

Vollautomatische und selbstlernende Prozessoptimierung zur Wirkungsgradsteigerung von Großkraftwerken

Softwaregestützte Korrelation der Prozessdaten mit optischen und akustischen Informationen

Alexander Carl Hanf

Abstract

Fully Automatic and Self-learning Process Optimisation to Increase Efficiency of Large-scaled Power Plants by Correlation of Data from the Process Control System with Optical and Acoustic Information

Economic necessities have led to new challenges for the operation of coal steam generators in large power plants. The strongly fluctuating quality, in particular of imported coal, design and coal-dependent uneven distribution of coal dust results in a sub-optimal combustion air distribution if classical control concepts are used. This has a direct negative impact on the efficiency.

By using a system package consisting of intelligent software and optical sensors for flame analysis and acoustic sensors for milling degree analysis, the fuel-/air-ratio for each burner and over the burner levels is optimised. Through an interface the plant control system data of the combustion process are read permanently and are correlated with the optical combustion characteristics and the acoustic mills characteristics. The calculated set point adjustments are written through this interface to the Plant Control System and then are immediately forwarded to the actuators. These commands result in better control of the combustion process to a continuous optimum.

The improved combustion management leads to temperature uniformisation on each burner level, depending on the load requirements optimised temperature profile, a higher efficiency, better dynamic performance, as well as other positive effects in the combustion chamber. From this results, among other positive effects, a 1 % reduced of coal consumption, equivalent CO₂ reduction and a disproportionate reduction of slagging, NO_x and CO.

Autor

Alexander Carl Hanf

Powitec Intelligent Technologies GmbH
Essen/Deutschland

Herausforderungen zur Effizienzsteigerung

Herausforderungen zur Effizienzsteigerung des kohlebefeuchten Dampferzeugers in Großkraftwerken resultieren ursächlich häufig aus folgenden Aufgabenstellungen:

- Die Kohle ist ein variables Naturprodukt, und zur Kosteneffizienz wird ein zunehmend breiteres Kohleband eingesetzt. Deshalb weist das Kohleband häufig Unterschiede im Heizwert, im Aschegehalt, in den Volatilen, in der Mahlbarkeit usw. auf. Teilweise liegen nur ungenaue Kohleschlüsselinformationen vor, oder die vorliegenden Informationen stimmen nur selten mit der gesamten Kohlelieferung überein.
- Der Ausmahlgrad variiert in Abhängigkeit von Mahlbarkeit und Mühlenzustand.
- Eine weitere Herausforderung ist die ungleichmäßige Kohlenstaubmengenverteilung am Brenner oder über die Ebenen, die im Wesentlichen begründet ist in ungleichmäßiger Rohrleitungsführung, wodurch eine ungleichmäßige Brennerbeschickung erfolgt, fehlender automatisierter Reaktion auf nur teilweise eingesetzte Kohlenstaubmengen-Messsysteme, die außerdem häufig nicht die Erwartungen an die Genauigkeit erfüllen, sowie fehlender permanenter und automatischer Reaktion auf Anlagendrift insbesondere an Mühle, Sichter und Brenner.
- Die daraus folgende Konsequenz ist eine suboptimale Verbrennungsluftverteilung am Einzelbrenner und über die Dampferzeugerebenen. Das führt zu
 - erhöhtem Brennstoffeinsatz,
 - gesteigerten Emissionen und
 - unnötiger Belastung einzelner Aggregate.

Weitere sehr kesselindividuelle Herausforderungen, die bei einer Lösung zu erhöhter Verfügbarkeit und/oder besserer Effizienz führen, treten auf durch

- Brenner-Rückzündungen durch Verschlackung,
- insgesamt starke Verschlackungsneigung,
- CO-Strahlenbildung durch Verschlackung und/oder suboptimales Brennstoff-Luft-Gemisch,
- Temperaturschieflagen (Temperaturbelastung der Stähle und der Ausmauerung),
- hohe Werte des unverbrannten C in der Asche,
- Kesselträgheit.

Die größte Herausforderung bei der optimierenden Verbrennungsregelung ist aber die gleichzeitige Verfolgung konkurrierender Optimierungsziele. Diese Komplexität wird erhöht durch schwankende Heizwerte, variierende Kohlequalitäten und Ausmahlgrade sowie daraus resultierende unterschiedliche Anzünd- und Ausbrandgeschwindigkeiten. Parallel soll die Energieeffizienz maximiert werden, der Prozess möglichst konstant ablaufen und Anlagenkomponenten möglichst gleichmäßig und damit schonend betrieben werden. Außerdem sollen Emissionen und Unverbranntes minimiert werden. All das sind Kennzeichen für eine optimierte Balance zwischen Brennstoff und Luft – also Kennzeichen einer optimal geregelten Verbrennung.

Diese Herausforderungen führten zu dem Bedürfnis nach zusätzlichen Informationen direkt vom Mühlenystem und aus dem Kern des Prozesses – dem Feuer selbst. Informationen, wie sie der Mühlenmeister durch den Hammerstiel am Ohr von der Mühle und der Brennerexperte durch den Blick in die Flamme vom Einzelbrenner und Flammenkörper gewinnen.

Diese Forderung führte zu zwei Visionen:

- Würden Mühlen- und Flammendaten in digitaler Form vorliegen und dadurch eine Korrelation mit den Prozessdaten erlauben, sollte es möglich sein, permanente automatische Stelleingriffe zur optimierenden Regelung zu generieren.

