

high efficiency SNCR mit online 3D-Temperatur-Modellierung, NO_x-Prognose und intelligenter Regelung

Alexander C. Hanf – STEAG Powitec GmbH, Essen, Germany

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	2
2. Warum heSNCR?.....	3
2.1. Herausforderungen	3
2.2. Innovative Unterstützung durch die heSNCR.....	4
3. Die Bestandteile der heSNCR im Detail	5
3.1. Eindüsungssystem	5
3.2. Coating Detektion.....	5
3.3. Online-CFD	6
3.4. Flammenanalyse am Hauptbrenner	9
3.5. Soft Sensor NO _x	9
3.6. Intelligente Regelung	11
4. Ergebnisse	14
Literaturverzeichnis:	15

1. Einleitung

Die selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR - selective non-catalytic reduction) ist ein seit langem bekanntes und häufig eingesetztes Verfahren zur Reduktion von Stickoxiden (NO_x) im Rauchgas industrieller Feuerungsanlagen. Durch neue behördliche Vorgaben werden viele Betreiber von Zementdrehrohröfen vor gestiegene Herausforderung in punkto Einhaltung von NO_x -Emissionsgrenzwerten und Ammoniakschlupf gestellt.

Zur Reduktion des NO_x im Drehrohröfen wird das gasförmige NO_x mittels Ammoniak- oder Harnstofflösung in einem optimalen Temperaturfenster (zwischen 900 und 1080 °C) zu Wasserdampf und Stickstoff umgesetzt.

Bei Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer befindet sich dieses Temperaturfenster im Steigschacht zwischen Drehrohröfen und Wärmetauscher. Die NO_x -Reduktion basiert auf mehreren Teilreaktionen, wobei die Minderungsraten abhängig sind von der Reaktionstemperatur, den Strömungsverhältnissen und der Verteilung des Reduktionsmittels über den Kanalquerschnitt sowie dessen Gesamtmenge. Selbst bei maximaler NO_x -Reduktionsrate um 950°C (Ammoniak) bzw. 1050°C (Harnstoff) geht dabei meist ein Teil des Reduktionsmittels als Ammoniakschlupf (NH_3 -Schlupf) aus der Reaktion hervor.

Um eine maximale NO_x -Reduktionsrate bei minimalem Reduktionsmittelverbrauch und einen möglichst niedrigen NH_3 -Schlupf zu erreichen, sind im Steigschacht Lanzenstöcke mit Düsen in mehreren Ebenen angebracht, um die Eindüsung per Einzeldüsensteuerung in Bereichen mit der optimalen Reaktionstemperatur vorzunehmen. Die hier vorgestellte SNCR-Regelung erreicht die optimale Regelung einer derartigen Anlage auf Basis einer örtlich und zeitlich hoch aufgelösten Temperaturberechnung per Online-CFD.

Dieser Artikel bietet einen Überblick zur PiT heSNCR (Powitec Intelligent Technologies high efficiency SNCR). Nach einer kurzen Einführung wird die Systemstruktur inklusive Düsenüberwachung, Roh- NO_x -Prädiktion und Online-CFD-Modell beschrieben.

2. Warum heSNCR?

Konventionelle SNCR-Anlagen in Zementdrehrohröfen kämpfen in der Regel mit den verschiedensten Herausforderungen, deren Bewältigung mit innovativen Lösungen unterstützt werden kann.

2.1. Herausforderungen

Als besondere Herausforderungen für Betreiber von Zementdrehrohröfen in punkto Einhaltung von NO_x-Emissionsgrenzwerten und Ammoniakslupf sind insbesondere zu nennen:

Unbekannte Prozessgrößen:

- Roh NO_x
- Temperaturen im Eindüsbereich
- Rauchgasgeschwindigkeiten im Eindüsbereich
- Gaszusammensetzung im Eindüsbereich

Besondere prozessbedingte Herausforderungen:

- Temperaturen im Eindüsbereich wandern
- Kurze Verweilzeit
- hohe, sich verändernde Staublast
- Zeitverzug bis zur NO_x-Messung am Kamin (2-4 Min)
- Sich verändernde Anbackungsdicke im Steigschacht, dadurch sich verändernde Temperaturbereiche und Gasgeschwindigkeiten
- Mechanische Veränderung der Düsen

Permanente Änderungen im Prozess, insbesondere durch:

- Verschiedene Brennstoffmischungen und erhöhte Ersatzbrennstoffrate; dadurch Veränderungen im Roh-NO_x
- Mechanische Veränderungen an der Ofenlinie
- Veränderungen im Rohmehl
- Prozessdrift

2.2. Innovative Unterstützung durch die heSNCR

Der alltägliche Kampf mit diesen Herausforderungen kann unterstützt werden durch eine gesteigerte Prozessbeobachtung in Kombination mit einer intelligenten Regelung. Daher besteht die heSNCR aus folgenden teilweise sehr innovativen Komponenten:

- einzeln regelbare Lanzen, dadurch Möglichkeit der Wahl der optimalen Sprühposition und Sprühmenge
- Ansatzdickenschätzung im Steigschacht (PiT CoatingDetector)
- permanente Online-Modellierung der Temperaturverteilung und Geschwindigkeiten im Steigschacht (PiT Online-CFD)
- Beobachtung der Flammen des Hauptbrenners zur frühzeitigen Analyse des transienten Verhaltens von Temperatur und Flammenvariationen (PiT Multisensor)
- Abschätzung künftiger NO_x-Entwicklung zur frühzeitigen Reaktion auf diese (PiT Predictor NO_x)
- selbst-tunender Regler zur selbständigen Anpassung auf Prozessveränderungen durch Änderungen im Brennstoffmix, Rohmehl, Anlagendrift (PiT Navigator SNCR)

Diese Komponenten werden im Nachfolgenden näher beleuchtet.

