

## **BETRIEBSOPTIMIERUNG DURCH DEN EINSATZ VIRTUELLER SENSORIK**

### **AM BESPIEL DER LUFTMENGENMESSUNG**

Ismail Korkmaz, Dr. Francesco Turoni, Dr. Michael Haug, Dr. Michael Schreiber<sup>1</sup>

<b>1</b>	<b>MOTIVATION</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>VIRTUELLE SENSORIK</b> .....	<b>2</b>
2.1	Konzept.....	2
2.2	Einsatz im Bereich der Verbrennungstechnik .....	3
2.2.1	Physikalische Luftmengenmessung.....	3
2.2.2	Virtuelle Luftmengenmessung .....	4
<b>3</b>	<b>BETRIEBSOPTIMIERUNG</b> .....	<b>6</b>
3.1	Herausforderung .....	6
<b>4</b>	<b>EINSATZ IN EINER MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE</b> .....	<b>10</b>
4.1	Ausgangssituation.....	10
4.2	Vorgehen .....	11
4.3	Ergebnisse .....	12
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>14</b>

## **1 MOTIVATION**

Abfallverbrennungsanlagen sind anspruchsvollen Herausforderungen ausgesetzt: Ambitionierte Emissionsgrenzwerte, ein wartungsarmer Betrieb mit geringen Betriebskosten und einem maximierten Abfalldurchsatz bei hoher Verfügbarkeit. Für deren Einhaltung und die Umsetzung geeigneter Konzepte und Maßnahmen stehen oft nur begrenzte Ressourcen zur Verfügung.

---

<sup>1</sup> Alle EUtech Scientific Engineering GmbH, Aachen

## **Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung**

Die Verbrennung als zentraler Kraftwerksprozess definiert maßgeblich die Qualität und Effizienz des Betriebs einer Anlage. Die wichtigsten Parameter zur Beeinflussung der heterogenen Verbrennung auf dem Rost sind der Abfallmassenstrom mit einem variierenden Heizwert und Feuchte, die Rostbewegung (je nach verwendetem Rosttyp) und der Primärluftvolumenstrom. Dabei muss der Brennstoffstrom als unkontrollierte Prozessgröße betrachtet werden, auf den die Steuerung des Rosts und der Luftmengen in geeigneter Weise reagiert. Der Messung der einzelnen Luftmassenströme unter dem Rost und deren Steuerung kommt daher eine große Bedeutung zu.

In Abfallverbrennungsanlage kommen Differenzdruck messende Luftmengenmessungen zum Einsatz, die in den Luftleitungen installiert werden. Mittels der so bestimmten Geschwindigkeit und unter Zugrundelegung der Leitungsgeometrie wird die Luftmenge ermittelt. Diese Art der Messung unterliegt jedoch Störfaktoren, die eine zuverlässige Messung erschweren.

Die Digitalisierung bietet mit einer virtuellen Luftmengenmessung eine neue, sehr zuverlässige und kostengünstige Lösung, um die Luftmengen in den verschiedenen Rostbereichen dauerhaft zu messen und zu steuern. Diese Lösung erlaubt es, die physikalisch messende Sensorik kontinuierlich zu überprüfen und zu korrigieren (Ersatzwerte), bzw. diese komplett zu ersetzen. Insbesondere in Rostfeuerungen mit nicht idealen Messrandbedingungen ist die virtuelle Luftmengenmessung die einzige Möglichkeit einer zuverlässigen Messung der Luftverteilung.

## **2 VIRTUELLE SENSORIK**

### **2.1 KONZEPT**

Das Konzept der virtuellen Sensorik, auch Softsensoren genannt, ist in der Prozess- und Automobiltechnik weit verbreitet. Immer dort wo die benötigte Messgröße nicht direkt bestimmt werden kann, kommen virtuelle Sensoren zum Einsatz.

Nicht nur die Umgebungsbedingungen kann den Einsatz von physikalischen Sensoren verhindern, sondern auch die Prozessgeschwindigkeit. Kein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor kommt heute ohne einen virtuellen NO<sub>x</sub>- oder Russensor aus, die dem Steuergerät in jedem Verbrennungszyklus in Echtzeit die notwendigen Informationen zur Bestimmung der optimalen Einspritzmenge bereitstellen. Informationen, die in Echtzeit durch keine verfügbare Messtechnik bereitgestellt werden können. Die sogenannte Lambdasonde dient der Sauerstoffkonzentrationsmessung. Sie misst den Restsauerstoffgehalt im Abgas. Mit diesem Messwert bestimmt die Motorsteuerung die optimale Brennstoff-Luft Zusammensetzung und regelt die Kraftstoff-Einspritzmenge. Aufgrund der Trägheit des Messverfahrens und sich ändernden Drehzahlen muss die Motorsteuerung mehrmals und innerhalb von Millisekunden die optimale Einspritzmenge ermitteln. Dazu wird ein Modell in der Motorsteuerung hinterlegt. Umgebungsbedingungen, Lastzustand, Restsauerstoffgehalt und Motordrehzahl fließen dabei in die Berechnung der Kraftstoffeinspritzmenge ein.

