

Primär-NO_x-Regelung und -Einsenkung in Kombination mit – durch Online-CFD – temperaturgeführter SNCR im steinkohlebefeueten Großkraftwerk

Alexander C. Hanf

- 1. Entstickung im Steag Kraftwerk MKV in Völklingen
- 1.1. Das MKV
- 1.2. Entstickung
- 2. Powitec-Herangehensweise
- 2.1. Roh-NO_x Einsenkung.....
- 2.2. SNCR
- 3. Feuerungsoptimierung.....
- 3.1. Funktionsweise.....
- 3.2. Ergebnisse
- 4. DeNO_x.....
- 4.1. Vorher: SNCR oder SCR?
- 4.2. Temperaturabhängigkeit des SNCR-Verfahrens.....
- 4.3. Modellierung der Temperaturverteilung – Online-CFD.....
- 4.4. Validierung.....
- 4.5. Aufbau der SNCR.....
- 4.6. Regelung der SNCR
- 5. Ergebnisse
- 5.1. Feuerungsoptimierung.....
- 5.2. SNCR-Regelung.....
- 5.3. Nachher: SNCR oder SCR?.....
- 6. Literatur.....

Powitec hat nach der Feuerungsoptimierung im Steag MKV Fenne auch die Regelung der durch Dritte installierten SNCR übernommen. Nach einer kurzen Einführung der Besonderheiten einer Entstückung im Kraftwerk Fenne sowie der des Powitec Lösungsansatzes, werden Funktionsweise und Ergebnisse von Feuerungsoptimierung und SNCR-Regelung dargestellt. Dabei werden Aufbau und Besonderheiten einer SNCR im Kraftwerk und deren Regelung ausführlich diskutiert. Die starke Temperaturabhängigkeit dieses Verfahrens bedarf einer ständigen Kenntnis zur aktuellen Temperaturverteilung im relevanten Anlagenteil in Abhängigkeit von insbesondere aktuellem Brennstoff, Mühlenzustand und Last. Dazu wurde eine Online-CFD entwickelt und deren hohe Realitätstreue validiert. Dadurch ist eine optimale Regelung der Sprühmenge und des Sprühorts zur passenden Temperatur möglich. Die hier vorgestellte SNCR-Regelung passt sich selbständig an unterschiedliche Kohlemischungen und Mühlenzustände an und hält die Grenzwerte und Sollwerte für NO_x und Schlupf im Kraftwerk im Dauerbetrieb für alle Lastfälle (40-100 %) ein.

1. Entstückung im Steag Kraftwerk MKV in Völklingen

1.1. Das MKV

Das Kraftwerk Fenne ist ein Standort der Steag Power Saar GmbH in Völklingen. Fenne besteht im Wesentlichen aus dem Motorenheizkraftwerk (MHK), dem Heizkraftwerk Völklingen (HKV) und dem Modellkraftwerk Völklingen (MKV). Die installierte Bruttoleistung beträgt 505 MW, die Fernwärmeleistung 615 MW. Das Modellkraftwerk (MKV) wurde 1982 gebaut und hat eine installierte Bruttoleistung von 195 MW und eine Fernwärmeleistung von 150 MW. Der Dampferzeuger ist ein Zwangsdurchlaufkessel mit einfacher Zwischenüberhitzung in Zweizugbauweise mit einer Leistung von 576 t/h.

1.2. Entstückung

Es ergab sich die Notwendigkeit zusätzlicher Entstückungsmaßnahmen. Hier bieten sich im Wesentlichen, neben Primärmaßnahmen, die beiden Optionen SCR (selektive katalytische Reduktion kurz SCR von engl. Selective Catalytic Reduction) und SNCR (Selektive nicht-katalytische Reduktion kurz SNCR – von engl. Selective Non CatalyticReduction) an.

Als eine Primärmaßnahme ist die Feuerung mit 8 Low- NO_x DS-Brennern ausgestattet. Die Brenner sind versetzt angeordnet, gegenüberliegend auf 4 Ebenen. Die Luftstufung erfolgt über Sekundärluft 1 und 2, Schleierluft an den Kesselwänden, sowie Oberluft als Ausbrandluft.

Durch die häufigen Lastwechsel und einer Fahrweise im gesamten Lastband von 40 % bis 100 % entstehen zusätzliche Herausforderungen.

