es erfolgt eine schnelle, adaptive Anpassung an veränderte Kohlezusammensetzungen und Mühlenkombinationen. Das System besteht aus einem handelsüblichen PC und greift über eine speziell angepasste Datenbankschnittstelle online auf aktuelle Betriebsdaten der bestehenden Leittechnik sowie erweiterte Messdaten zu. Eine Integration in die bestehende Leittechnik und eine vollständige Automatisierung ist möglich und für die Zukunft geplant.

## **3. Konzept der modellprädiktiven Regelung**

Der Kessel G des Kraftwerks Niederaußem verfügt über eine sogenannte gestufte Verbrennung. Die Verbrennungsluft wird verteilt in verschiedenen Höhen in den Kessel eingeblasen. Im unteren Bereich wird die Rostluft eingeblasen. Die Primärluft dient als Trägerluft für den Kohlestaub. Die Sekundärluft wird direkt an den Kohlebrennern zugeführt. Die verbleibende Luft wird als Tertiärluft in zwei höher gelegenen Bereichen der Brennkammer zugeführt. Die gestufte Luftzuführung bewirkt eine „gestreckte“ Verbrennung bei reduzierten Temperaturen und führt damit zu reduzierten NO<sub>x</sub>-Emissionen. Der Kessel wurde erst nachträglich auf die gestufte Verbrennung umgestellt, so dass dieser Mechanismus aufgrund der geringen Bauhöhe der Brennkammer und der verringerten

Verbrennungsgeschwindigkeit zu einer verstärkten Ansatzbildung an den Überhitzer-Heizflächen führt.

Die RWE Power AG hat daher in verschiedenen Versuchsreihen das Brennstoff-Luftverhältniss der Brennerebene angehoben, ohne dass die zulässigen Emissionsgrenzen verletzt werden. Diese als Lambda-Fahrweise bezeichneten Einstellungen erweisen sich als vorteilhaft bezüglich der Ansatzbildung, erforderten jedoch zugleich einen erhöhten Regelungsaufwand, der mit der bestehenden Leittechnik nicht ausreichend gewährleistet werden kann. Insbesondere die Einhaltung der NO<sub>x</sub>-Emissionen erfordert ein kontinuierliches Nachregeln. Weiterhin hängt die optimale Luftaufteilung stark von Betriebsbedingungen und hier insbesondere der Kohlequalität ab, wobei kurzfristige Lastschwankungen als Störgrößen einwirken.

Die modellprädiktive Regelung besteht daher aus zwei Komponenten: einem Prozessmodell des Kessels und einem Optimierer. Das Prozessmodell ist adaptiv und wird kontinuierlich an die sich ändernden Prozessbedingungen angepasst. Der Optimierer ermittelt aus dem Prozessmodell die jeweils günstigste Stellgrößenkombination. Dabei werden verschiedene verschmutzungsrelevante Zielgrößen und betriebstechnische Randbedingungen betrachtet. Zielgrößen für die Optimierung sind die NO<sub>x</sub>-Emissionswerte und die Temperatur am Brennkammerende, da beide einen starken Einfluss auf die Ansatzbildung haben. Die NO<sub>x</sub>-Emission korreliert gut mit dem O<sub>2</sub>-Überschuss in der Brennerebene und ist somit ein Indiz für eine intensivere und schnellere Verbrennung. Ein verbesserter Ausbrand reduziert die Gefahr, dass die Asche an den Überhitzerrohren versintert oder gar schmilzt. Zusätzlich geht die Randbedingung CO-Emission mit in die Optimierung ein, da dieser Wert unter bestimmten Betriebsbedingungen schwierig zu kontrollieren ist. Als betriebsrelevante Randbedingungen werden die Luftpressungen, Mühlentemperaturen und -drehzahlen überwacht. Ziel der multikriteriellen Optimierung ist es, den O<sub>2</sub>-Überschuss auf der Brennerebene anzuheben ohne die NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzen zu verletzen. Gleichzeitig erfolgt eine Minimierung der Temperatur am Brennkammerende.