Neben der Ermittlung von Zielgrößen, werden virtuelle Sensoren eingesetzt, um eine Reihe unterschiedlicher Probleme zu lösen, wie z. B. die Sicherung von Messsystemen, Was-wäre-wenn-Analysen, Echtzeitvorhersagen für die Anlagensteuerung, Sensorvalidierung und Fehlerdiagnosestrategien. [1]

## **2.2 EINSATZ IM BEREICH DER VERBRENNUNGSTECHNIK**

In kraftwerkstechnischen Anwendungen kommen virtuelle Sensoren zur Bestimmung von Größen wie der Feinheit der Festbrennstoffpartikel beim Mahlprozess von Mühlen oder den Temperaturen an schwer zugänglichen Orten oder der Bestimmung von Heizwerten zum Einsatz.

Auch bei der Bestimmung der Luftmengenverteilungen für alle Luftströme (Primär-, Sekundär- und Ausbrandlüfte). Insbesondere bei Kesselkonstruktionen, bei denen der Einsatz von physikalischen Einzelsensoren (z.B. Windboxen) nicht praktikabel ist, kann mit virtuellen Sensoren eine sichere Prozessführung gewährleistet werden.

### **2.2.1 Physikalische Luftmengenmessung**

Die typischerweise eingesetzte, physikalisch messende Luftmengenmessung (Venturidüsen mit Drucksensoren, Elektrostaten etc.) unterliegt im Kraftwerksbetrieb hohen und herausfordernden Anforderungen:

#### **Messgenauigkeit**

Physikalische Luftmengensensoren weisen einen limitierten Messbereich mit nachgewiesener Genauigkeit auf. Außerhalb dieses Messbereichs sind die Messwerte häufig wenig belastbar. Die erreichbare Messgenauigkeit dort hängt in starkem Maß von der korrekten Einbausituation und der Verschmutzungssituation ab. Durch die Dynamisierung der Fahrweise der Kraftwerke und transiente Zustände werden weite und dynamische Messbereiche erreicht, die von physikalisch messenden Sensoren schwer abgedeckt werden. Im unteren Messbereich kommt es zu hohen Messabweichungen.

#### **Einbausituation**

Durch ihre Funktionsweise benötigen physikalische Luftmengensensoren Bauraum, der in einzelnen Luftleitungen nur schwer oder gar nicht bereitgestellt werden kann. Eine Installation in beengten Verhältnissen, wie unter dem Rost oder in Windboxen, ist sehr aufwändig. Die Installation in den Sekundär- und Tertiärlüften ist häufig aufgrund fehlenden Bauraums nicht möglich. Für Wartungs- und Reinigungszwecke ist zudem eine dauerhafte Zugänglichkeit zu gewährleisten. Diese Anforderungen führen dazu, dass häufig die vom Hersteller spezifizierten Einbaubedingungen nicht eingehalten werden können.

#### **Installationskosten**

Die Vielzahl von Luftleitungen hat eine hohe Anzahl von Messsensoren zur Folge. Nicht nur deren Kosten, sondern auch deren bauliche Anforderungen führen zu einer kostenintensiven Gestaltung der Einbauorte, insbesondere an schwierig zugänglichen Orten wie in Windboxen oder unter Rosten. Diese Randbedingungen haben über die reine Sensorkosten hinaus hohe Installationskosten zur Folge.

# Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

## Wartung und Instandhaltung

Partikelbeladene Rauchgase führen zudem zu Verschmutzungen, die die Messgenauigkeit beeinträchtigt. Eine regelmäßige Wartung und Reinigung der Sensoren sowie die Sicherstellung der Messgenauigkeit (Kalibrierung) sind Aufwände, die zu den Betriebskosten und damit wesentlich zu den „total cost of ownership“ beitragen. In den Fällen, in denen eine Reinigung und Kalibrierung während des Betriebes nicht möglich sind, müssen auch die Folgen eines nicht optimalen Betriebs (Sensordrift) und deren Auswirkungen auf die Verbrennung (u.a. Emissionen) betrachtet werden.

## 2.2.2 Virtuelle Luftmengenmessung

### Lösungsansatz

Virtuelle Sensoren oder Softsensoren bieten eine attraktive Alternative zu physisch messenden Sensoren. Sie basieren auf mathematischen Modellen, die mit redundant verfügbaren Messgrößen, die gewünschte Zielgröße in Echtzeit bestimmen können. Zielgröße kann dabei eine physikalische Größe, ein Kennwert, eine Tendenz oder aber auch ein abstrakter Wert (z.B. Qualität) sein.