Die Lösung der Aufgabe zur Einhaltung des NO_x Limits und des NH_3 -Schlupfes in allen Lastfällen für unterschiedliche Kohlequalitäten, bei minimalem NH_3 -Einsatz wird nachfolgend vorgestellt.

2. Powitec-Herangehensweise

Die Herangehensweise unterscheidet sich von der typischen:

2.1. Roh-NO_x Einsenkung

Da der Prozess sich permanent verändert (u. a. durch Kohlemischung und Mühlenzustand) werden auch unterschiedliche Roh-NO_x erzeugt. Eine umfangreichere Beobachtung des Prozesses durch Analyse des gesamten Systems Mühlen-Sichter-Leitungen-Brenner ermöglicht eine Optimierung der Luftführung am Brenner und über die Brennebenen. Diese Feuerungsoptimierung senkt den Gesamtsauerstoffbedarf und dadurch das Roh-NO_x.

2.2. SNCR

Verschiedene Betriebszustände erzeugen unterschiedliche Emissions-Lasten und unterschiedliche Temperaturen. Der lokalen und zeitlichen Temperatur-Allokation muss im Rahmen einer SNCR-Regelung besonders Rechnung getragen werden.

SNCR im Großkraftwerk ist nämlich weit mehr, als lediglich Reagenzien an Positionen einzusprühen, die durch theoretische Betrachtungen und Ausprobieren ermittelt wurden. Erfolgreiche SNCR ist die Eindüsung der richtigen Menge NH₃ am richtigen Ort bei der passenden Temperatur.

Um Kenntnis über die passenden Temperaturbereiche zu erhalten ist die bessere Prozessbeobachtung aus der Feuerungsoptimierung die Basis, auf der eine Online-CFD erstellt werden kann. Die permanente Online-CFD berechnet die, sich Last- und Kohlemischungsabhängig verändernden Temperaturebereiche und ermöglicht so eine effiziente und intelligente Regelung der SNCR.

3. Feuerungsoptimierung

3.1. Funktionsweise

Der Feuerungsoptimierer, der PiT Navigator (PiT steht für Powitec Intelligent Technologies), integriert eine elektronische Flammenanalyse durch Kameras mit einer selbstlernenden, adaptiven Regelungssoftware. Kontinuierlich nutzt der Navigator die konventionellen Prozessdaten und die Kamerabilder, um ein PC-gestütztes Verfahrensmodell zu berechnen.

Im MKV wurden 8 PiT Multisensoren (optische Hochgeschwindigkeits-Feuerraumkameras) installiert. Durch die Kameras werden die Flammen der Kohlebrenner permanent mittels digitaler Bildverarbeitung und Mustererkennung analysiert. Sie liefern damit einzigartige Informationen zum Zünd- und Ausbrandverhalten sowie der Strömungseigenschaften der Flammen. Über eine Frequenzanalyse an signifikanten Stellen der Flamme und einer patentierten Mustererkennung werden die für die Optimierungssoftware notwendigen Signale errechnet. An den Systemrechner mit der selbstlernenden und adaptiven Optimierungs- und Regelungssoftware liefern die Kameras also keine Bilder, sondern vielmehr Variablen/Merkmale, welche das Flammenbild eindeutig charakterisieren und beschreiben.

Aber nicht nur die Informationen aus den Flammenbildern dienen bei Powitec als neu erschlossene Informationsquellen. Veränderungen an den Kohlemühlen werden akustisch beobachtet und ausgewertet. Die akustischen Signale liefern signifikante Informationen über Kohlequalität und Ausmahlgrad. Da diese Größen die Flammen wesentlich beeinflussen sind es wertvolle frühzeitige Informationen, die der Flammenveränderung sogar noch vorausgehen. Dies hilft die Prognosemodelle für die Prozessergebnisse schneller und genauer zu machen.