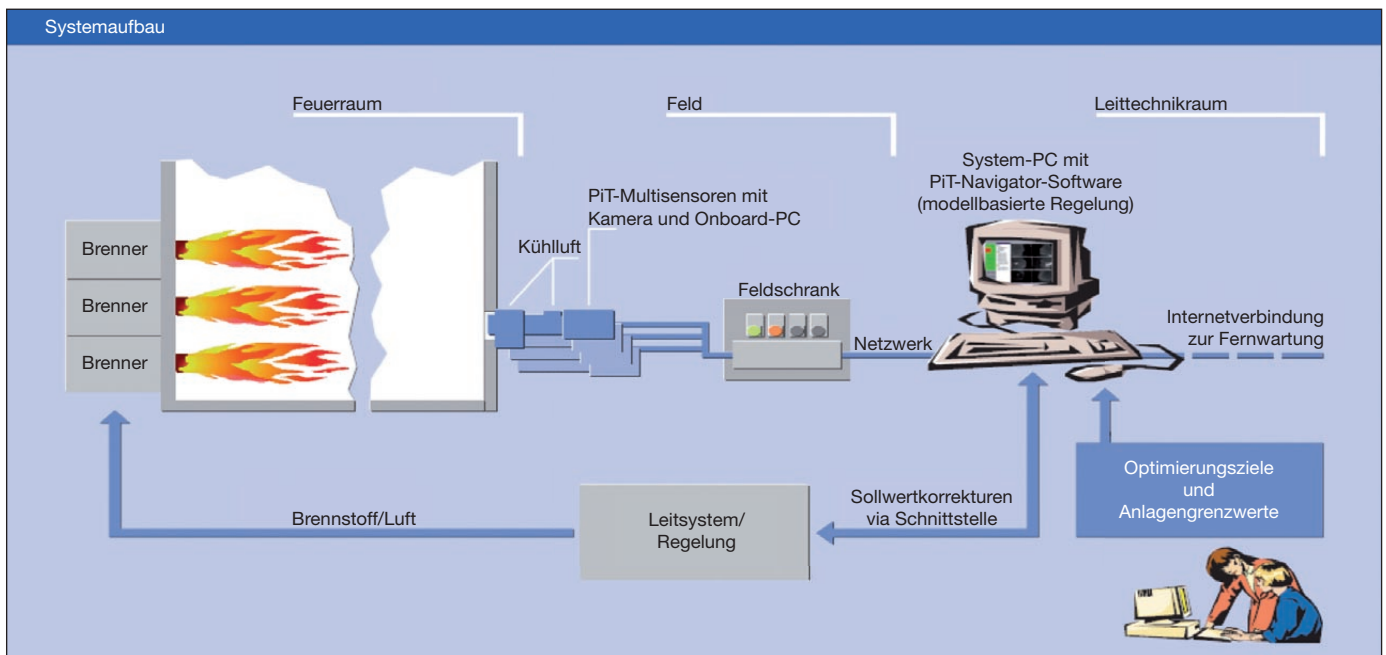


Bild 1. Systemaufbau.

– Diese optimierende Regelung sollte nicht einer permanenten manuellen Re-Programmierung und Re-Parametrisierung bedürfen, sondern sich selbstlernend anhand einmal erfahrener Prozesszustände verbessern und auf neue Prozesszustände eigenständig adaptieren.

Lösung

Um die Struktur und Charakteristik von Flammen und Rauchgasen zu analysieren, kommen optische Sensoren mit Blick auf den Brenner und den Flammenkörper zum Einsatz. Die Analyse der Mühlenvibrationen erfolgt durch piezokeramische Aufnehmer an Mühlen, Sichern und Kohlenstaubleitungen.

Diese Daten werden in einem nichtlinearen vorausschauenden Kontrollsystem NMPC (Non-linear Model Predictive Control), das auf selbstlernenden Neuronalen Netzen basiert, verarbeitet. Zusammen mit herkömmlichen Prozessparametern ist eine Echtzeitprognose der Prozessreaktionen (z. B. Temperatur, Dampfmenge, O_2 , NO_x , CO) auf simulierte Stellgriffe in den Prozess möglich.

Die Analyse aller möglichen Prognosen führt zu einem optimalen Plan zur Korrektur aller Stellgrößen, die in Echtzeit in das Prozessleitsystem zurückgespeist werden. Damit lassen sich spezifische Optimierungsziele erreichen, die auch aus einer gewichteten Zusammenstellung unterschiedlicher Einzelziele bestehen können. Das Prozessleitsystem bekommt durch diesen Ansatz sozusagen Ohren, Augen und Gehirn (Bild 1).

Flammenstrukturanalyse

Um den Verbrennungsprozess zu optimieren, ist es essentiell wichtig, die Flamme und das

Rauchgas selbst als wesentliche Informationsquelle zu begreifen und zu erschließen.

Die Beherrschung des Verbrennungsvorgangs ist primär durch das Brennstoff-Luft-Verhältnis und eine optimale Luftverteilung im Kessel definiert. Ein hoher Luftüberschuss erhöht die Abgasverluste, was sich auch in einem erhöhten Energieverbrauch bei den zugehörigen Ventilatoren ausdrückt. Zu wenig Luft führt hingegen zu einem höheren NO_x -Gehalt im Abgas sowie zu einem höheren Anteil nicht verbrannten Brennstoffs in der Asche. Das Abgas ist dann außerdem insgesamt korrosiver, greift die Rohre in den Dampferzeugern (Flossenwände) stärker an und reduziert so die Betriebsdauer. Deshalb ist die richtige Balance von Luft und Brennstoff entscheidend für die Minimierung der Betriebs- und Wartungskosten.

Zur exakten Regelung sind aktuelle Messwerte die entscheidende Voraussetzung. Somit besteht die Notwendigkeit, Messwerte direkt aus dem Prozess zu erhalten.

Häufig eingesetzte videobasierte Kamerasysteme liefern dem Anlagenfahrer zwar Informationen zum Flammeverhalten, aber es hängt von den individuellen Fähigkeiten ab, diese komplizierten Informationen zu deuten. Ob die richtigen Schlüsse gezogen werden, hängt vom Erfahrungsniveau und der Beobachtungsintensität ab, die sicherlich nicht 24 Stunden am Tag an sieben Tagen in der Woche auf einem hohen Niveau gehalten werden kann.