Abbildung 1 zeigt die Konzeption/Funktion eines Softsensors.

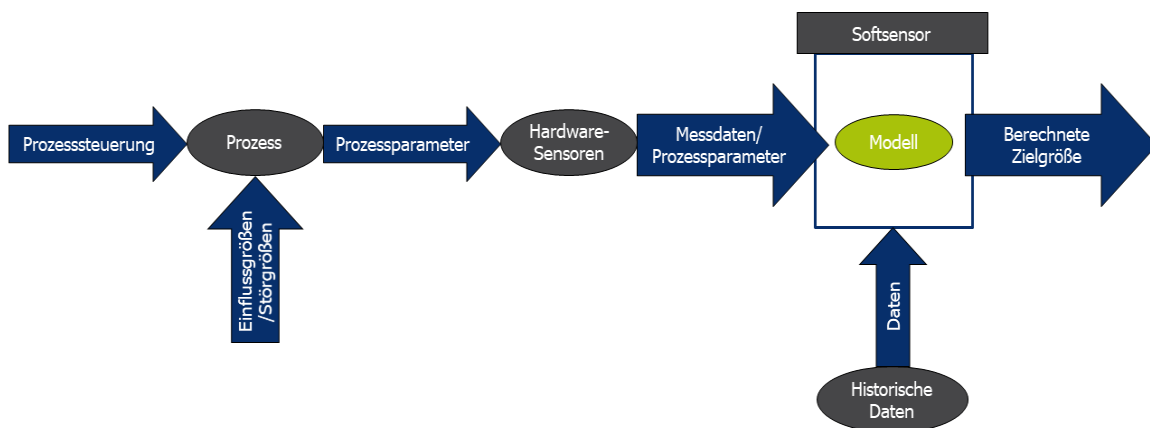


Abbildung 1 – Konzeption Softsensor

Mit EUsoft air steht eine in zahlreichen, unterschiedlichen Anwendungen erprobte Luftmengenmessung für alle Luftstrecken (primär, sekundär, tertiär) zur Verfügung, ob in Windboxen, Luftkanälen mit schwierigen Geometrien oder als Primärluftmessung unter dem Rost in Müllverbrennungsanlagen. Gestützt auf redundante Betriebsmessungen und einem robusten Modell, das fortlaufend überprüft und angepasst wird.

Das systematisch datenbasierte Vorgehen bei der Implementierung des virtuellen Luftmengen-Sensors EUsoft air zeigt Abbildung 2.

## Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

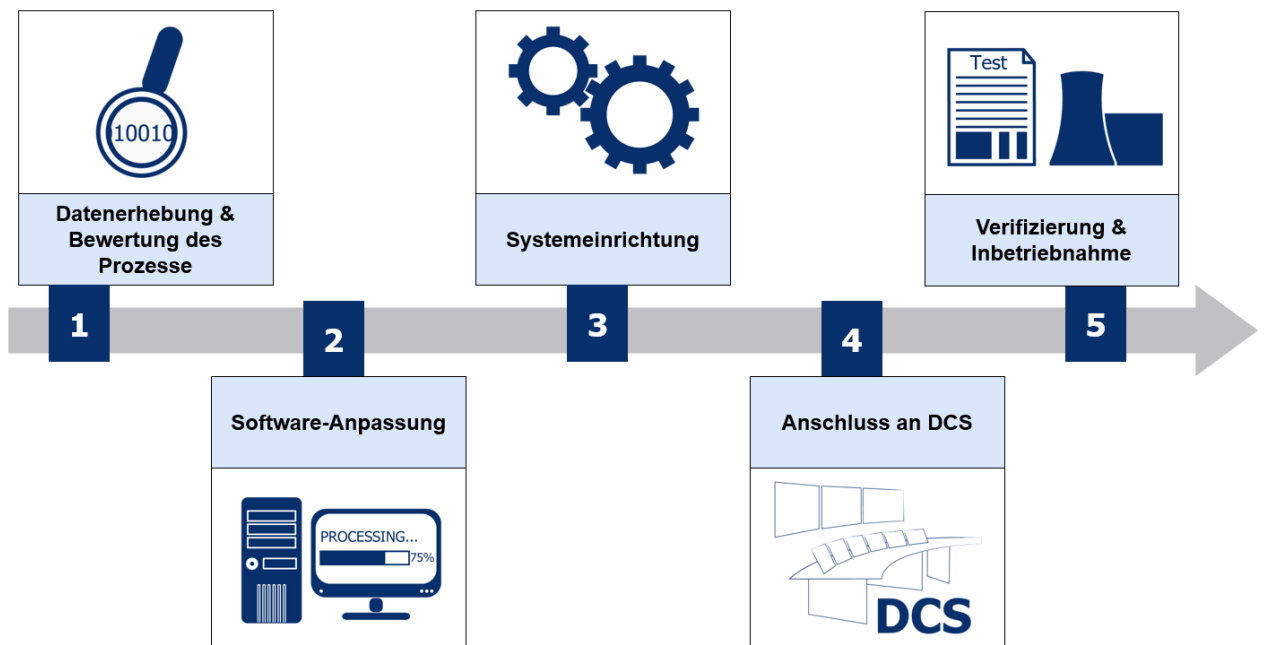


Abbildung 2 – Umsetzung EUsoft Air Sensor

Bei der Umsetzung wird auf Daten der Leittechnik oder einer Prozessdatenbank zurückgegriffen, die in einem Zusammenhang mit der Zielgröße stehen und Einfluss auf diese haben. Die Überprüfung der Datenkonsistenz und -qualität sowie die Identifikation der Sensitivität und Wirkung sind die ersten Schritte bei der Erstellung des Sensors. Zudem werden die Strukturinformationen aufgenommen und verfügbare historische Daten analysiert und bewertet. Dazu steht eine Werkzeugkette zur Verfügung, die ein bestehendes Basismodell (Bibliothek von Systemkomponenten) an die spezifische Einsatzsituation anpasst.

Mit einer statistisch optimalen Vorgehensweise zur Identifikation der Zusammenhänge wird möglichst viel Information mit wenig Aufwand im Betrieb ermittelt. Dabei werden gezielt die relevanten Größen systematisch variiert. Dieses Vorgehen ist systematisiert und kann effizient in kurzer Zeit durchgeführt werden.

Für die Modellbildung und -verifikation werden spezifische Datensätze erstellt. Die gewählte Modellstruktur garantiert inhärente Stabilität und Plausibilität. Mit ausgewählten historischen Daten wird das adaptierte Sensormodell trainiert und Parameter angepasst. Mit Referenzdaten wird die Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit des Sensors überprüft. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass z.B. die Interaktion von Luftklappen im gesamten Betriebsbereich korrekt wiedergegeben und eine hohe Messgenauigkeit gewährleistet wird.

Die Überprüfung des Sensors erfolgt am Rechner mit einem Kraftwerksmodell, das anhand von Daten identifiziert und parametrisiert wird. Damit kann das Sensorverhalten bereits bei der Erstellung und vor der Implementierung überprüft werden. Aber auch nach der Implementierung auf einem autonom arbeitenden, leittechnikkompatiblen Rechner die reale Schnittstelle getestet werden. Typischerweise kommen Standardschnittstellen wie Profinet/-bus oder Modbus TCP IP zum Einsatz, über die der

## **Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung**

definierte Signalaustausch und die Anbindung des Sensors an die Prozessleittechnik erfolgt. Alternativ kann der Sensor auch direkt als logischer Baustein in die Leittechnik integriert werden und greift dort unmittelbar auf die Betriebsdatenschnittstelle zu.

Durch die volldigitale Vorgehensweise, die rechnergestützte Parametrierung und Implementierung wird eine sehr hohe Zuverlässigkeit des Sensors erreicht. Mit Hilfe einer implementierten Eigenüberwachung und einer Plausibilitätsprüfung können viele Fehlersituationen/Störungen bereits ohne den realen Betrieb geprüft oder durch die Adaptivität des Sensors vermieden werden.

### **Systematische Vorteile und Mehrwert der virtuellen Luftmengenmessung**

Die beschriebene Vorgehensweise löst einige der zentralen Betriebsprobleme der physikalisch messenden Sensoren.

Die Flexibilität und der geringe Aufwand bei der Implementierung, aber insbesondere die hohe Mess- und Betriebssicherheit sowie die geringen Installations- und Wartungskosten zeugen von den systematischen Vorteilen dieser Lösung. Vor allem die hohe Genauigkeit bei niedrigen Lasten ermöglicht dort einen stabilen Betrieb, der anderenfalls nicht möglich wäre. Die Selbstüberwachung des Sensors durch Plausibilitätschecks und die Adaptivität machen den Sensor sehr zuverlässig. Regelmäßige Reinigung oder Kalibration sind nicht erforderlich.

Die Sensoren tragen so wesentlich zu einem sicheren Betrieb der Verbrennungssteuerung bei – entweder als im Hintergrund arbeitende Messung, die frühzeitig eine fehlerhafte physikalische Messung identifiziert und damit langandauernde fehlerhafte Einstellungen des Brennstoff-Luftverhältnisses vermeiden oder als direkter Ersatz der Sensoren, um im gesamten Betriebsbereich der Feuerung eine stabile und saubere Prozessführung zu ermöglichen.