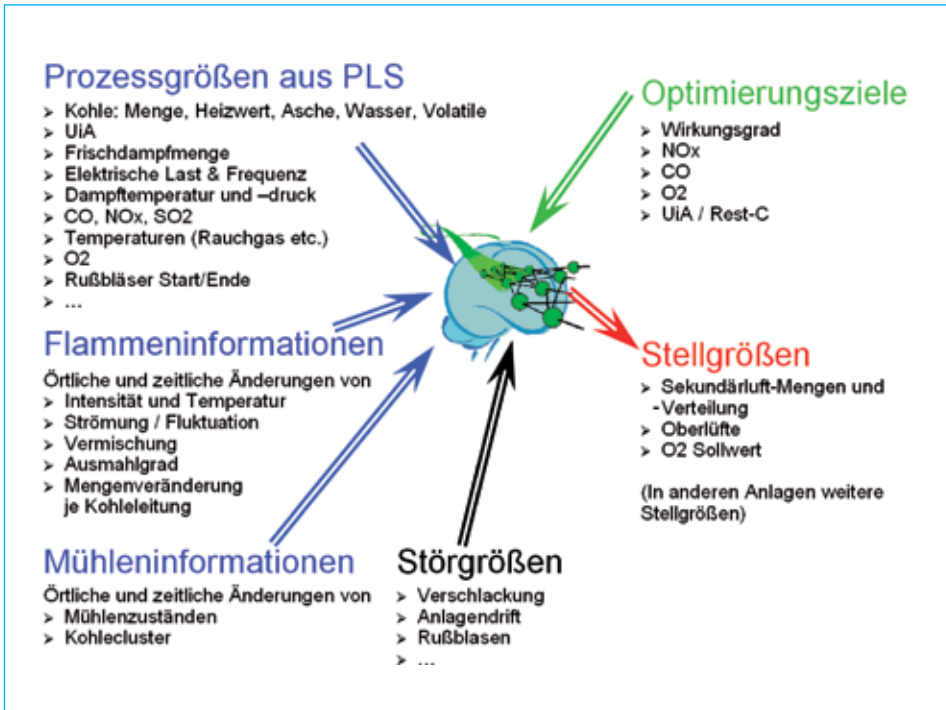


Abb. 1: Feuerungsoptimierung im MKV

Bei der Regelung mittels Neuronaler Netze werden Prognosemodelle für die Prozessergebnisse wie Dampfparameter, Emissionsdaten etc. trainiert, welche online genutzt werden. Was letztendlich das optimale Ergebnis ist, wird vom Betreiber zuvor in Form einer Sollwertematrix mit Gewichtung der Optimierungsziele definiert.

Der PiT Navigator unterscheidet sich von anderen modellbasierten Regelungen mit neuronalen Netzen durch eine permanente adaptive Lernfähigkeit und dem Nutzen der Flammenkameras. Die Prädiktionsgenauigkeit von Neuronaler Netze ist letztlich nur so gut wie die Daten die dem Netz für die Modellierung zur Verfügung stehen. Die Ursache z.B. für eine Veränderung vom NO_x-Wert im Rohgas oder der Rauchgasendtemperatur werden im Modell durch die charakteristischen Eigenschaften in Flammen signifikant erkannt. Die Software ist damit wesentlich schneller und genauer bei der Beurteilung, wie das örtliche Brennstoff-Luftverhältnis optimiert werden kann.

Die Navigator Software stellt auf Grundlage der vom Nutzer vorgegebenen Ziele und Prioritäten ausgewählte Stellgrößen bereit. Dabei hilft die kontinuierliche Rückkopplung der neuen Ergebnisse mit den Eingangsgrößen das Prozessmodell autonom lernfähig und adaptiv zu machen (Non-linear Model Predictive Control, NMPC). Im Gegensatz zu herkömmlichen Reglern in der Industrie kann diese Art der Regelung auch mehrdimensionale, ggf. widersprüchliche Zielgrößen berücksichtigen. Im MKV Fenne wurden nach einer kurzen Trainingsphase von etwa 6 Wochen die ersten Kundenziele erreicht. Heute regelt das System auch Stellgrößen, die durch die Anlagenfahrer des MKV Fenne nicht permanent genutzt wurden.

Sollwertkorrekturen – wie sie vorher durch den Leitstandfahrer vorgenommen wurden – werden durch das Regelungssystem stetig und selbstlernend im geschlossenen Regelkreis an die bestehende Kesselregelung weitergegeben.

Die vorgegebenen Optimierungsziele erzielt der Navigator über die Veränderung des Brennstoff/Luftverhältnisses am Brenner und eine Reduzierung der Ausbrandluft.

3.2. Ergebnisse

Die durchschnittliche O₂ Absenkung über alle Lastfälle beläuft sich auf 1 %; das O₂ nach ECO wurde von 4,2 % auf 3,2 % gesenkt, was einer Lambda-Senkung von 1,25 auf 1,18 entspricht. Diese 1 %-ige O₂-Senkung entspricht einer Roh-NO_x-Senkung von etwa 20 mg/Nm³ NO_x.