Um – über die Temperaturmessung hinausgehende – Informationen aus dem Verbrennungsprozess zu erhalten, wurde ein intelligentes Flammen- und Rauchgasanalyse-System entwickelt. Es extrahiert Informationen direkt aus der Flamme und dem Rauchgas und ana-

lysiert die Verbrennung erheblich genauer. Die gewonnenen Daten liegen digital vor und können mit Anlagenmesswerten korreliert werden.

Neben örtlicher und zeitlicher Analyse der Temperaturen werden Flammenintensität und -frequenz sowie Flammenvolumen und -form permanent analysiert. Das gelingt durch Kameras mit On-board-PC, die durch Endoskope den Prozess beobachten. Die integrierte digitale Bildverarbeitung liefert hochdynamisch entscheidende Prozessparameter, wie Flammenlage und Flammenvolumen, Turbulenz, Verweilzeit und Strömungsverhalten bei einer hohen Orts- und Zeitauflösung. Weil diese Parameter mit Emissionen (CO , CO_2 , NO_x) korrelieren, steht eine einzigartige Informationsquelle digital und zeitaktuell zur Verfügung.

Je nach Kesselgeometrie werden zwei bis 12 optische Sensoren eingesetzt.

Die Sensorlanze enthält ein Endoskop und ist luftgekühlt. Durch Einsatz eines speziellen Spülflütdüsenkopfes wird verhindert, dass Verschmutzungen die Sicht auf die Flamme behindern. Eine Hochgeschwindigkeitskamera befindet sich im äußeren Gehäuse und gestattet eine sowohl räumlich (1.024×1.024 Pixel) als auch zeitlich (2.300 bis 4.000 Hz) hochauflösende Beobachtung der Flamme.

Einbauorte der Sensoren hängen nicht nur von der individuellen Kesselgeometrie und Brenneranordnung, sondern auch von betreiberindividuellen Zielsetzungen ab. Die alleinige Zentrierung eines Flammenzyklons in einem eckenbefeuerten Kessel kann durch zwei Sensoren über der Oberluftebene erfolgen. Erfordern Betreiberziele aber eine Optimierung der Flamme am einzelnen Brenner, sind mehrere Sensoren je Brennebene erforderlich. Durch die Methoden der digitalen Bildverarbeitung

ist es allerdings möglich, auch mehrere Brennerflammen mit einem Sensor zu beobachten und die Einzelflammen sauber voneinander in der Analyse zu trennen.

Der optimale Beobachtungspunkt ist seitlich vom Brenner, um Brennermund und Flammenwurzel sowie Hauptverbrennungsbereich analysieren zu können. Aber selbst bei suboptimaler Anordnung mit Blick senkrecht auf den Brenner ist eine hinreichende Menge von Informationen zu gewinnen.

Die Sensoren stellen schnell und direkt aus dem Feuerraum eine hohe Anzahl reproduzierbarer und signifikanter Signale für digitale Bildverarbeitung bereit. Ausreichende Signalstärke und hohe Korrelation zu Parametern des feuerungstechnischen Wirkungsgrades zeichnen diese Signale aus. Besonderheiten sind:

- Hoher Dynamikumfang durch Belichtungszeitserien für alle Farbbestandteile (Rot, Grün und Blau). Permanente Variationen der Kameraeinstellungen erlauben es, dass gleichzeitig sehr dunkle und sehr helle Bildinhalte mit starkem Kontrast erfasst werden.
- RGB-Thermographie: Pixelweise Verarbeitung von 10 bis 4.000 Bildern pro Sekunde aus verschiedenen Wellenlängenbereichen (Berechnung der Temperatur ähnlich der Quotientenpyrometrie). „Jeder Pixelpunkt ist ein eingeständiges Pyrometer“.
- Electronic-Dust-Filter: Staubreduktion der Bilder durch einen patentierten Electronic-Dust-Filter durch Aufbau der Bilder aus gut verwertbaren Bestandteilen einer Vielzahl einzelner Bilder.
- Signal „Verschmutzungsgrad des Sensors“: Zur zustandsorientierten Wartung des Sensors, permanente Anzeige des Verschmutzungsgrades des Sensors (Linse).
- Lichtstarkes Endoskop: Die spezielle Endoskoptechnologie von Powitec minimiert den Verlust optischer Informationen.

Die aus der vollständigen Analyse der Flamme permanent und automatisch gewonnenen Daten werden dazu benutzt, Korrelationen mit den weiteren Prozessdaten zur Optimierung des Prozesses zu finden.

Ergebnis ist ein Set an Informationen und stochastischen Kennwerten zu örtlicher und zeitlicher Änderung von

- örtlicher Brennstoff-Luft-Vermischung,
- Flammenintensität und -temperatur,
- Strömung und Fluktuation der Flamme.

Schwingungsanalyse

Der Schwingungsanalyse liegt die Erfahrung zugrunde, dass Mühlencharakteristika (Antrieb und Mahlwerkzeuge) sowie Kohlemischungskonsistenz verschiedene Schwingungen erzeugen und dass sich Last, Kohleleigen-

schaften und Mühlenverschleiß in den akustischen Merkmalen widerspiegeln.

Dabei erzeugt die Mühle eher kontinuierliche und tieffrequente, der Sichter eher periodische und schmalbandige, die Kohle eher stochastische, breitbandige, hochfrequente und diskontinuierliche Spektren. Durch die Analyse des Pegels und des Spektrums können skalare Merkmale gewonnen werden.