Besonders hilfreich hat sich die virtuelle Messung auch bei der Fehleranalyse und der Prozessoptimierung erwiesen. Auch ohne eine direkte Anbindung an die Leittechnik können so fehlerhafte Messungen identifiziert und optimierte Einstellungen ermittelt werden.

## **3 BETRIEBSOPTIMIERUNG**

### **3.1 HERAUSFORDERUNG**

Um den Verbrennungsprozess lastabhängig zu regeln, wird die Brennstoffmenge entsprechend der Last eingestellt und die Verbrennungsluftmenge abhängig einer vorgegebenen Stöchiometrie nachgeregelt. Bei einem Brennstoff wie Abfall mit unbekanntem Heizwert, Dichte und Feuchte stellt dies eine große Herausforderung dar. Da das Brennstoff-Luft-Verhältnis (Abbildung 3) den Verlauf und die Qualität der Verbrennung und des Ausbrands maßgeblich beeinflusst und auf die Zusammensetzung des Brennstoffs kein Einfluss genommen werden kann, ist die Luftmenge von zentraler Bedeutung.

## Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

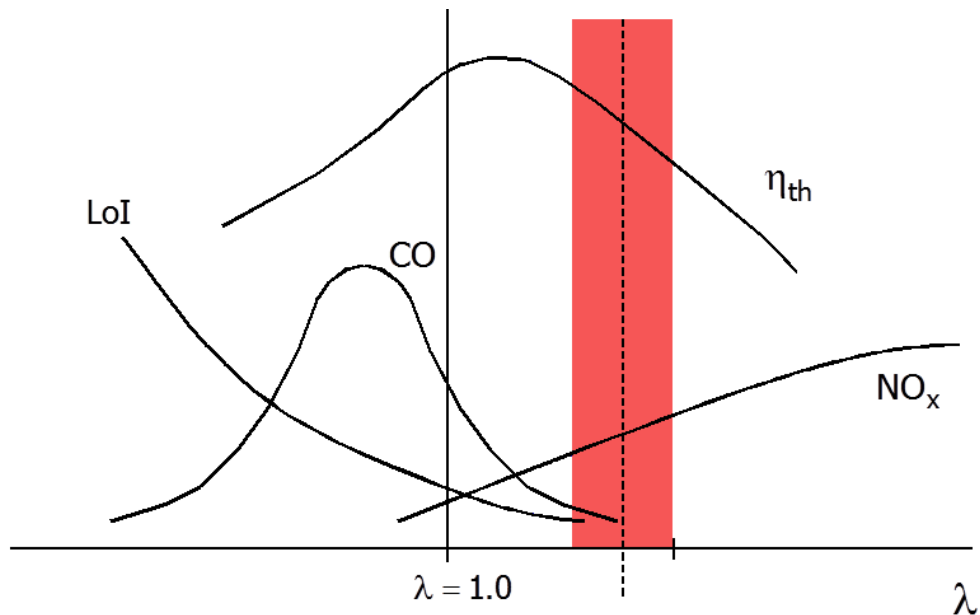


Abbildung 3 – Luft-Brennstoffverhältnis und seine Auswirkung

Die genaue Zuführung der Luftmengen in der Abfallverbrennung mit sich stetigen ändernden Brennstoffverhältnissen (Qualität, Feuchte etc.) stellt die zentrale Herausforderung bei der Feuerungsführung dar. Starke Abweichungen vom theoretischen Luftbedarf in den verschiedenen Verbrennungsphasen haben große Auswirkungen auf die lokalen Verbrennungsverhältnisse, Temperaturen und Emissionen (Abbildung 4).



Abbildung 4 – Einflussgrößen und resultierende der Verbrennung

## Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

Alle Abweichungen und Unzulänglichkeiten bei der Prozessführung wirken sich unmittelbar auf die nachgelagerten Prozesse aus. Verschmutzung, Schieflagen, Emissionen, Hochtemperaturkorrosion, unzureichender Ausbrand oder zu hoher Luftüberschuss und damit geringe Effizienz und hohe Betriebskosten sind die Folge. Dabei ist die Temperaturentwicklung und -verteilung ein wichtiger Indikator zur Güte der Prozessführung. Nahezu alle typischen Betriebsprobleme stehen mit der Temperatur in Verbindung (Abbildung 5).