3. Die Bestandteile der heSNCR im Detail

Als Basis der heSNCR dient eine nahe am Ofen installierte SPS, welche zum einen die Schnittstelle zum Eindüsungssystem sowie den PiT CoatingDetector Sensoren bereitstellt und zum anderen ein Fallback-System beinhaltet, welches eventuell mögliche Ausfälle des heSNCR-Systems abfängt. Die Basis-SPS empfängt die Prozessdaten und sendet Statussignale über eine analoge Kopplung zum Leitsystem.

Die eigentliche Regelung ist auf einem eigenen System-Server installiert, welcher über eine Modbus-Kopplung mit der SPS und z. B. über eine OPC-Kopplung (oder Modbus oder Profibus-Schnittstelle) mit dem Leitsystem der Anlage verbunden ist.

3.1. Eindüsungssystem

Die heSNCR setzt zur Optimierung eine Einzeldüsensteuerung ein. Die Positionierung der Eindüsungslanzen wird individuell je Ofen ausgelegt.

Je nach Temperaturverteilung im Steigschacht können die Düsen dann optimal angesteuert werden und so die minimal benötigte Menge Reduktionsmittel an den richtigen Ort gebracht werden. Somit wird eine Eindüsung per Einzeldüsensteuerung in Bereichen mit der optimalen Reaktionstemperatur möglich.

Das Eindüsungssystem wird individuell je Ofen ausgelegt, besteht aber im Regelfall aus acht Zweistoff-Vollkegeldüsen an Lanzenstöcken mit der Möglichkeit zur separaten Dosierung der Zerstäuberluft und des Reduktionsmittels. Anhand der vom Düsenhersteller vorgegeben Kennfelder können somit die Sauterdurchmesser der eingedüsten Tropfen justiert werden, was die Anpassung der Eindringtiefe des Reduktionsmittels in den Steigschacht erlaubt.

3.2. Coating Detektion

Die PiT CoatingDetectoren werden an verschiedenen Positionen von außen am Steigschacht befestigt. Sie stützen die Modellgleichungen des Online-CFD-Modells indem durch ihre Daten der dynamische Wärmeübergang in Wänden und die Anbackungsdicke modelliert wird.



Abbildung 1: Jeder der PiT CoatingDetector besteht aus je zwei Temperatursensoren mit unterschiedlicher Einstecktiefe (links im ausgebauten Zustand). Sie werden von außen am Steigschacht installiert und liefern Temperaturdaten von Wand und Ausmauerung (rechts im eingebauten Zustand).

Durch diese Ermittlung der Temperaturdifferenz an einer Stelle lassen sich über den Zeitverlauf bei unterschiedlichen Anbackungszuständen Rückschlüsse auf die aktuelle Anbackungsdicke ziehen.

An den Positionen der Sensoren wird die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung zwischen den zwei Sensoren im Bezug auf die Seitenfläche eines online-CFD-Blocks (die online-CFD mit ihren Blöcken wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben) mittels Fourierschem Gesetz bestimmt. Unter der Annahme, dass dies der Wärmeabgabe des Rauchgases an die Wand in dem zugehörigen Block entspricht (korrekt im stationären Fall), wird in den Blöcken die Wärmeleistung auf der Rauchgasseite bestimmt.

An den Positionen der Sensoren kann damit die Wärmeleistung auf Rauchgasseite (q_{rg}) und die Wärmeabgabe an die Wand (q_w) errechnet und eine lineare Korrelation von q_{rg} auf q_w ($q_w = m * q_{rg} + n$) bestimmt werden. Damit kann für alle Wand-Blöcke q_{rg} bestimmt und mit der eben bestimmten Korrelation auf q_w geschlossen werden, womit die abzuziehende Wärmeleistung für das online-CFD-Modell errechnet wird.

Durch die CoatingDetektor kann also eine starke Veränderung der Steigschachtgeometrie ermittelt werden (Anbackungen). Dadurch wird den Veränderungen der Strömungsverhältnisse Rechnung getragen und die ermittelten relativen Schätzungen liefern eine gute Basis zur Modellstützung.

3.3. Online-CFD

Im Online-CFD-Modell wird die Temperaturverteilung im Eindüsbereich anhand der verfügbaren Prozessdaten, der Daten des PiT Multisensors (im nächsten Abschnitt beschrieben) sowie der PiT CoatingDetektoren kalkuliert. Darauf aufbauend werden die Einzeldüsen angesteuert, um den optimalen Temperaturbereich für die NO_x -Reduktion zu nutzen.