Durch die optimalere Verbrennung und die Reduzierung der Ausbrandluft konnte der Kesselwirkungsgrad um 0,4 % gesteigert werden. Es wurden bis zu 4,8 % weniger Verbrennungsluft benötigt. Das entspricht im MKV 1.324 t Kohle/a und 2.168 t CO₂/a.

Die Reduzierung der Verbrennungsluft hat auch zur Folge, dass die großen Gebläse wie Frischlüfter, Kaltluftgebläse und Saugzug weniger Energie benötigten. Der bessere Ausbrand hat auch eine Verringerung des Unverbrannten in der Flugasche zur Folge. Der mittlere Glühverlust in der Asche konnte von 4,05 % auf 3,85 % verringert werden.

Diese Werte wurden aufgrund der besonderen vertraglichen Konstellation (performance contracting) sorgfältig ermittelt und in den Jahren 2006 bis 2010 (über 5 Jahre) permanent gefahren.

Dieser erste Schritt – Feuerungsoptimierung – rechnet sich also schon alleine, reduziert das Primär-NO_x und führt darüber hinaus dazu, dass die Installation in Kombination mit einer SNCR nicht zur Kesseffizienzsenkung führt.

4. DeNOx

4.1. Vorher: SNCR oder SCR?

Eine Abwägung bei der Entscheidung zwischen SNCR oder SCR zeigt einige **Vorteile der SNCR** gegenüber einer SCR:

- Die Investitionskosten liegen bei weniger als 20 %.
- Die Regenerationskosten für die Katalysatoren entfallen.
- Die SCR erzeugt einen Druckverlust im Rauchgasweg und insofern einen Wirkungsgradverlust. Mit Feuerungsoptimierung entsteht so bei einer SNCR kein Wirkungsgradverlust.
- Die Nachrüstung einer SNCR ist im Vergleich zu der Nachrüstung einer SCR einfacher und benötigt weniger Platz.

Dem gegenüber stehen einige **Nachteile der SNCR**:

- Die Verfahrenstechnik ist aufwändig.
- Das Reduktionsmittelmanagement ist aufwändig.
- Der Reduktionsmittelverbrauch könnte höher sein als bei der SCR.

- Es bestehen Herausforderungen den NH_3 Schlupf einzuhalten.
- Insbesondere die Abhängigkeit von Kenntnis oder von Regelung der örtlichen Temperatur ist eine besondere Herausforderung.

4.2. Temperaturabhängigkeit des SNCR-Verfahrens

Eine Besonderheit des SNCR-Verfahrens ist nämlich, dass der NO_x Abscheidegrad und der Schlupf stark von Temperatur und lokalem O_2 abhängen. Bei einer Absenkung des O_2 verbreitert sich das Temperaturband für eine NO_x -Reduktion. In Folge erreicht der PiT Navigator durch gezielte Brenner- und Feuer-Führung eine O_2 -Einsenkung von 1 % abs. (von 4,2 % auf 3,2 %). Diese Verbreiterung des O_2 Bandes führt zu einer Verbreiterung des Bandes zur Eindüsung im optimalen Temperaturfenster.

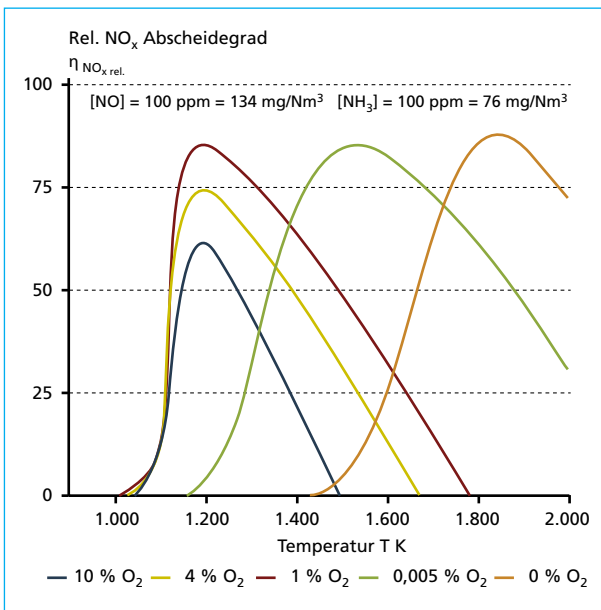


Abb. 2:

NO_x -Abscheidegrad in Abhängigkeit der Temperatur und lokalem O_2

Quelle: Görner, Technische Verbrennungssysteme

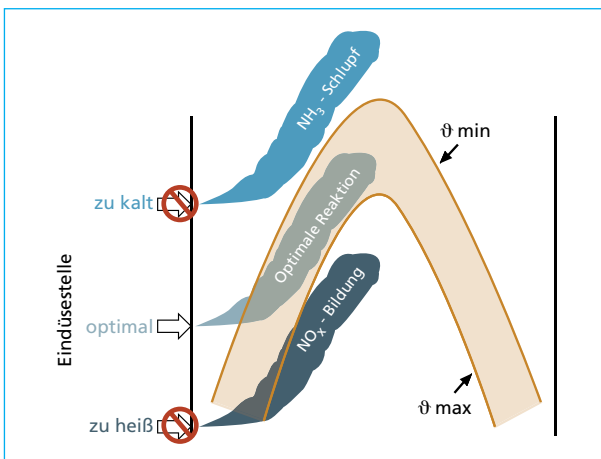


Abb. 3:

Das optimale Temperaturfenster im Rauchgas

Das optimale Temperaturfenster verteilt sich außerdem im Rauchgas als innen offener Kegel. Hierzu muss dann die richtige Einzeldüse gewählt werden, um nicht bei Eindüsung zu weit unten (zu heiß) eine NO_x-Erhöhung und zu weit oben (zu kalt) Schlupf zu erzeugen.

Dies ist insbesondere bei wechselnden Lasten und Kohlequalitäten eine Herausforderung (siehe Abbildung 3).

Insofern ist die Eindüsung der richtigen Menge NH₃ am richtigen Ort bei der passenden Temperatur gefordert.

Allerdings gibt es aktuell keine Verfahren zur Messung der Rauchgastemperaturverteilung im gesamten Feuerraum speziell bei hohen dynamischen Lastanforderungen, es gibt lediglich

- Punktmessungen (Widerstandsthermom., Thermoelemente, Absaugpyrom.),
- Flächenmessungen (Schall-Pyrometrie, Laser-Pyrometrie).

Dies mag ein Grund sein, warum die SNCR kaum Verbreitung in großen Dampferzeugern hat, trotz erheblicher Vorteile ggü. der SCR.

Als Lösung dieses Dilemmas erfand Powitec gemeinsam mit dem MKV die Online-Modellierung der Temperaturverteilung.

4.3. Modellierung der Temperaturverteilung – Online-CFD

Zur Online-Modellierung der Temperaturverteilung ist eine Modellierung der einzelnen Brennerflamme mit dem thermischen und dynamischen Verhalten des Brenners in Abhängigkeit von Lastschwankungen, Kohleverteilerung und Heizwert nötig. Hierzu werden neben allgemein bekannter Turbulenzmodellierungen und Strömungsmodelle bekannte Daten des Prozessleitsystems sowie die Informationen der Feuerraum-Kameras zur Modellstützung eingesetzt.

Modellierung des Feuerraums:

- Unterteilung des relevanten Bereichs in Volumenelemente: In Fenne werden 10 m x 10 m x 40 m in Volumenelemente mit einer Kantenlänge von 1 m aufgeteilt, woraus sich 4.000 Volumenelemente ergeben.
- Je Volumenelement erfolgt die Modellierung der Rauchgasparameter:
 - * Temperatur,
 - * Masse,
 - * Dichte,
 - * Geschwindigkeit in x, y und z-Richtung.
- Modellierung von Oberluft und Überhitzer,
- Bilanzierung des eingedüsten NH₄OH und des Tropfenspektrums,
- Berücksichtigung von Rußblasen,
- Modellierung der Wandverschmutzung.

Diese Modelle werden online gegen vorhandene Messdaten aus dem Prozessleitsystem (z.B. Thermoelemente, Dampfparameter) und der Powitec Sensoren kalibriert. Daraus entsteht online eine grobe CFD-Analyse der Temperaturverteilung. Die entsprechende

Visualisierung liefert faszinierende Einblicke in die lastbedingten Veränderungen im ersten Zug (http://www.powitec.de/Videos/PiT_OnlineCFD_FlueGas_Flame_Spray.avi).