Die Datengewinnung erfolgt durch sinnvolle Sensorpositionierung nach einer eintägigen Vor-Ort-Messung. Die piezokeramischen Aufnehmer für den industriellen Einsatz mit Militärfreigabe werden durch Magnetfixierung an Stellen < 120 °C angebracht. Dort gewonnene Daten laufen in einem separaten Hochleistungsserver zur Akustikanalyse zusammen. Dort erfolgt die Datenauswertung durch Analyse spektraler Schwerpunkte, statistischer Momente und Korrelationsanalysen (Optimierung des Transinformationsgehalts). Es wird also die Informationsvielfalt reduziert auf diejenigen Daten mit dem größten Informationsgehalt, bei denen die größte statistische Unabhängigkeit der Größen zueinander besteht.

Durch Analyse der Frequenzbänder, der spektralen Schwerpunkte, statistischer Momente des Schwingungsspektrums sowie der Berechnung eines Sets von Hüllkurven (parametrisierter Envelope-Filter) und statistische Momente dieser Hüllkurven können eine Korrelations- und Entropieanalyse erfolgen.

Das Ergebnis ist ein reduziertes Set periodischer und stochastischer Kennwerte mit optimalem Informationsgehalt zu

- Ausmahlgrad,
- Mühlenzuständen und
- Kohlenstaubmengenveränderung je Kohleleitung.

Prozessdaten

Reproduzierbare Prozessdaten sind die Voraussetzung zur Optimierung des Prozesses. Die Optimierungs-Software ist durch eine bidirektionale Schnittstelle (z. B. Modbus, Profibus, OPC) an das bestehende Prozessleitsystem gekoppelt. Es werden sämtliche vorhandenen (!) Sollwerte und Ist-Daten des Verbrennungsprozesses – beginnend beim Zuteiler und bei den Emissionsdaten endend –, permanent ausgelesen:

- Zuteilerdrehzahlen,
- Mühlenstrom, Mühlenmoment,
- Mühlendruckdifferenzen,
- Luftklappen Mühlen (heiß/kalt),
- gegebenenfalls Sekundärbrennstoffe,
- Sichtereinstellungen (z. B. Drehzahl),
- Laborwerte Kohle: Heizwert, Asche, Wasser, Volatile,
- Laborwerte (oder online): Unverbranntes in der Asche bzw. Rest-C,

- Frischdampfmenge,
- elektrische Last und Frequenz,
- Dampfmenge,
- Dampftemperaturen und -druck,
- Sollwert-Wärmeleistung,
- Rauchgastemperaturen,
- Saugzug,
- Tragluft (Primärluft),
- Mantelluft,
- Stufenluft (Tertiärluft),
- Oberluft (einzeln und in Summe),
- Sekundärluftmengen (Klappenstellungen) und -temperaturen,
- Lanzenbläser Start/Ende,
- O₂ (z. B. vor/nach Economiser),
- NO_x-Rohgas,
- SO₂-Rohgas,
- CO-Rohgas.

Datenvorverarbeitung

Es ist ein entsprechendes Maß an Ingenieurleistung erforderlich, um aus dem sehr großen Spektrum vorhandener Messdaten diejenigen herauszufiltern und entsprechende Vorverarbeitungsparameter zu definieren, die die regelungstechnisch notwendige Information tragen. Wir haben hierzu Lösungen entwickelt, die eine weitgehend automatisch ablaufende Konfiguration der Kanalauswahl und Parametrierung realisieren. Diese Verfahren beschränken sich dabei nicht nur auf die klassischen Messungen aus dem Leitsystem, sondern sind ebenfalls in der Lage, aus dem hochdimensionalen und damit deutlich voluminöseren Datenstrom der Bilder oder Spektren der Kameras und Schwingungssensoren handlungsrelevante Merkmale automatisch zu extrahieren.

Aus den Rohdaten werden zunächst mit einem initialen Basisfilter (feature extractor) Merkmale berechnet. Zwischen diesen Merkmalen und den interessanten Zielgrößen wird anschließend ein Informationsmaß berechnet, das Aufschluss darüber gibt, wie informativ die extrahierten Merkmale bezüglich der Zielgröße sind. Mit Hilfe eines speziellen Optimierungsverfahrens wird dann der Merkmalsextraktor so verändert, dass er maximal informative Merkmale bezüglich des Ziels liefert. Mit diesem Verfahren werden vollautomatisch aus dem verfügbaren Datenstrom die regelungstechnisch erforderlichen Informationen extrahiert, die anschließend dem eigentlichen Regelungssystem als Arbeitsgrundlage zur Verfügung gestellt werden.

Analog zur automatischen Merkmalsextraktion wird auch bei der Auswahl der zu nutzenden Stellgrößen ein selbst organisierendes Konzept angewendet. Zur Prozessbeeinflussung stehen am Dampferzeuger eine ganze Reihe möglicher Stellgrößen zur Verfügung.

Unklar ist jedoch meist, welche Kombination dieser Stellgrößen zur Erreichung der definierten Optimierungsmatrix geeignet ist. Durch eine automatisierte Analyse der Wirkungsstärke jeder untersuchten Stellgröße auf die einzelnen Zielgrößen und welche Nebenwirkungen auf andere Zielgrößen vorliegen, erfolgt die Ermittlung einer geeigneten Stellgrößenkombination.

Analyse und Vorhersage

Die Informationen über Kohlenstaub, Flamme und Rauchgas werden mit den Prozessdaten korreliert und dienen als Eingabe für die Optimierungs-Software PiT-Navigator auf der Basis eines selbstlernenden, adaptiven Neuronalen Netzes. Die Software arbeitet mit allen gängigen Prozessüberwachungssystemen über eine Schnittstelle (z. B. Modbus, ProfibusDP, RK 512, OPC) zusammen. Aus diesen Daten werden selbstständig Regelungsparameter und ihre optimale Veränderung bestimmt. Das geschieht mittels Prozessmodellen, die in der Lage sind, Abhängigkeiten zwischen Flammencharakteristik und anderen Prozessparametern zu erlernen.