Bei der CFD-Simulation wird der betrachtete Anlagenteil (hier der Steigschacht mit der installierten SNCR-Anlage) in diskrete Volumenelemente (Block) zerlegt.

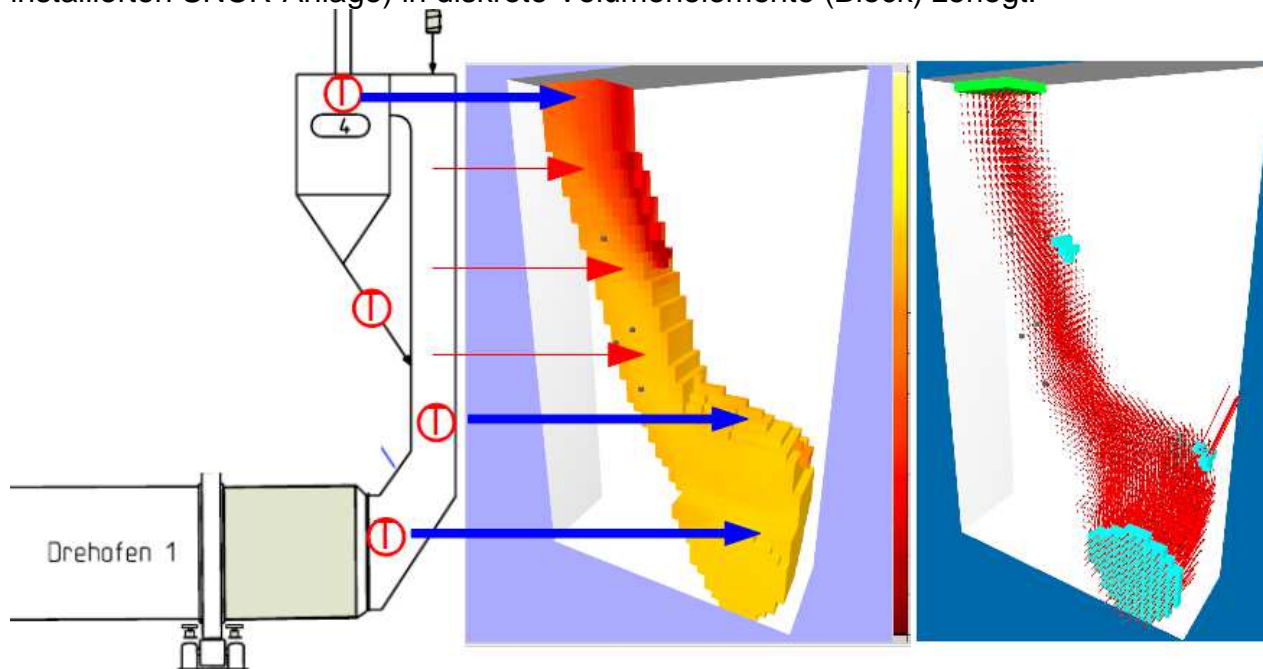


Abbildung 2: Schematische Abbildung des Ofeneinlaufes und Steigschachtes (inklusive Sensorik und Düsen) auf ein blockweise diskretisiertes CFD-Modell mit Darstellung der Gas- und Mehlphase (rechts).

Das CFD-Modell errechnet die Temperaturverteilung und Rauchgasgeschwindigkeit im Steigschacht je Block (hier im Beispiel mit einer Kantenlänge von 25 cm) und liefert auf Basis der erreichbaren Eindüsbereiche Informationen für die Auswahl der aktuell am besten geeigneten Düsen. Ausgabedaten des CFD-Modells sind Luftströmungen (u. a. zur Visualisierung), Temperaturverteilung, Priorisierung der Düsen anhand Temperaturverteilung.

Die Vorgänge in den einzelnen Blöcken, in diesem Fall Fluidströmungen, werden mit mathematischen Modellen (genauer: Euler-Modell mit inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen für die Berechnung der Impulsbilanz im dreidimensionalen Raum) beschrieben. Diese Modelle basieren auf dem Umstand, dass die betrachteten Größen (Energie, Impuls, Masse) erhalten bleiben und bilanziert werden können. Dabei wird das betrachtete Medium als Kontinuum angesehen, über das in einem ortsfesten Kontrollvolumen (der Block) bilanziert werden kann. Es findet also eine räumliche Diskretisierung durch finite Differenzen statt.

Da bei dieser „makroskopischen“ Betrachtungsweise das Fluid mit wenigen Parametern (Dichte, Geschwindigkeit, Energie/Wärme, Viskosität) beschrieben wird, kann eine Berechnung des kompletten betrachteten Raumes alle fünf Sekunden wiederholt werden und sich damit sehr schnell an veränderte Rahmenbedingungen (Gastemperatur, Luftzufuhr, WT-Saugzuggeschwindigkeit etc) anpassen.

Eine Aktualisierung der 3-Dimensionalen Ausgabedaten findet so alle 5 Sekunden statt. Nachfolgende Abbildungen zeigen zwei mögliche grafische Darstellung dieser Berechnungen.