Aus den aktuellen Betriebsdaten werden kontinuierlich mehrere parallel Prozessmodelle erstellt sowie deren Güte bewertet. Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich des zugrundeliegenden Datenzeitraums, der Anzahl der Eingangsgrößen sowie des verwendeten Modelltyps. Die Modelle mit einer guten „in sample“ Prognosegüte finden als Prozessmodell Eingang in die modellprädiktive Regelung. Dies erlaubt bei schnellen Betriebsänderungen

wie beispielsweise Mühlenwechseln oder veränderter Kohlequalität eine umgehende Berücksichtigung. Die Güte der Prozessmodelle wird laufend kontrolliert und erfasst. Für alle Zielgrößen werden jeweils eigene Prozessmodelle erstellt.

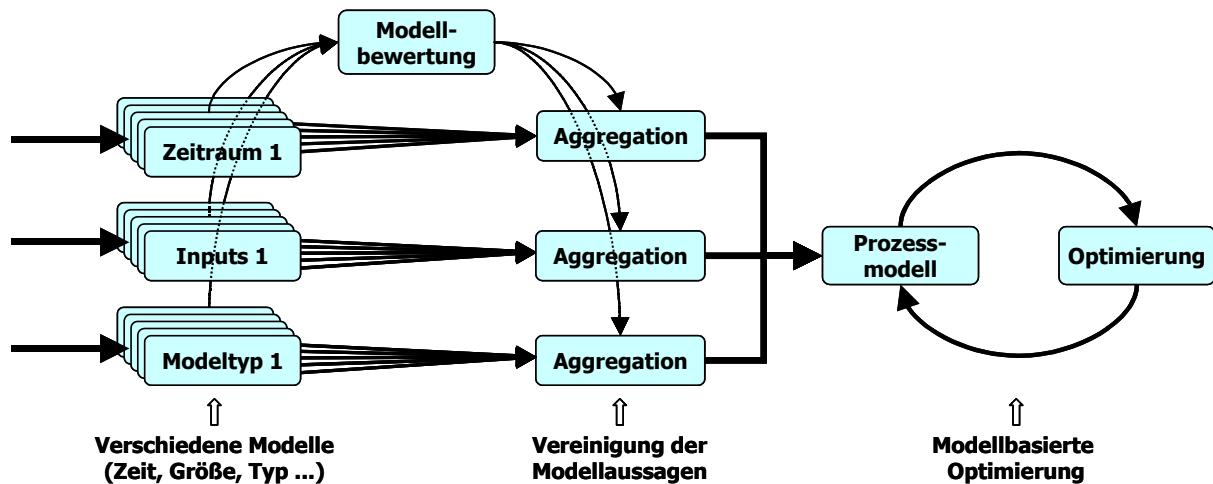


Abbildung 1: Prozessmodelle und Optimierungszyklus (schematisch)

Die Regelstrategie basiert auf einer multikriteriellen Optimierung der drei Zielgrößen (NO<sub>x</sub>-Emission, Temperatur am Brennkammerende sowie CO-Emission). Dazu werden die drei Prozessmodelle vom Optimierer parallel bewertet und daraus optimale Einstellungen für die Stellgrößen ermittelt. Die Zielgrößen können dabei verschieden gewichtet werden. Die Einstellungen werden vom Optimierer so gewählt, dass Zielgrößen mit einer hohen Gewichtung bevorzugt werden. Die Anpassung der Gewichtungen erfolgt automatisch und richtet sich nach dem Grad der Zielerreichung. Der Erfolg der umgesetzten Empfehlungen wird an Hand des zeitlichen Verlaufs der drei Zielgrößen NO<sub>x</sub>-Emission, CO-Emission und Temperatur der Brennkammer bewertet.

#### 4. Systembeschreibung

Als Prozessrechner findet ein handelsüblicher PC Anwendung, der kontinuierlich die aktuellen Prozessdaten über das Datennetzwerk im Kraftwerk abrufen. Neben den Daten aus der Leittechnik und aus dem Diagnosesystemen finden die Daten aus zusätzlich installierten Luftmengenmessungen und Temperaturnetzmessungen Eingang. Die verwendete Software „EUcontrol – boiler“ setzt sich aus einem Optimierungsmodul sowie kundenspezifischen Anpassungen zusammen.

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

Die Aufbereitungsverfahren können beliebig kombiniert auf die Signale angewendet werden. Als Ergebnis der Optimierung wird ein Stellvorschlag generiert, der die im jeweiligen Betriebspunkt optimale Einstellung der Luft-Brennstoffverteilung darstellt. Der Vorschlag wird im Open-Loop Fahrbetrieb 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.