Im Rahmen der Validierung erfolgten danach umfangreiche Messkampagnen, um die Richtigkeit der modellierten Temperaturverteilung zu prüfen.

4.4. Validierung

Die Validierung erfolgte im Rahmen einer Messstudie auf zwei Messebenen mit unterschiedlichen Messtiefen (von 0,5 Meter bis 4,5 Meter) bei verschiedenen Lasten (40 kg/s, 115 kg/s, 160 kg/s) durch Absaugpyrometer-Messungen. Damit konnten jeweils 60 Wertepaare (also insgesamt 180 Wertepaare) ermittelt werden. Nach wie vor und permanent erfolgt die Validierung gegen die fest installierten Temperatur-Messstellen.

Die Abweichung zwischen den berechneten Temperatur-Modellen und den anderen Temperatur-Messungen waren bzw. sind geringfügig.

Als Fazit hat die Kraftwerks- und Betriebsleitung der Steag festgehalten, dass die Online-CFD eine hohe Realitätstreue zeigt.

4.5. Aufbau der SNCR

Die SNCR-Hardware wurde durch eine dritte Partei geliefert und besteht aus Vorhaltetank, Misch- und Messmodulen, Verteiler-Modulen, Steuerung sowie 60 Lanzen auf 5 Ebenen verteilt. Jede Lanze ist individuell regelbar und die Ammoniakwasser-Konzentration ist gruppenweise regelbar.

Die Festlegung der Positionen erfolgte durch diese dritte Partei auf Basis von vor-Ort-Messungen und Offline-Modellierungen.

4.6. Regelung der SNCR

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass komplexe Regelungsstrukturen wesentliche Optimierungsreserven besitzen, da aufgrund der Prozesskomplexität der Mensch diese in der Regel nur suboptimal führen kann. Hier setzt die Powitec-Technologie an, um die bestehenden Anlagenkomponenten und Einsatzstoffe zu regeln und dadurch Effizienzverlustes zu heben – ohne wesentliche zusätzliche Investitionen in die Infrastruktur der Anlagen.

Die Powitec SNCR-Regelung ist vergleichbar mit einem *sehenden und hörenden Autopiloten*, der über lesende und schreibende Kommunikation mit der bestehenden Regelung dieser zur *Intelligenz* verhilft. Zur Regelung der SNCR wird die Online-CFD als essentielle Informationsquelle benutzt. Neben den so gewonnenen Temperaturen werden auch Flammen-Intensität, -Form und -Volumen permanent analysiert. Zusätzlich werden Informationen zum Kohletyp und Ausmahlgrad durch Vibrationssensoren an den Mühlen gewonnen.

Diese Daten werden dann mit konventionellen Prozessleitsystem-Daten korreliert. Kontinuierlich werden Prozessdaten und Prozessergebnisse genutzt, um den Prozess in einem sich stetig anpassenden Modell zu simulieren, Prozessergebnisse vorherzusagen und auf dieser Basis die bestmögliche Variation der Stellgrößen zu finden und den Prozess zum Optimum zu führen. Vom Anlagenbetreiber vorgegebene Optimierungsziele werden im geschlossenen Regelkreis erzielt.