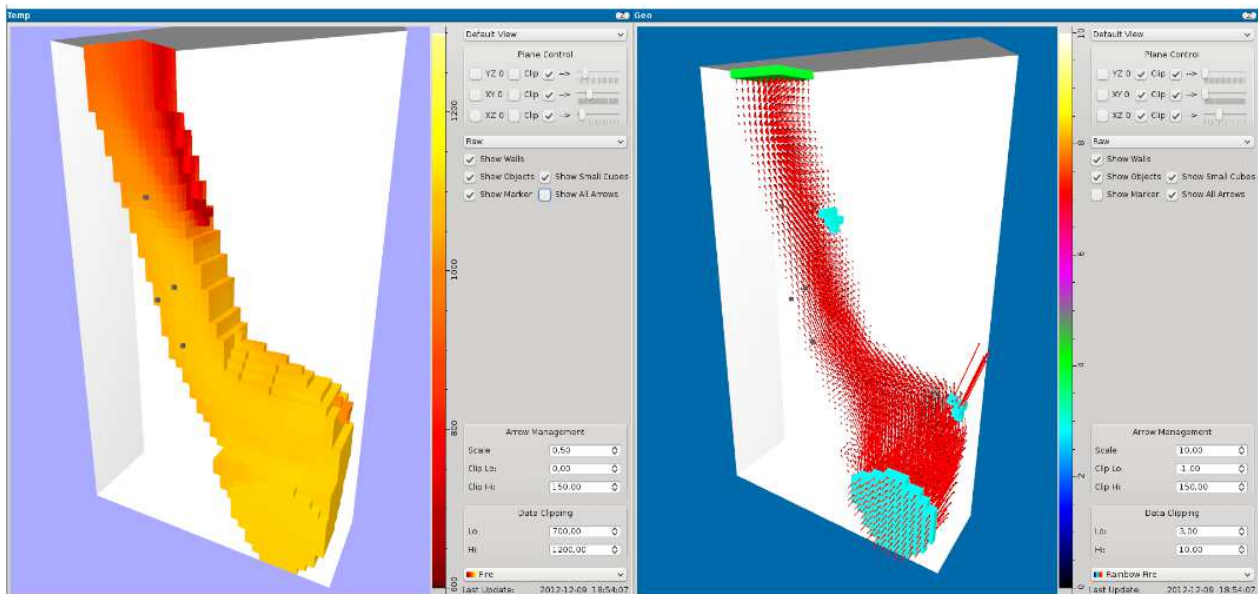


Abbildung 3: Visualisierung der Temperaturverteilung (linkes Bild in einer Temperatureauswahl von 700°C bis 1200 °C) und der Luftströmungen (rechtes Bild, dargestellt durch die Pfeile) im Steigschacht. Zusätzlich sind die Positionen der SNCR-Düsen als schwarze Block in der 3D-Ansicht sichtbar.

Erweitert wird dieses Modell nach Euler durch die Kombination mit dem Lagrange-Ansatz zum 2-Phasen-Modell, welches zusätzlich das zugeführte Heißmehl als diskrete Phase betrachtet. Die Flugbahn einzelner Mehl-Partikel wird hier mittels der Lagrange-Beschreibung verfolgt, wobei die Partikeleigenschaften ohne explizite Modellierung ihres Transports mitgeführt werden. D.h. nach der Berechnung der reinen Rauchgas-Phase unter Vernachlässigung des Mehlpartikeleinflusses folgt die Partikelbahnberechnung in einem zusätzlichen Lagrange-Modul, wobei die Rückwirkungen des Partikels (Impuls- und Energieübertrag) auf die Gasphase erfasst werden und für jeden Block und alle Partikel, die diese durchlaufen, aufsummiert wird. Dies wird innerhalb jedes Berechnungszyklus solange wiederholt, bis eine konvergente Gesamtlösung für beide Phasen entsteht.

Im 2-Phasen-CFD-Modell werden anschließend die Wirkungsbereiche der Einzeldüsen modelliert, d.h. deren Sprühbild ist Teil des CFD. Dabei werden die Partikel des Reduktionsmittels auf Basis eines Lagrange-Modells in Kombination mit einem Verdampfungsmodell verfolgt, um die Abdeckungsbereiche jeder Düse zu ermitteln.

Zur Validierung dieser Simulation werden die errechneten 3D-Temperaturen mit den tatsächlich gemessenen Prozesswerten, wie z.B. der Pyroklon- und Steigschacht-Endtemperatur (nachdem diese wiederum validiert und gefiltert wurden) verglichen. Die Ofeneinlaufterperatur spielt bei der Berechnung des CFD-Modells die wichtigste Rolle, da sie die Anfangstemperatur der Gasphase in der Simulation definiert. Ein Regler vertrimmt das CFD-Modell über verschiedene Parameter auf Basis der Differenz und passt das Modell so permanent online der gemessenen Realität an.

Im Vergleich zur klassischen (statischen, offline) CFD ist diese Online-CFD also erheblich gröber örtlich aufgelöst (25 cm Blockkantenlänge), wird allerdings permanent durch zusätzliche Sensorik gestützt, gegen die Online-Messdaten kalibriert und validiert und steht in einer vergleichsweise hohen Aktualisierungsrate (alle 5 Sekunden) zu Regelungszwecken zur Verfügung.