Die Ausgabe der Stellvorschläge am Computermonitor ist in der Abbildung 3 schematisch dargestellt. Neben den Vorschlägen wird der aktuell eingestellte Wert sowie der obere und untere Grenzwert angezeigt. Im dargestellten Beispiel soll z.B. die Primärluftmenge reduziert sowie die Mühlentemperatur über die Anpassung der Zuteilerdrehzahlen (ZT) der Kohlemühlen 1 und 4 reguliert werden. Als Ergebnis wird eine Verringerung der mittleren Temperatur des Feuerraums erwartet.

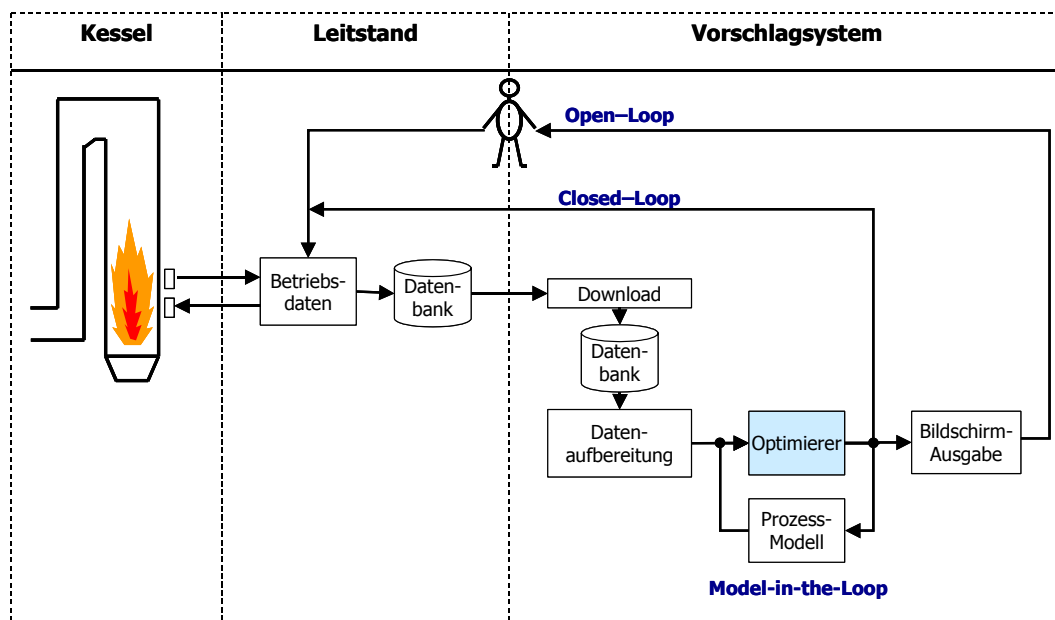


Abbildung 2: „Open-Loop“ und „Closed-Loop“ Fahrbetrieb

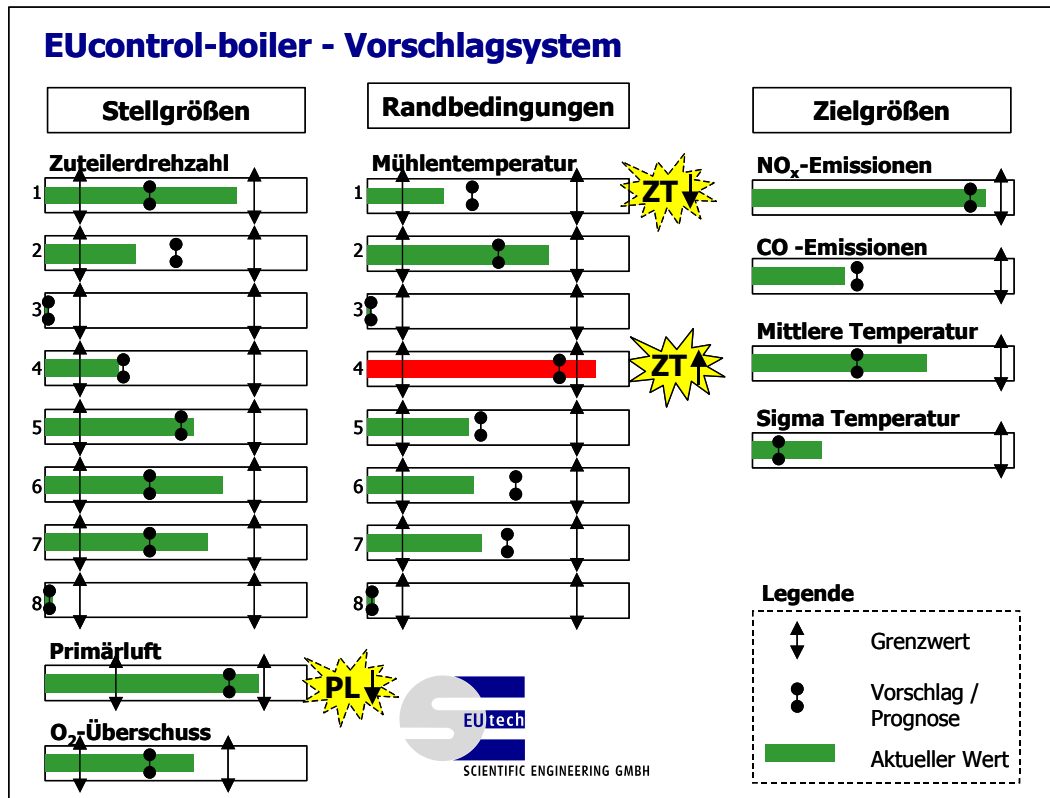


Abbildung 3: Aufbau der Bildschirm-Anzeige des Vorschlagsystems (schematisch)

## 5. Versuchsergebnisse

Im Januar und Februar 2005 erfolgten eingehende Tests des modelprädiktiven Reglers „EUcontrol – boiler“ an einem 600 MW Kessel der RWE Power AG. Alle 15 Minuten wurden dazu neue Stellvorschläge vom System ermittelt, die mit kurzer Verzögerung vom Leitstandpersonal umgesetzt wurden. In den folgenden Abbildungen werden beispielhaft einige Ergebnisse dieser Tests dargestellt. Die senkrechten nummerierten Linien kennzeichnen diejenigen Zeitpunkte, an denen Stellvorschläge umgesetzt wurden.

In Abbildung 4 sind der Momentanwert und der Halbstundenmittelwert der Zielgrößen  $\text{NO}_x$ - und CO dargestellt. Der Trend während der Versuche wird durch die Pfeile wiedergegeben. Mit der Umsetzung der Stellvorschläge erhöhten sich die  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Mittel leicht. Der emissionsrechtlich relevante Halbstundenmittelwert lag unter dem zulässigen Grenzwert von  $200 \text{ mg/Nm}^3$ . Die CO-Emissionen weisen vergleichen mit  $\text{NO}_x$  eine deutlich höhere Dynamik auf. Sie konnten im Versuchszeitraum substantiell reduziert werden.