Durch diese Prozessmodelle ist der PiT-Navigator in der Lage, die Prozessreaktionen (Temperatur, Emissionen) der nächsten zwei bis drei Prozessschritte vorherzusagen und so einen Blick in die nähere Zukunft zu ermöglichen.

Variierende Prozesszustände, Anlagendrift durch Abnutzung oder variierende Brennstoffeigenschaften können so automatisch erkannt und optimiert werden.

Ein Kritikpunkt gegenüber Neuronalen Netzen ist die eingeschränkte Möglichkeit, bei variierenden Brennstoffeigenschaften dauerhaft funktionierende Prozessmodellierung vorzunehmen. Die beschriebene Software ist aber in der Lage, durch die Kombination mit optischen und akustischen Sensoren den Prozess zu analysieren und mit selbstlernender Adaptivität darauf zu reagieren. Das führt zu hervorragenden Prozessmodellen und ist ein Grund dafür, warum wir behaupten, einen Wettbewerbsvorsprung von drei bis vier Jahren zu haben.

Optimierung

Der PiT-Navigator berücksichtigt die spezifischen Optimierungsziele des Betreibers. Sie werden vom Management in Form einer (gewichteten) Hierarchie vorgegeben. Durch die kontinuierliche Berücksichtigung sämtlicher Sensorik (Prozessdaten) und Beeinflussung sämtlicher Aktorik (Mühlensystem, Feuerraum) werden bislang nicht gekannte Optimierungspotentiale erschlossen. Manche Optimierungssysteme bauen auf Fuzzy-Logik auf, wobei zugehörige Regeln dabei anlagen-spezifisch erstellt werden müssen. Damit findet alleine das Expertenwissen Eingang. Eine

selbständige permanente Optimierung findet nicht statt. Durch die permanente Anlagendrift und Modifikation von Anlagenteilen müssen meist auch diese Regeln permanent angepasst oder sogar neu erstellt werden. Mit den hier beschriebenen Neuronalen Netzen wird das Know-how der Anlagenfahrer ebenfalls erfasst, doch die Software lernt selbstständig dazu und optimiert auch nach Anlagenänderungen, Prozessänderungen oder während signifikanter Heizwertschwankungen ohne manuellen Eingriff. Darüber hinaus muss die Anlagendrift nicht permanent nachgepflegt werden, womit die Abhängigkeit von einzelnen Software- und Prozessexperten reduziert wird.

Der Anlagenfahrer ist allerdings nach wie vor nicht überflüssig, weil das System ausschließlich ein Optimierer ist und nur Zustände im Feuerleistungsdiagramm regelt. An- und Abfahrvorgänge werden nach wie vor durch den Anlagenfahrer manuell ausgeführt.

Funktionsweise

Der PiT-Navigator besteht aus mehreren Reglerkomponenten. Jede dieser Komponenten erhält Signale aus der Prozesskopplung und von den optischen Sensoren. Außerdem werden beschriebene Prognosen genutzt.

Für jede Reglerkomponente werden Ziele definiert, die von der jeweiligen Reglerkomponente verfolgt werden. Die Parameter der einzelnen Komponenten werden zum einen durch eingestellte Werte und zum anderen durch selbstlernend optimierte Parameter festgelegt.

Die Geschwindigkeit und Intensität der Reglereingriffe wird zwischen der Firma Powitec und dem Betreiber vereinbart.

Der Erfolg des PiT-Navigator hängt ab von

- den gesetzten Zielen,
- den technischen Möglichkeiten der Anlage und
- dem erlaubten Maß und der Geschwindigkeit der Stelleingriffe.

Der PiT-Navigator verfolgt verschiedene Strategien:

Früherkennung

Detektion von Änderungen im Ausmahlgrad, in der Kohlenstaubverteilung und im Flammenbild, wodurch eine zeitnahe Reaktion möglich wird.

Selbstkalibrierung

Konventionelle Regler mit Fuzzy-Logik müssen regelmäßig nachparametriert werden. Das ist beim PiT-Navigator nicht der Fall, weil er als selbstlernender Mehrgrößenregler kontinuierlich und selbstständig aktuelle Prozessmodelle erstellt und auf deren Basis die Feuerung regelt. Durch diese „Selbstkalibrierung“ werden sämtliche Veränderungen der Anlage

(Verschleiß, Verschlackung, Verschmutzung usw.) und des Brennstoffs erkannt und berücksichtigt.

Unabhängigkeit manueller Modellierungsprozesse

Das Neuronale Netz wird trainiert und erlernt selbstständig Prozessmodelle im Gegensatz zu manuell erstellten mathematischen Modellen, die vom jeweiligen Expertenwissen abhängen.

Adaptivität

Es findet eine permanente selbstständige Optimierung statt. Erfahrungen werden gespeichert und im Bedarfsfall wieder angewendet. So gehen einmal gelernte Prozesszustände nicht verloren, und es findet eine automatische Anpassung auf veränderte Prozesszustände statt.

Breitere Sicht

Durch die Analyse der Sicht auf Mühle, Kohlenstaubleitungen, Flamme und Rauchgas werden neue Informationen gewonnen und mit relevanten aktuellen und historischen Prozessdaten korreliert. Dadurch entsteht eine sowohl in örtlicher als auch zeitlicher Hinsicht breitere Sicht auf den Prozess.

Nutzung sämtlicher anlagentechnischer Möglichkeiten

Die Software regelt permanent die komplette Aktorik, und zwar in einer Intensität und feiner Abstufung, wie es dem Menschen nicht möglich wäre.

Vergleichmäßigung

Das System vergleichmäßigt nicht nur die Temperaturverteilung in der Brennerebene, sondern auch über die Ebenen. Außerdem wird durch die vollständige Automatisierung eine Vergleichmäßigung über Mitarbeiterschichten erzielt.