3.4. Flammenanalyse am Hauptbrenner

Der deutliche Zusammenhang zwischen der Hauptbrennerflamme und Prozessparametern wie FCaO, C3S und NO_x ist hinlänglich bekannt und beschrieben¹.

Der PiT Multisensor dient als Ofenkopfkamera und liefert neben dem klassischen Videobild digitale Informationen direkt von der Hauptbrennerflamme und somit die Basis für das Aufdecken dieser Zusammenhänge. Die heSNCR nutzt diese Informationen zur Analyse des charakteristischen und dynamischen Verhaltens der Flamme. Die gewonnenen optischen Informationen des Verbrennungsprozesses werden von einer komplexen Bildverarbeitungs- und Merkmalsextraktionssoftware verarbeitet. Die Bildverarbeitungssoftware ist in der Lage, Temperaturinformationen aus dem digitalen Kamerabild zu extrahieren.

Dadurch werden Informationen zur Temperatur, Flammenform, Zündbereich, Klinkerbett und Ansatzbildung digital verfügbar gemacht.

Die Relevanz dieser optischer Daten für die verlässliche Vorhersage von Prozessdaten liegt bei Prozessen mit einem einzigen Brennstofftyp immerhin noch bei rund einem Viertel, aber in Prozessen mit variierenden Brennstoffen und einem breiten Mix aus Primär- und Ersatzbrennstoffen bei 60-80%. Die Informationen der Flammenanalyse sind also gerade in diesen Prozessen wesentliche Basis für eine verlässliche NO_x-Vorhersage (wie im nächsten Kapitel beschrieben).

3.5. Soft Sensor NO_x

Der Softsensor NO_x, eine selbstlernende, anpassungsfähige Software, basierend auf künstlichen neuronalen Netzen, dient der Online-Vorhersage des Roh-NO_x-Wertes und somit der heSNCR-Regelung zur Prädiktion des aktuell erzeugten Roh-NO_x und anschließenden Abschätzung der benötigten Reduktionsmittelmenge.

Neuronale Netzwerke bilden Teilmodelle des Produktionsprozesses ab und sind in der Lage, verschiedene Prozesszustände auf entsprechende Roh-NO_x-Werte (gemessen durch Gasanalyse am Wärmetauscher) abzubilden. Zur Modellierung werden also Prozess- und Labordaten sowie die optische Daten der Flammenanalyse verwendet.

¹ Der Zusammenhang zwischen Flammenbildern und Prozessparametern ist zum Beispiel beschrieben in

- 1.) Hanf, Primary NOx control and reduction
- 2.) Hanf, Feuerungsoptimierung zur NOx-Regelung
- 3.) Hanf, Primär-NOx-Regelung und -Einsenkung
- 4.) Hanf, Auto-optimising the kiln
- 5.) Hanf, Switching to Side View
- 6.) Stettler, & Hanf, Controlling the burn
- 7.) Hanf, Intelligent Closed Loop Control of 8000t/d UltraTech Kiln
- 8.) Hanf, German High Tech Thermography to increase alternative fuel usage
- 9.) Hanf, Intelligent Optimisation with Powitec
- 10.) Schaffernicht E., Stephan V., Debes, K., Gross H-M., "Machine Learning Techniques for Selforganizing Combustion Control"
- 11.) Schaffernicht, Stephan, Gross, "Adaptive Feature Transformation for Image Data from Non-stationary Processes",
- 12.) Hanf, Schmidt, Gains with Brains
- 13.) Hanf, Non linear Model Predictive Control
- 14.) Niegowski, "Selbstorganisierende Merkmalsextraktion durch adaptive Datenfilter"
- 15.) Neuhaus "Feature-Selection für nichtlineare Realweltprozesse zur videobasierten intelligenten Feuerungsführung"