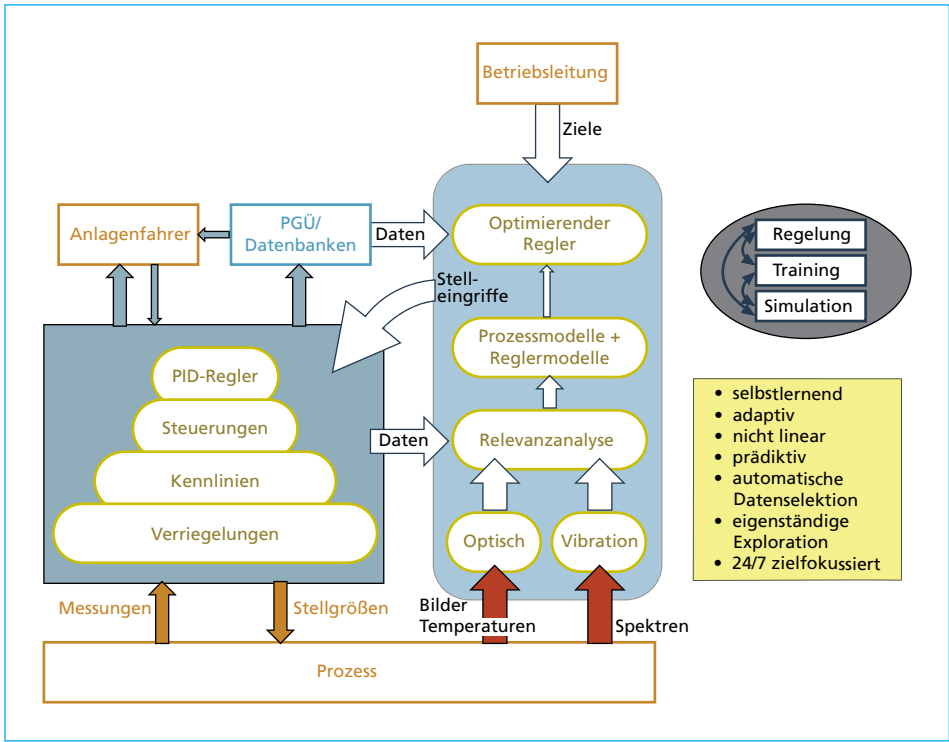


Abb. 4: Modell zur Regelung der SNCR

Das Neuronale Netz ist ein selbst organisierender, lernfähiger adaptiver Regler. Ein wesentlicher Vorteil dieses sich selbst organisierenden und sich selbst optimierenden Regelungskonzeptes ist dessen inhärente Adaptivität. Diese wird realisiert, indem in zyklischen Abständen das oben beschriebene Training des zu Grunde liegenden Prozessmodelles auf dem aktuellen Datenmaterial wiederholt – und ohne jeden personellen Aufwand – durchgeführt wird. Um sicher zu stellen, dass ein auf aktuellen Daten neu trainiertes Prozessmodell auch tatsächlich zur Regelung des Prozesses genutzt werden kann wird beispielsweise geprüft, ob das aktualisierte Modell auch auf aktuellen Testdaten den realen Prozess besser beschreibt, als das bisherige Prozessmodell. Durch dieses zyklische Nachtrainieren, Prüfen und gegebenenfalls Aktualisieren des neuronalen Prozessmodelles wird zeitvarianten Eigenschaften des Verbrennungsprozesses durch Kohlewechsel, Verschlackungssituationen, Ausmahlqualitäten der Mühlen usw. automatisch begegnet.

Die SNCR Regelung ist also in der Lage, sich voll automatisch an veränderte Prozess- und Anlagen-Bedingungen anzupassen.

Im MKV erfolgt alle 15 Sekunden die Berechnung der Temperaturverteilung im gesamten 1. Zug, falls erforderlich, auch bis Kesselende. Aktuelle Messungen der Prozessgrößen werden alle 15 Sekunden aufgeprägt (Online-Kalibrierung).

Es erfolgt die Bestimmung der Temperatur des von jeder SNCR-Düse erreichbaren Rauchgasvolumens und eine entsprechende Auswahl/Aktivierung der SNCR-Lanze im geeigneten Rauchgastemperaturfenster.

5. Ergebnisse

5.1. Feuerungsoptimierung

Die Feuerungsoptimierung (2006 bis heute)

- passt sich selbständig an Prozess-Veränderungen an (Kohlequalitäten, Mühlenzustand, Verschlackung etc.),
- reduziert den Luftüberschuss um etwa 1 % abs. O₂,
- und dadurch das Primär-NO_x um etwa 20 mg/Nm³ NO_x,
- und verbreitert das Reaktionsfenster für das Ammoniakwasser,
- steigert die Kesseffizienz um +0,4 %,
- verbessert die Kesselwandatmosphäre signifikant,
- amortisiert sich schnell.

Die Zufriedenheit von Steag zeigt sich auch in der Bestellung der Feuerungsoptimierung für das HKV am gleichen Standort.

5.2. SNCR-Regelung

Die SNCR-Regelung (September 2010 bis heute)

- erzielt durch eine valide Online-CFD eine optimale zeitliche und örtliche Einzeldüsen-Aktivierung,
- passt sich selbständig an Prozess-Veränderungen an (Kohlequalitäten, Verschlackung, Russbläser, Temperaturen, etc.),
- aktiviert die richtige Lanze zur richtigen Temperatur,
- hält die Grenzwerte und Sollwerte für NO_x und Schlupf im Kraftwerk im Dauerbetrieb für alle Lastfälle (40-100 %) ein.