Ein wesentlicher Vorteil dieses sich selbst organisierenden und selbst optimierenden Regelungskonzeptes ist dessen inhärente Adaptivität. Sie wird realisiert, indem in zyklischen Abständen ein Training des zugrundeliegenden Prozessmodells auf dem aktuellen Datenmaterial wiederholt durchgeführt wird. Das ist möglich, weil dieser Vorgang automatisch und damit ohne jeglichen personellen Aufwand abläuft. Um sicherzustellen, dass ein auf aktuellen Daten neu trainiertes Prozessmodell auch tatsächlich zur Regelung des Prozesses genutzt werden kann, müssen verschiedene Kriterien erfüllt sein. So wird z. B. geprüft, ob das aktualisierte Modell auch auf aktuellen Testdaten den realen Prozess besser beschreibt als das bisherige Prozessmodell. Des Weiteren wird der zum Training verwendete Datensatz statistisch untersucht, ob auch das typische Prozessverhalten abgebildet ist und nicht etwa ein Anlagenstillstand. Durch dieses zyklische

Nachtrainieren, Prüfen und gegebenenfalls Aktualisieren des Neuronalen Prozessmodells kann zeitvarianten Eigenschaften des Verbrennungsprozesses durch Brennstoffwechsel, Verschlackungssituationen usw. automatisch begegnet werden.

Wirkung

Die im Feuerraum erzeugte Wirkung erstreckt sich im Wesentlichen über fünf Bereiche:

- Die Temperaturverteilung je Brennerebene wird vergleichmäßigt. Durch die zusätzliche Analyse der örtlichen und zeitlichen Temperaturverteilung wird eine Vergleichmäßigung im Betrieb mit dem Optimierungssystem im Verhältnis zum Betrieb ohne das System beobachtet.
- Die Durchschnittstemperatur im Feuerraum wird innerhalb gegebener Grenzen maximiert, da die Feuerraumtemperatur durch die Optimierung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses mit Umverteilung der Luftmengen und Lambda-Absenkung steigt.
- In Abhängigkeit von Kohlequalität, Mühlenzustand und Lastanforderung wird die Temperaturverteilung, basierend auf gelernten Zuständen, über die Ebenen derartig optimiert, dass der Wärmeübergang für das jeweilig angeforderte Lastprofil verbessert wird.
- Der Dampferzeuger-Wirkungsgrad η (η Dampferzeuger = $\frac{\sum \text{Dampfenergie}}{\sum \text{Brennstoffenergie}}$ bzw. η Dampferzeuger = $1 - \frac{\sum \text{Kesselverluste}}{\sum \text{Dampfenergie} - \sum \text{Verluste}}$) wird durch durchschnittlich geringeren Brennstoff-Luft-Verbrauch (reduziertes λ bzw. reduziertes O_2) und durch reduziertes Unverbranntes in der Restasche bzw. geringeren Rest-C-Wert verbessert.

Eine Verbesserung des Dampferzeuger-Wirkungsgrades um 0,3 % entspricht einer Erhöhung des Kraftwerks-Wirkungsgrades um 0,1 %, eine kleine Zahl mit großer Wirkung auf die eingesetzte Kohlemenge (siehe Abschnitt Resultate).

- Eine verbesserte Leistungsdynamik (Geschwindigkeit der Blockanpassung an Laständerungsanforderungen) führt zu einem großen Nutzen bei schnellen Laständerungsanforderungen und wird durch Reduktion der Kesselträgheit über optimierende Regelung des Flammenschwerpunktes und optimierende Regelung des Mühlenfeldes erreicht. Hierdurch ergibt sich eine um $\frac{1}{3}$ reduzierte Kesselzeitkonstante.

Weitere positive, aber pekuniär schwierig zu bewertende Effekte im Dampferzeuger durch die aktive Flammenregelung sind:

- Reduktion des UiA auch bei schwieriger Kesselgeometrie und/oder aschehaltiger Kohle,
- Reduktion der Verschlackungsneigung,
- Überprüfung des Ausbrandes je Brenner,

- Beseitigung von Brennerrückzündungen,
- Verbesserung der Kesselwandatmosphäre (Verringerung von CO-Strahlen).
- Beseitigung von Temperaturschiefen,
- Reduktion der NO_x -Emissionen.

Resultate

Die beschriebene Optimierungslösung ist derzeit in sechs steinkohle- und 18 abfallbefeuerten Dampferzeugern im alltäglichen Einsatz. In steinkohlebefeuerten Dampferzeugern wurden folgende Resultate erzielt:

Komipo

Bei Komipo Seocheon TPP, mit Deckenfeuerung und je Kessel 20 Brennern, ist die Installation seit 2005 auf beiden Kesseln aktiv. Es werden 2×215 MW (elektrisch) erzeugt. Die Besonderheit dort ist die Verwendung einer lokalen Kohle minderer Qualität mit hohem Aschegehalt von 50 %. Durch die Optimierungslösung konnte auf Kessel 1 das UiA um 0,8 %, abs., und auf Kessel 2 um 1,2 %, abs., abgesenkt werden.

Evonik

Im Evonik-Kraftwerk Fenne wird das Optimierungssystem seit 2005 auf einem Kessel mit versetzter Boxerfeuerung mit acht Brennern auf zwei Seiten je zwei Ebenen und vier Mühlen eingesetzt. Die Software regelt die Sekundärluftverteilung je Brenner sowie die Klärschlammmenge. Es wurde ein Performance Contracting zwischen Powitec und Saarenergie (heute Evonik) vereinbart, das die aus der Installation erwirtschafteten Einsparungen über sieben Jahre teilt.

Ergebnisse aus 2006, 2007 [1] und 2008 zeigen:

- Dampferzeuger-Wirkungsgrad + 0,4 % = \therefore 1.324 t Kohle/a = \therefore 2.768 t CO_2 /a,
- O_2 -Luftmenge \therefore 24 % (von 4,2 auf 3,2 % bzw. λ 1,25 auf 1,18),
- Eigenverbrauch \therefore 2.000 MWh/a,
- UiA \therefore 0,15 % (von 4 auf 3,85 %),
- verbesserte Kesselwandatmosphäre,
- reduzierte Verschlackung,
- erhöhte Verfügbarkeit.