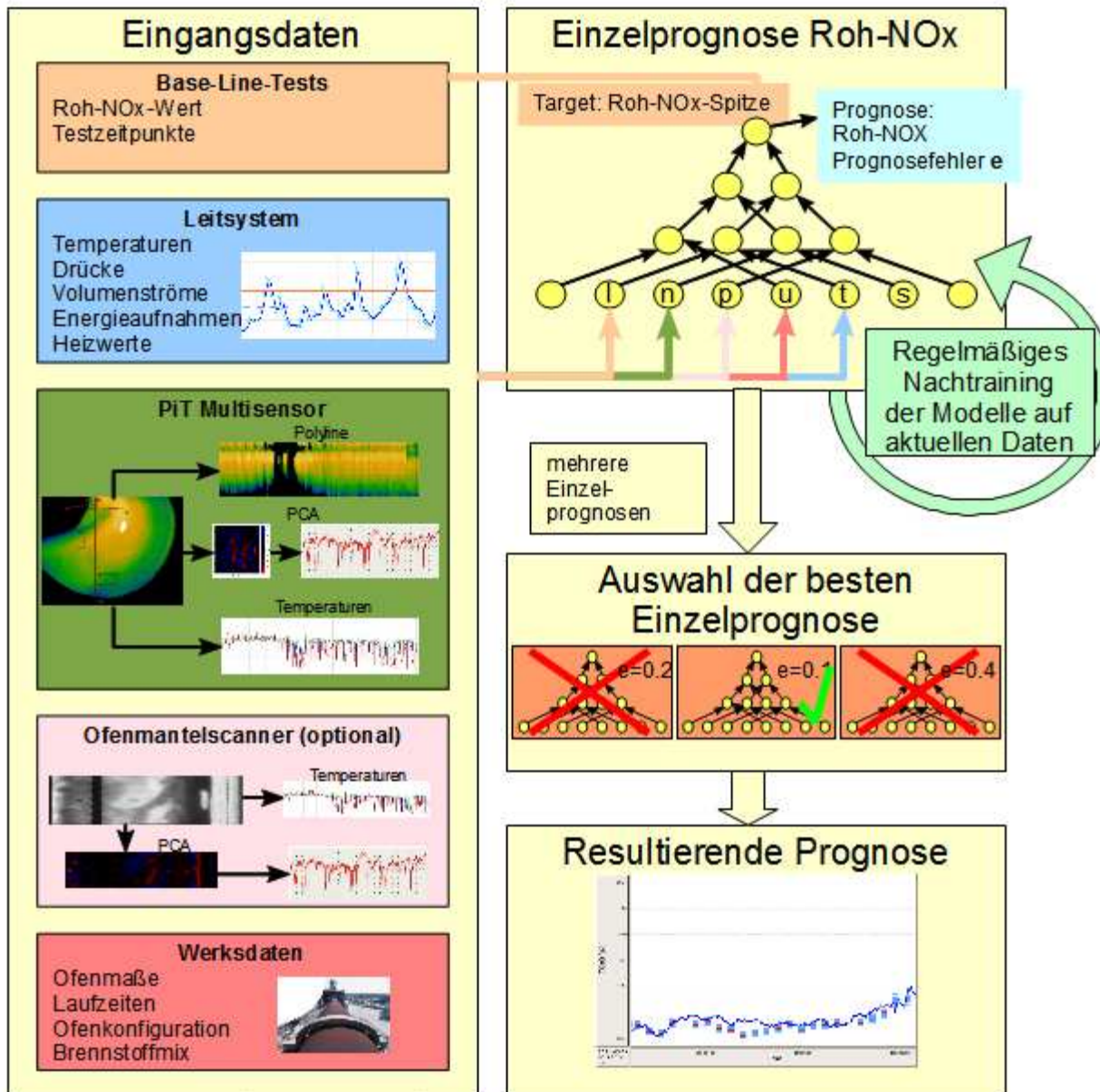


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Funktionsweise des NO_x-Softsensors zur NO_x-Prognose (PiT Predictor NO_x). In der resultierenden Prognose zeigt die durchgehende blaue Linie die kontinuierliche NO_x-Prognose und die quadratischen Punkte die diskontinuierlich gemessenen Einzelwerte

Bestandteil dieses Soft-Sensors ist zudem ein automatisches Base-Line-Modul, welches unter strengen Rand- und Abbruchbedingungen die Reduktionsmittelzufuhr einstellt, um Roh-NO_x- und Base-Line-Schlupfwerte zu ermitteln, welche zum Training des Soft-Sensors verwendet werden.

Um verschiedene Betriebszustände und die zur Verfügung stehenden Eingabedaten zu berücksichtigen, werden mehrere Prognosemodelle trainiert und das Modell mit der jeweils besten Prognosequalität gewählt.

Sich ändernde Prozesszustände, variierende Brennstoffqualitäten oder auch bauliche Veränderungen am Ofen bedingen es, dass die Prognosemodelle ständig nachtrainiert und somit auf dem neuesten Stand gehalten werden.

Das automatische Nachtraining führt der PiT Predictor für alle Prognosemodelle täglich einmal selbständig auf aktuellen Prozessdaten durch. Nach dem Training werden die Prognosefehler des alten und neuen Netzes automatisch verglichen. Bei einer Verbesserung wird das laufende durch das neu trainierte Netz ersetzt. Somit adaptieren sich die Netze jederzeit selbständig an neue Prozesssituationen und müssen nicht manuell angepasst werden.

3.6. Intelligente Regelung

Die intelligente Regelung hat verschiedene Modi. Nach einer kurzen Einführung in diese Systematik wird der eigentliche high-efficiency-Regler detaillierter vorgestellt.

3.6.1. Verschiedene Modi der Regelung

Die STEAG Powitec SNCR Regelung kann in verschiedenen Zuständen betrieben werden. Die Zustände „Aus“, „Manueller Fallback (Notbetrieb)“ und „SNCR-Regelung durch ILC“ kann über die Benutzeroberfläche im Leitsystem geschaltet werden; die Zuschaltung der beiden Modi „he-Regelung“ und „Base-Line-Test“ wird automatisch durch das System selbst gesteuert.