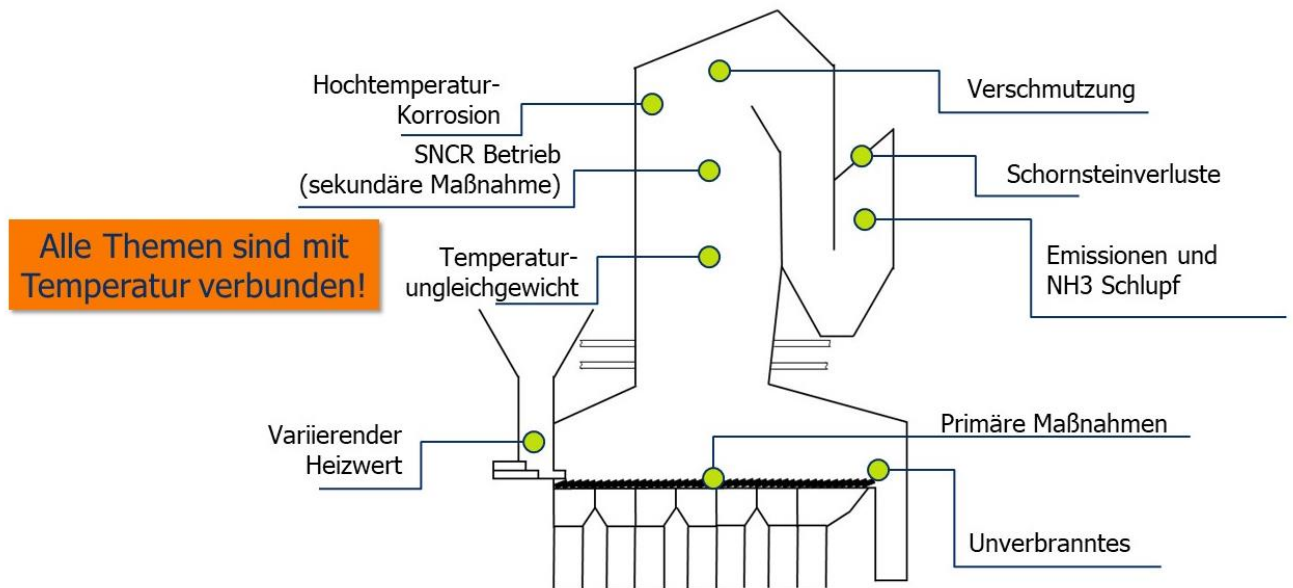


Abbildung 5 – Herausforderungen einer Rostfeuerung

Die Optimierung der Prozessführung konzentriert sich auf relevanten Einflussgrößen, mit denen gezielt entweder direkt Einfluss auf den Entstehungsprozess bzw. indirekt zur Optimierung eingegriffen werden kann. Dazu gehören:

### Primäre Maßnahmen

Unter Primärmaßnahmen versteht man die gezielte Ansteuerung und Änderung der Parameter, die einen direkten Einfluss auf die Verbrennung haben. Neben der Brennstoffzusammensetzung und der Verteilung und Bemessung der Luftmenge kann über den Vorschub und die Rostgeschwindigkeit auf den Verbrennungsverlauf Einfluss genommen werden. Je nach Zusammensetzung und Beschaffenheit des Brennstoffes kann es dabei zu einem Konflikt zwischen erforderlicher Rostgeschwindigkeit und gewünschter Durchsatzleistung kommen.

Die gezielte Steuerung der Luftmengen in den verschiedenen Rostzonen ist daher die wirksamste Maßnahme zur Erzielung einer sauberen und vollständigen Verbrennung. Üblicherweise folgt die Steuerung der Luftmengen der Menge und Beschaffenheit des Brennstoffs. Eine individuelle Anpassung an lokale Änderungen des Heizwerts und der Menge ist in den meisten Prozesssteuerungen nicht möglich [2]. Dabei hat eine Vertrimmung der Lüfte wesentlichen Einfluss auf die Verbrennung und die nachfolgenden Prozesse. Dies setzt jedoch eine Luftmengenmessung voraus, die sehr zuverlässig und beständig im gesamten Betriebsbereich zur Verfügung steht.



## **Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung**

### **Sekundäre Maßnahmen**

Sekundärmaßnahmen wirken den Ursachen der schlechten Verbrennung nicht entgegen, sondern korrigieren nachträglich, um insbesondere die Schadstoffbelastung der Abgase innerhalb zulässiger Grenzwerte einzuhalten. Die dabei eingesetzten Maßnahmen wie Entstickungsanlagen und deren Effizienz sind in hohem Maße von den vorherrschenden Randbedingungen und der bedarfsgerechten Dosierung abhängig. Idealerweise werden diese Maßnahmen in Verbindung mit optimierten primären Maßnahmen umgesetzt, die für die Einhaltung optimaler Randbedingungen wie zum Beispiel der Einhaltung einer homogenen Temperaturverteilung und Einhaltung des richtigen Temperaturbereichs sorgen. Auf diese Weise wird eine Eindüsung in zu kalte und zu heiße Bereiche und ein  $\text{NH}_3$  Schlupf vermieden.