Vattenfall

Im Vattenfall-Kraftwerk Tiefstack in Hamburg ist das System auf beiden 252-MW-Kesseln installiert. Dort wird die Frontfeuerung mit je sechs Brennern und je drei Mühlen mit je sechs Kameras sowie akustischen Sensoren analysiert. Das System regelt dort

- die Vertrimmung der Luft zwischen den Brennern einer Ebene,
- die Vertrimmung zwischen Mantel- und Stufenluft aller Brenner und

- die Vertrimmung der Luft zwischen den drei Brennerebenen.

Die Ergebnisse wurden durch [2] präsentiert und sind im Wesentlichen:

- Eta-Dampferzeuger + 0,3 % $\lambda = 1,22$ auf 1,15,
- CO – 12 %, NO_x – 29 mg/m³ (i.N.),
- Rest-C – 0,5 %, abs.

E.ON

Im größten kontinentaleuropäischen Steinkohlekraftwerk, im Kraftwerk Scholven von E.ON, werden je Kessel 16 Brenner in versetzter Frontalanordnung durch je vier Mühlen beschickt. Jeder Block hat eine elektrische Leistung von 345 MW (el.) und verarbeitet bis zu 12 verschiedene Import-Kohlenmischungen. Ergebnisse wurden anlässlich der Keli 2008 in Hamburg präsentiert [3]. Die Vermarktung der Flugasche bereitete in der Vergangenheit Probleme, weil die Verwertung der Aschen stark vom Restkohlenstoffgehalt abhängt. Nur bei einem Rest-C-Anteil unter 4,2 % kann Asche als Recyclingmaterial an die Baustoffindustrie verkauft werden. Durch Mischen der verschiedenen Aschequalitäten aller Kessel wird die Qualität verbessert und homogenisiert, doch starke Schwankungen sowie die häufigen Rest-C-Werte von mehr als 5 % erschwerten die Ascheverwertung.

Die Optimierungslösung ist seit Mitte 2007 im Block C installiert und optimiert die Brennstoff-Luft-Verteilung je Brenner sowie über die Brennerebenen. Die sechs Kamerasensoren beobachten frontal 16 Brenner. Durch patentierte Mustererkennungsverfahren werden so einzigartige Merkmale direkt aus dem Verbrennungsraum zum Zünd-, Brenn- und Ausbrandverhalten gewonnen.

Vier Schwingungsaufnehmer erfassen Mühlenvibrationen, die durch einen separaten Rechner ausgewertet werden. Aus diesen Vibrationsdaten resultieren Informationen zu Ausmahlgrad und Kohlequalität.

Über eine Schnittstelle werden außerdem permanent online die Leittechnikdaten des Verbrennungsprozesses gelesen. Die Software korreliert diese Daten dann mit optischen Verbrennungsraummerkmalen und akustischen Mühleninformationen mit Hilfe von Software auf Basis von Neuronalen Netzen. Die berechneten Sollwertkorrekturen werden über die Schnittstelle zum Leitsystem geschrieben.

Seit Juli 2008 konnte eine deutliche Vergleichmäßigung der Aschequalität mit einem bis zu 1 % (abs.) geringeren Rest-C-Wert in Abhängigkeit der eingesetzten Brennstoffqualität erreicht werden. Der PiT-Navigator ist permanent zugeschaltet und erzielt den verbesserten Ausbrand im Lastbereich zwischen 960 und 1.200 t/h Dampf. *Armin Wolke*, Leiter der Produktion des E.ON-Kraftwerks Scholven, zieht folgendes Fazit: „Die Kombination aus Flam-

menanalyse mit modellprädiktiver Regelung ist mit einer Absenkung des Rest-C von bis zu 1 % (abs.), je nach eingesetzter Brennstoffqualität, sehr erfolgreich – und das bei unverändert guter Kesselwandatmosphäre.“

Die Flugaschevermarktung ist durch die Optimierungsmaßnahme deutlich vereinfacht und lukrativer geworden. Die Asche von Block C kann heute eingesetzt werden, um auftretende hohe Rest-C-Werte der Asche anderer Blöcke abzumischen. Neben vereinfachter Weitervermarktung der Flugasche erfolgt heute ebenfalls eine effizientere Brennstoffnutzung. Dadurch hat sich eine schnelle Amortisation eingestellt.

Zunächst bestand eine gewisse Skepsis, aber das System überzeugte durch seine Performance. Tests haben bestätigt: Die Software passt sich autonom und selbstlernend an neue Prozessbedingungen an.

Im nächsten Schritt sollen durch das System weitere Optimierungspotentiale erschlossen werden.

Verschiedene Optimierungen

Bei verschiedenen Optimierungsaufträgen hat das System darüber hinaus bewiesen, dass durch Neuroinformatik Korrelationen gefunden werden und erfolgreiche Prädiktionen möglich sind, die im Ergebnis zu verbesserter Kesselbetriebsweise führten.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Vision, Mühlen- und Flammendaten in digitaler Form zu analysieren und mit einer optimierenden Regelung, die sich selbstlernend anhand einmal erfahrener Prozesszustände verbessert und auf neue Prozesszustände eigenständig adaptiert, führte zur Entwicklung eines komplexen Prozessoptimierungssystems.

Heute, 25 Jahre nach Entstehen dieser Vision, ist diese Lösung voll entwickelt, mit rund 80 Patenten abgesichert, auf sechs Großkraftwerkskesseln implementiert und erzielt den erwarteten Effekt, nämlich, die Herausforderungen zur Effizienzsteigerung mit Bravour zu meistern.