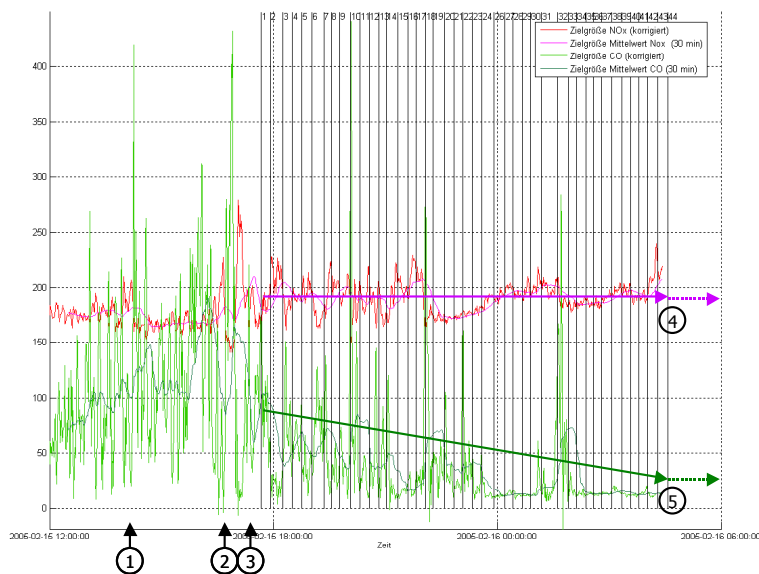


Abbildung 4: Zielgrößen NO<sub>x</sub>- und CO-Emissionen

Die elektrische Blockleistung schwankt im Versuchszeitraum um bis zu 30 MW. Dabei sind die sehr kurzfristigen Schwankungen auf den Frequenzregelbetrieb zurückzuführen, mit dem Lastschwankungen im elektrischen Netz kompensiert werden. Mit der kurzfristigen Anpassung der Brennstoffzuteilung geht jeweils eine deutliche Verschiebung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses im Kessel einher. Dies ist eine Hauptursache für die deutlichen Schwankungen der NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Die Zielgröße Temperatur am Brennkammerende und die von „Störgrößen“ überlagerte elektrische Blockleistung sind stark korreliert. Die Temperatur konnte durch die Optimierung auch bei ansteigender Blockleistung verringert werden.

Während der Tests wurde im wesentlichen auf die Luftverteilung im Kessel Einfluss genommen. Die Kohleverteilung zwischen den Mühlen wurde vor den Versuchen eingestellt und während der Versuche nur geringfügig angepasst. Der O<sub>2</sub>-Überschuß wurde während der Versuche erhöht. Parallel dazu wurde die Ausbrandluft so geändert, dass verstärkt Luft in den unteren Bereich des Kessels zugeführt wurde, wodurch die Verbrennung weiter nach unten verlagert wurde.

In regelmäßigen Abständen erfolgt eine Anpassung der Primärluft- und Sekundärluftklappen, wodurch die Luftverteilung und die Luftpressung direkt an den Kohlebrennern beeinflusst wird. Die Primärluftklappen wurden während der Versuche im Mittel leicht geschlossen und die Sekundärluftklappen leicht geöffnet, vgl. Abbildung 6.

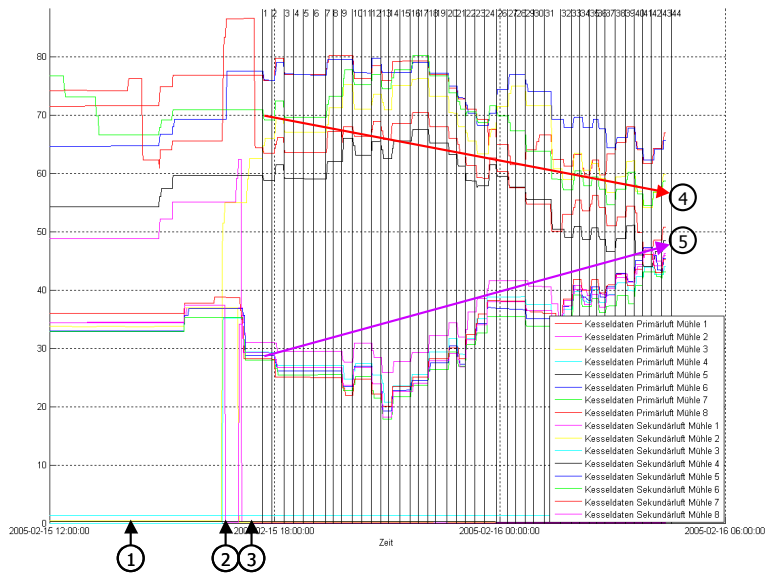


Abbildung 6 Verstellung der Primärluft- und Sekundärluftklappen

## 6. Resümee und Ausblick

Die ausführlichen Tests zeigen, dass eine optimierte Fahrweise des Kessels mit dem intelligenten Optimierer „EUcontrol – boiler“ bereits in der „Open-Loop“-Fahrweise gute Ergebnisse erreicht. Während verschiedener Testläufe konnten die gesetzten Optimierungsziele erreicht werden. Durch die Versuchsverstellungen wurde die Verbrennung optimiert, ohne dass die NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzen verletzt wurden. Die CO Emissionen wurden reduziert, während die mittlere Temperatur am Brennkammerende um bis zu 20° abgesenkt werden konnte. Durch diese geänderte Fahrweise lässt sich die Ansatzbildung im Kessel nachhaltig vermindern.

Selbst unter schwierigen Randbedingungen konnte der Kesselbetrieb stabilisiert und optimiert werden, auch wenn die Stellintervalle von 20-30 Minuten verhältnismäßig lang sind. Im „Closed-Loop“-Fahrbetrieb sind noch bessere Ergebnisse zu erwarten.