- Notbetrieb:
Sollte es zu einem unvorhergesehenen Störfall kommen, kann dieser Modus im Leitsystem durch den Leitstandfahrer aktiviert werden. Es werden dann alle Sollwertvorgaben der automatischen Systeme ignoriert und die manuell vorgegebene NH₃-Wassermenge auf 4-8 Düsen verteilt.
- SNCR-Regelung durch ILC:
Dieser Regelungsmodus stellt einen automatischen Notbetrieb für den Fall bereit, dass die he-Regelung keine Bereitschaft meldet oder die Schnittstelle zwischen System-Server und Leitsystem ausfällt. Es wird anhand eingelesener Ist- und Sollwerte mittels klassischer PID-Regelung auf der ILC selbst die benötigte NH₃-Wassermenge berechnet. Die Einzeldüsenauswahl wird dabei per Prioritätenliste realisiert. Um eine möglichst hohe Ausfallsicherheit zu erreichen ist dieser Modus robust gegenüber dem Ausfall einzelner Prozessgrößen entworfen.
- he-Regelung:
Der Modus high efficiency Regelung (he-Regelung), wird automatisch durch die SPS aktiviert, sobald das Bereitschaftssignal gesetzt wird. Dazu müssen sich die relevanten Messwerte vorhanden und innerhalb der definierten Grenzen befinden und alle Systeme verfügbar und bereit sein. Dabei müssen nicht zwingend alle Düsen verfügbar sein, sondern die he-Regelung kann auch mit einer Teilmenge funktionsfähiger Düsen arbeiten.

Die Vorgaben der he-Regelung für Einzelmengen für Reduktionsmittel und Luft werden dann von der Modbus-Kopplung übernommen und durch die Klappenstellungsregler der Powitec-SPS umgesetzt.

- Base-Line-Test:

Die Ermittlung der aktuellen Roh-NO_x- und Base-Line-Schlupfwerte dient der automatischen Adaptierung des Powitec Systems, im Speziellen dem Nachtraining des Soft-Sensor-NO_x, und liefert Daten für statistische Auswertungen. Ist die h.e. SNCR-Regelung aktiv, kann das automatische Base-Line-Modul unter strengen Rand- und Abbruchbedingungen die Reduktionsmittelzufuhr eine begrenzte Zeit einstellen.

3.6.2. Die he-Regelung

Vor der Verwendung für die heSNCR-Regelung müssen die SPS- und Prozessdaten entsprechend vorverarbeitet werden. Dabei werden Filterroutinen angewendet, um Einflüsse wie z.B. Rauschen, Ausreißer und teilweise fehlerhafte Daten zu minimieren oder Mittelwerte über bestimmte Zeitbereiche (bspw. HMW, TMW) zu ermitteln. Zudem kommen Validierungsroutinen zum Einsatz, welche die Daten (z.B. über Grenzwert oder Vergleich mit anderen Prozessdaten) für ihre Verwendbarkeit im System verifizieren und teilweise Ersatzwerte bereitstellen.

Die he-Regelung hängt in hohem Maße von der Funktionsfähigkeit des Eindüsen-systems ab. Deshalb wird der Zustand der Einzeldüsen und der Reduktionsmittelversorgung fortlaufend überwacht.

Beruhend auf den Prozess- und Modellierungsdaten errechnet ein MIMO-Regler (Multiple Input Multiple Output, Regler mit mehreren Eingangs- und Ausgangsgrößen) als zentraler Bestandteil der he-Regelung die Regelausgaben für die Einzeldüsen. Zielstellung für das Reglersystem ist dabei die Minimierung des Schlupf (basierend auf der Messung am Kamin), die Minimierung des Reduktionsmittelverbrauchs und eine geringe Regelabweichung des gemessenen NO_x-Wertes (WT und Kamin) vom internen NO_x-Soll.

Eine automatische Anpassung (self-tuning) an sich verändernde Prozesszustände durch eine implementierte Adaptivität kommt in einer Vielzahl von Referenzinstallationen zur Anwendung und wurde bereits eingehend in Veröffentlichungen diskutiert².

Die Adativität der he-Regelung ist sowohl durch die Anpassung des Online-CFD-Modells an die realen Gegebenheiten als auch durch die Bestimmung der Reduktionsmittelobergrenze per Roh-NO_x-Prädiktion gewährleistet.

Es werden zudem (teilweise manuell überwachte, teilweise automatisierte) Explorationsfahrten durchgeführt. Dabei finden Versuchsfahrten bezüglich Düsenpriorisierung, Sauterdurchmesser und Einzeldüsen-Maximalmengen statt, deren Ergebnisse automatisch in die he-Regelungsstrategie Eingang finden.

² Beschreibungen der adaptiven closed-loop Regelung komplexer Produktionsprozesse finden sich z. B. in

- 1.) Hanf, Primary NO_x control and reduction
- 2.) Hanf, Feuerungsoptimierung zur NO_x-Regelung
- 3.) Hanf, Primär-NO_x-Regelung und -Einsenkung
- 4.) Hanf, Auto-optimising the kiln
- 5.) Hanf, Intelligent Closed Loop Control of 8000t/d UltraTech Kiln
- 6.) Hanf, Intelligent Optimisation with Powitec
- 7.) Hanf, Schmidt, Gains with Brains
- 8.) Hanf, Non linear Model Predictive Control

Somit ist eine permanente Anpassung an den jeweils aktuellen Zustand, bedingt z. B. durch Prozessveränderungen wie

- wandernde Temperaturen im Eindüsbereich,
- sich verändernde Staublast,
- sich verändernde Anbackungsdicke im Steigschacht, dadurch sich verändernde Temperaturbereiche und Gasgeschwindigkeiten,
- mechanische Veränderung der Düsen,

also einer Anpassung der heSNCR an die Prozessdrift gewährleistet.