Mit jedem weiteren Kraftwerkskessel, der diese Optimierungslösung einsetzt, wird ein positiver Effekt für die Umwelt hinsichtlich Ressourcenschonung sowie CO₂- und NO_x-Emissionen erzielt. In der Regel werden 1 % Kohle weniger zur Erzeugung der gleichen Leistung benötigt. Deshalb würde der Einsatz auf allen kohlebefeuerten Kraftwerkskesseln Deutschlands eine CO₂-Reduktion zur Folge haben, die in etwa dem CO₂-Ausstoß aller Pkw Thüringens entspricht.

Das hat auch die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) überzeugt, weshalb

sie den Einsatz dieser Technologie in Indien mit einem mittleren sechsstelligen Betrag fördert.

Der mögliche Einsatz dieser Lösung bei anderen Optimierungsaufgaben wurde bereits unter Beweis gestellt – z. B. in der Waste-to-Energy-Industrie, Chemie und Rauchgasreinigung. Das System ist ebenfalls in der Lage, andere komplexe Optimierungsaufgaben zu meistern. Voraussetzungen sind eine hinreichende Menge an Aktorik und Sensorik sowie ein Prozess, bei dem durch den Einsatz einer Optimierungslösung die Wirtschaftlichkeit hinreichend verbessert wird.

Literatur

- [1] *Kiehn, D., et. al.*: Performance Contracting für einen Feuerungsoptimierer auf Basis von Neuronalen Netzen in einem kohlebefeuerten Kraftwerk. VGB PowerTech 77 (2007), H. 12.
- [2] *Rosner, Röpell et. al.*: Wirkungsgradverbesserung an steinkohlebefeuerten Dampferzeugern mittels lernfähiger, videogestützter Luftverteilungsoptimierung. VGB PowerTech 88 (2008), H. 12.
- [3] *Wolke, A., et al.*: Feuerungsoptimierung im Kraftwerk Scholven; Senkung des Unverbrannten in der Asche mittels NMPC (Non-linear Model Predictive Control) in Kombination mit optischer Flammenanalyse. Sonderband zur VGB-Konferenz „KELI 2008“. VGB PowerTech Service GmbH, Essen. □

FINEAMIN®



WATER TREATMENT
WE TELL THE FACTS ONLY



Unsere Antwort auf Korrosionen
und
Verkrustungen in
Wasser-Dampfkreisläufen
jeder Art



CWB Wasserbehandlung GmbH
Glienicker Weg 95
12489 Berlin
Tel. +49 30 6789 3751
Fax. +49 30 6789 3821
e-mail: info@cwB-berlin.de
Internet: www.fineamin.de



h2o facilities sa
8 av. Grandes Communes
CH 1213 Petit Lancy
Tel. +41 22 879 95 00
Fax. +41 22 879 95 09
e-mail: info@h2o-f.ch
Internet: www.h2o-f.ch

www.FINEAMIN.de

VGB PowerTech-DVD

More than 10,000 digitalised pages with data and expertise
(incl. search function for all documents)



Please fill in and return by mail or fax

I would like to order the VGB PowerTech-DVD
1990 to 2007 (single user license).

- Euro 950.-* (Subscriber of VGB PowerTech Journal ¹⁾)
- Euro 1950.-* (Non-subscriber of VGB PowerTech Journal ²⁾)
Plus postage, Germany Euro 7.50 and VAT
- Network license (corporate license), VGB members' edition (InfoExpert) and education license on request (phone: +49 201 8128-200).

* Plus VAT.

Annual update ¹⁾ Euro 150.-; ²⁾ Euro 350.-
The update has to be ordered annually.

Return by fax or in business envelope with window to
VGB PowerTech Service GmbH
Fax No. +49 201 8128-329

Name, First Name

Street

Postal Code City Country

Phone/Fax

Date 1st Signature

Cancellation: This order may be cancelled within 14 days. A notice must be sent to VGB PowerTech Service GmbH within this period. The deadline will be observed by due mailing. I agree to the terms with my 2nd signature.

Date 2nd Signature

VGB PowerTech – www.vgb.org

The generation of electricity and the disposal of heat is in all parts of the world a central topic of technology, economy, politics and daily life. Experts are responsible for the construction and operation of power plants, their development and monitoring as well as for various tasks in connection with service and management.

The technical journal VGB PowerTech is a competent and internationally accepted publication for power plant engineering. It appears with 11 bilingual issues (German/English) annually. VGB PowerTech informs with technical/scientific papers and up-to-date news on all important questions of electricity and heat generation.

VGB PowerTech appears with VGB PowerTech Service GmbH, publishing house of technical-scientific publications.

VGB PowerTech e.V., the German and European technical association, is the publisher.

VGB PowerTech DVD 1990 to 2007: Digitalised technical papers of VGB Kraftwerkstechnik and VGB PowerTech.

You find the competent technical know-how from 18 years on more than 10,000 pages VGB Kraftwerkstechnik (German issues until 2000) and the international technical journal VGB PowerTech (as of 2001) with:

- More than 2300 technical papers,
- All documents in PDF-format (up to the year 2000 for technical reasons as b/w scan),
- Convenient search function in all papers as full-text search and/or deliberate search for authors and documents titles,
- Navigate quickly to the desired papers with a few mouse clicks.

The VGB PowerTech-DVD is available as single license or multi-user license for companies, research institutions and authorities.

The single license can be ordered by form and by post/fax or use our online shop under www.vgb.org.

A quotation for a multi-user license is made on demand.

You can bring up to date your DVD annually with the VGB PowerTech update. The update has to be ordered annually.

Your contact at VGB PowerTech Service GmbH,
Jürgen Zimander, Phone: +49 201 8128-200, E-Mail: mark@vgb.org

VGB PowerTech Service GmbH

P.O. Box 10 39 32
45039 Essen
ALLEMAGNE