5.3. Nachher: SNCR oder SCR?

Mit diesen Erfahrungen kann erneut die Frage gestellt werden, ob SNCR oder SCR die richtige Alternative ist. Die Vorteile haben sich nicht verändert:

- Geringere Investitionskosten (< 20 %),
- Keine Regenerationskosten,
- Kein Druckverlust im Rauchgasweg, mit Feuerungsoptimierung kein Wirkungsgradverlust,
- Einfache Nachrüstung.

Aber die Nachteile bedürfen einer neuen Wertung:

- Die Verfahrenstechnik ist zwar aufwendig aber Stand der Technik und beherrschbar.
- Das Reduktionsmittelmanagement fällt auch bei einer SNCR an, da auch dort die Ammoniakwasser-Eindüsung erforderlich ist.

- Der Reduktionsmittelverbrauch ist dem einer SCR ähnlich.
- Betriebsdaten aus dem HKV zeigen einen Schlupf deutlich unter den Grenzwerten, dieser ist also – bei entsprechend intelligenter Regelung – beherrschbar.
- Für die Problematik der Temperaturabhängigkeit gibt es mit der Online-CFD eine praxistaugliche und günstige Lösung, um die Rauchgastemperaturverteilung im gesamten relevanten Anlagenteil zu ermitteln.

Als Fazit lässt sich also ziehen, dass die deutlichen Vorteile einer SNCR überwiegen und die Herausforderungen durch eine intelligente Regelung nachweislich beherrschbar sind.

6. Literatur

- [1] Hellwig, S.: Policy Iteration für die intelligente Regelung unter Berücksichtigung des Stabilitäts-Plastizitäts Dilemmas. Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Oct 2009.
- [2] Schaffernicht, E.; Stephan, V.; Debes, K.; Gross, H-M.: Machine Learning Techniques for Selforganizing Combustion Control. Conference on Artificial Intelligence (KI 2009), Sep 2009.
- [3] Schaffernicht, E.; Stephan, V.; Gross, H-M.: Adaptive Feature Transformation for Image Data from Non-stationary Processes. International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN), Sep 2009.
- [4] Barth, C.: Vergleich von Reinforcement Learning Verfahren in kontinuierlichen Zustands-Aktions-Räumen. Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Jul 2008. English title: Comparison of Reinforcement Learning approaches in continuous state-operation-spaces.
- [5] Rosner, C.; Röpell, H.; Wintrich, F.; Stephan, V.: Wirkungsgradverbesserung an steinkohlegefeuerten Dampferzeugern mittels lernfähiger videogestützter Luftverteilungsoptimierung. VGB-Fachtagung *Brennstofftechnik und Feuerungen*, 2008.
- [6] Peper, S.: *Intelligent Flame analysis for an optimized combustion*, ABB AG, Kallstadter Straße 1, Mannheim, Germany.
- [7] Hanf, A. (Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany): Non linear Model Predictive Control. Cement Lime Gypsum CLG INTERNATIONAL, December 2007.
- [8] Kiehn, D. (Produktionskoordinator, Steag New Energies GmbH); Schmidt, D. (Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany): Performance Contracting für einen Feuerungsoptimierer auf Basis von Neuronalen Netzen in einem kohlebefeuerten Kraftwerk. VGB PowerTech, December 2007, Page 91-94.
- [9] Reinhardt, M.: Konzeption und Implementierung eines Systems zur Stellgrößenbewertung und Komposition von Makrooperationen für die intelligente Feuerungsführung. Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Nov 2007.
- [10] Niegowski, R.: Selbstorganisierende Merkmalsextraktion durch adaptive Datenfilter. Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Sep 2007.
- [11] Neuhaus, M.: Feature-Selection für nichtlineare Realweltprozesse zur videobasierten intelligenten Feuerungsführung. Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Feb 2007.
- [12] Kiehn, D. (Völklingen); Schmidt, D. (Essen): Performance contracting for a combustion optimiser in the coal fired power plant. Performance Contracting für einen Feuerungsoptimierer auf Basis von Neuronalen Netzen in einem kohlegefeuerten Kraftwerk. Tagungsband VGB Fachtagung: Kraftwerke im Wettbewerb 2007, Hamburg.
- [13] Gomez, F; Schmidhuber, J.; Miikulaian: Efficient non linear control through neuroevolution. In European Conference on Machine Learning (ECML), pp 654-662, 2006.
- [14] Bishop, C.: *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006.