4. Ergebnisse

SNCR-Regelung durch die hier beschriebenen Systeme wird mit sehr gutem Erfolg³ bereits seit 2010 im Kraftwerk Fenne (195 MWel) sowie in der Müllverbrennungsanlage Bonn angewendet. Die Mögliche Übertragung dieser Systematik auf den Zementdrehrohrofen wurde erstmals 2011 durch die Dyckerhoff AG getestet. Ergebnisse dieser Installationen sind

- Das Projekt heSNCR für Göllheim Ofen 2 war erfolgreich und erreicht eine Reduzierung des Ammoniakverbrauches von 30%.
- STEAG Powitec erhielt daraufhin Ende April den Folgeauftrag für den Ofen 1 in Göllheim.
- Durch die heSNCR am Ofen 1 in Göllheim konnte der Ammoniakverbrauch beim NO_x- Grenzwert 500 gegenüber der bisherigen Regelung um über 35% reduziert werden. Bei einer, durch den Winterstop bedingten kurzen, sechstägigen Testfahrt konnte auch der NO_x-Grenzwert 200 bei einem NH₃- Schlupf unter 30 erfolgreich eingehalten werden.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse (Abnahmefahrten + Langzeitauswertung) an beiden Öfen, inklusive Herausarbeitung der Unterscheide zwischen den Öfen bzw. der daraus resultierenden Entstickungsproblematiken, wurde in einem Vortrag⁴ von Dr. Markus Pohl veröffentlicht.

Aufgrund der guten Ergebnisse hat STEAG Powitec Anfang 2013 Folgeaufträge für Dyckerhoff Lengerich 4+8 (Kalzinatoröfen) und Dyckerhoff Geseke erhalten. Weitere Betreiber haben bereits Aufträge zur Installation der heSNCR erteilt oder befindend sich in der Vergabephase.

³ Ausführliche Beschreibungen der Ergebnisse finden sich in

- 1.) Hanf, Primary NO_x control and reduction
- 2.) Hanf, Feuerungsoptimierung zur NO_x-Regelung
- 3.) Hanf, Primär-NO_x-Regelung und -Einsenkung

⁴ Vortrag „Optimierte SNCR – Anlage zur NO_x – Minderung“ von Dr. Markus Pohl, Dyckerhoff AG am 10. April 2013 auf dem VDZ Arbeitskreis NO_x-Minderung veröffentlicht.

Literaturverzeichnis:

- 1.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Primary NO_x control and reduction in combination with online 3D-temperature controlled SNCR in a 576 t/h hard coal fired steam generator; VGB; May 2012
- 2.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Feuerungsoptimierung zur NO_x-Regelung und temperaturgeführte SNCR im steinkohlebefeuerten Großkraftwerk; Haus der Technik, March 2012
- 3.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Primär-NO_x-Regelung und -Einsenkung in Kombination mit - durch Online-CFD - temperaturgeführter SNCR im steinkohlebefeuerten Großkraftwerk; Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden, Dez. 2011
- 4.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Auto-optimising the kiln, International Cement Review,
- 5.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Switching to Side View, World Cement 08/2010
- 6.) Dominik Stettler, Märker Zement GmbH & Alexander Hanf, Powitec International Cement Review 03/2010: Controlling the burn,
- 7.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Intelligent Closed Loop Control of 8000t/d UltraTech Kiln International Cement Review, April 2009
- 8.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany German High Tech Thermography to increases alternative fuel usage Global Cement Magazine, April 2009
- 9.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Intelligent Optimisation with Powitec World Cement, April 2009
- 10.) Schaffernicht E., Stephan V., Debes, K., Gross H-M., "Machine Learning Techniques for Selforganizing Combustion Control", Conference on Artificial Intelligence (KI 2009), Sep 2009.
- 11.) 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.
- 12.) Alexander Hanf, Dirk Schmidt, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Gains with Brains, International Cement Review, January 2008
- 13.) Alexander Hanf, Powitec Intelligent Technologies GmbH, Germany Non linear Model Predictive Control Cement Lime Gypsum CLG INTERNATIONAL December 2007
- 14.) Niegowski R., "Selbstorganisierende Merkmalsextraktion durch adaptive Datenfilter", Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Sep 2007.
- 15.) Neuhaus M., "Feature-Selection für nichtlineare Realweltprozesse zur videobasierten intelligenten Feuerungsführung", Diploma thesis Ilmenau University of Technology, Feb 2007.
- 16.) Dr. Markus Pohl, Dyckerhoff AG, „Optimierte SNCR – Anlage zur NO_x – Minderung“, VDZ Arbeitskreis NO_x-Minderung