Neben den Emissionen spielen die Einhaltung von Prozessgüteparametern wie Ausbrand und Luftüberschuss, aber auch Randbedingungen wie die Temperaturverteilung und der Einhaltung von Grenztemperaturen eine wichtige Rolle in der Prozessoptimierung.

### **Ausbrand**

Nicht komplett ausgebrannter Brennstoff hat Auswirkungen auf die Nutzungsmöglichkeiten der Asche, zugleich bedeutet aber ein zu hoher Luftüberschuss eine geringe Prozesseffizienz. Idealerweise wird eine gerade vollständige Verbrennung auf dem Rost angestrebt.

### **Temperaturverteilung**

Hotspots nahe den Kesselwänden sorgen für thermischen Stress des Materials, sind aber zugleich auch Indikatoren einer ungleichmäßig verlaufenden Verbrennung. Für den Einsatz einer SNCR Anlage bedeutet es die Anforderung, die passende Menge Additive bzw. Kühlwasser in der richtigen Zone und Ebene einzudüsen. Mit einer Vergleichmäßigung der Temperaturen und Einhaltung des optimalen Temperaturfensters können resultierende Probleme und der zu treibende Aufwand zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten minimiert werden.

### **Hochtemperaturkorrosion**

Zu hohe Rauchgastemperaturen in Verbindung mit einer unvollständigen Verbrennung ( $\text{CO}$ ) sind Ursache für die Korrosion an den Kesselwänden und an den Wärmetauschern, deren Verschleiß teure Erhaltungsmaßnahmen zur Folge haben.

### **Verschmutzung und Verschlackung**

Durch die Überschreitung des Ascheschmelzpunktes und einer unvollständigen Verbrennung von Festbrennstoffpartikeln kommt es zu Verschmutzungen und Verschlackungen, die sich negativ auf die Effizienz des Wärmetausches und einer Verschiebung der Wärmeauskopplung auswirken. Die Verminderung des Wirkungsgrads (Wärmeverluste) wird zudem durch die erforderliche Reinigungsmaßnahmen verstärkt.

### **Schornsteinverluste**

Inwieweit sich die vorher beschriebenen Probleme auf die Wärmeauskopplung oder die Wärmeübertragungsverluste und dem Wirkungsgrad auswirken, zeigt sich in einem Anstieg der Abgastemperatur im Schornstein.

## **4 EINSATZ IN EINER MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE**

### **4.1 AUSGANGSSITUATION**

Am Beispiel einer Abfallverbrennungsanlage mit zwei Linien mit einer Kapazität von über 1,7 Mio t/a und 980.000 MWh elektrischer Energie pro Jahr wird das Potential der Prozessoptimierung mit Hilfe der virtuellen Sensorik veranschaulicht.

Die bestehende Entstickungsanlage kann die vorgegebenen Grenzwerte nur unter großen Schwierigkeiten einhalten. Zukünftige niedrigere Grenzwerte können nicht erreicht werden. Die im Kraftwerk vorliegenden Betriebsmessungen geben keinen Hinweis auf ein außergewöhnliches Verbrennungsverhalten.

Im Rahmen einer Verbrennungs-Analyse bei der ein mobiles 2D Temperaturmesssystem (EUflame 2D) eingesetzt wird, kann eine starke Rauchgastemperaturschiefelage als Ursache des Verhaltens identifiziert werden. Es treten Temperaturunterschiede von bis zu 250 K von der linken zur rechten Kesselseite auf. Diese Schiefelage kann mit der bestehenden Instrumentierung (Deckentemperaturen) nicht identifiziert werden.

Darüber hinaus wechselt der Schwerpunkt der Flamme (Temperaturmaximum) in unvorhersehbaren zeitlichen Abständen die Seite. Das Verhalten wird an beiden Linien in ähnlichem Ausmaß vorgefunden. Diese Schiefelagen in der Rauchgastemperatur verhindern letztendlich einen effizienten und erfolgreichen Einsatz einer DeNOx-Anlage (SNCR). Zudem zeigt sich, dass durch Lastwechsel eine Eindüsung auf unterschiedlichen Ebenen erforderlich ist.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die zweidimensionale Temperaturverteilung im ersten Zug einer Linie. Das System basiert auf zwölf EUflame Temperatursensoren (Linienmessung), die an gezielten Öffnungen installiert werden und eine Bestimmung der Temperaturverteilung in Echtzeit ermöglichen.

Es ist augenfällig, dass große Bereiche (>50 %) für eine Eindüsung von Additiven nicht zur Verfügung stehen und damit eine zu geringe Abdeckung mit einem hohen NH<sub>3</sub> Schlupf die Folge sind. Zur Einhaltung eines Grenzwertes von 70 mg/m<sup>3</sup>, ist eine Optimierung der Feuerung und eine Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung erforderlich.

# Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

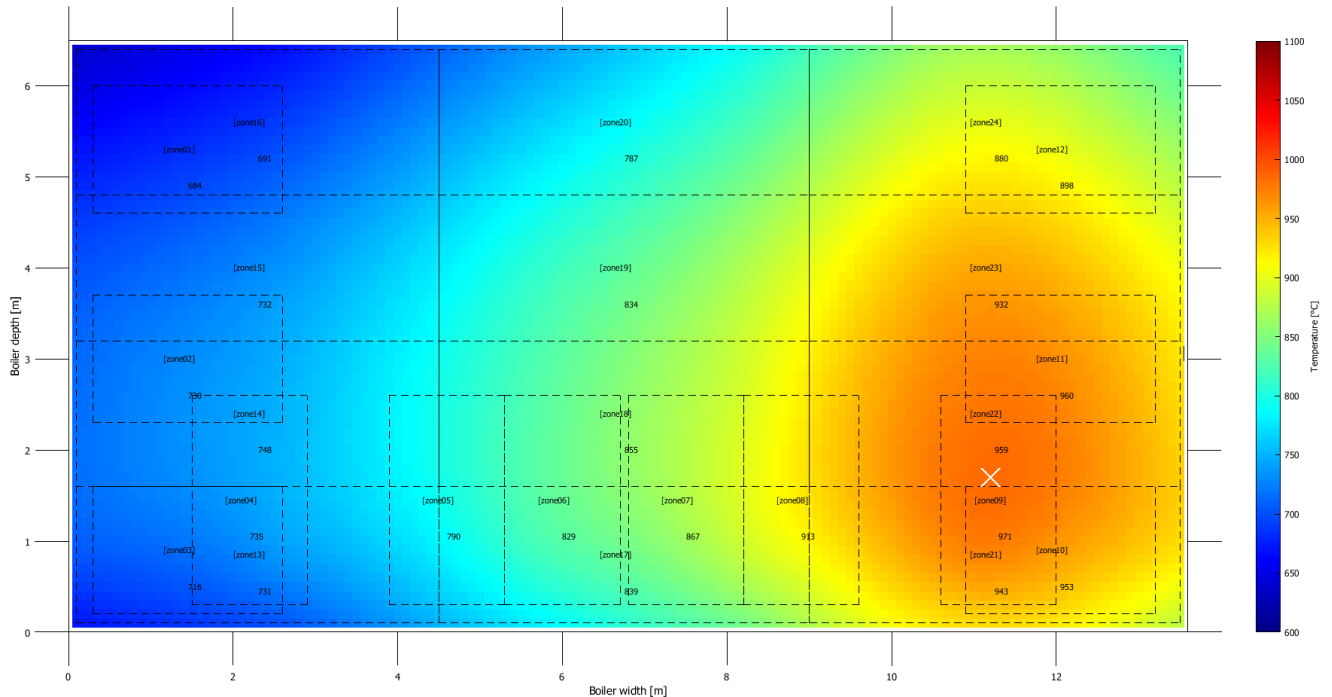


Abbildung 6 – Temperaturverteilung im Kesselquerschnitt einer Müllverbrennungsanlage (EUflame 2D)

## 4.2 VORGEHEN

Die Identifikation der Ursache der Schief lagen und die Steuerung der Luftmengen zur Einhaltung einer optimalen Temperaturverteilung ist Grundvoraussetzung für den effizienten und wirksamen Betrieb der DeNOx-Anlage.

Zur Überprüfung der Steuerung kommt die virtuelle EUsoft air Luftmengenmessung für alle relevanten luftführenden Leitungen zum Einsatz. Dazu wird entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise die virtuelle Sensorik auf Basis redundanter Betriebsdaten parametrisiert. Die virtuellen Sensoren können bei Anbindung an die Prozessdaten unmittelbar einzelne Luftmengen ermitteln, natürlich auch dort wo keine realen Sensoren eingebaut sind.

Im vorliegenden Fall wurde ein System mit 21 Primärluftsensoren, zwei Sekundärluftsensoren und vier Tertiärluftsensoren appliziert. Die Inbetriebnahme und die Anbindung an die Leittechnik erfolgen im laufenden Betrieb.

Abbildung 7 zeigt die Bedienoberfläche und Anzeige der virtuellen Luftmengenmessung sowie die Statusüberwachung.

Um eine direkte Analyse des Einflusses der Luftmengen und Sensitivität auf den Verbrennungsvorgang zu ermöglichen, steht die zweidimensionale Temperaturmessung zur Verfügung. Ziel dieser Konfiguration ist zum einen die Identifikation von Fehlmessungen, der Auswirkungen von Korrekturmaßnahmen sowie der Nachweis der Wirksamkeit der angestrebten Prozessoptimierung, die anhand von Betriebsdaten nachgewiesen werden kann.

# Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

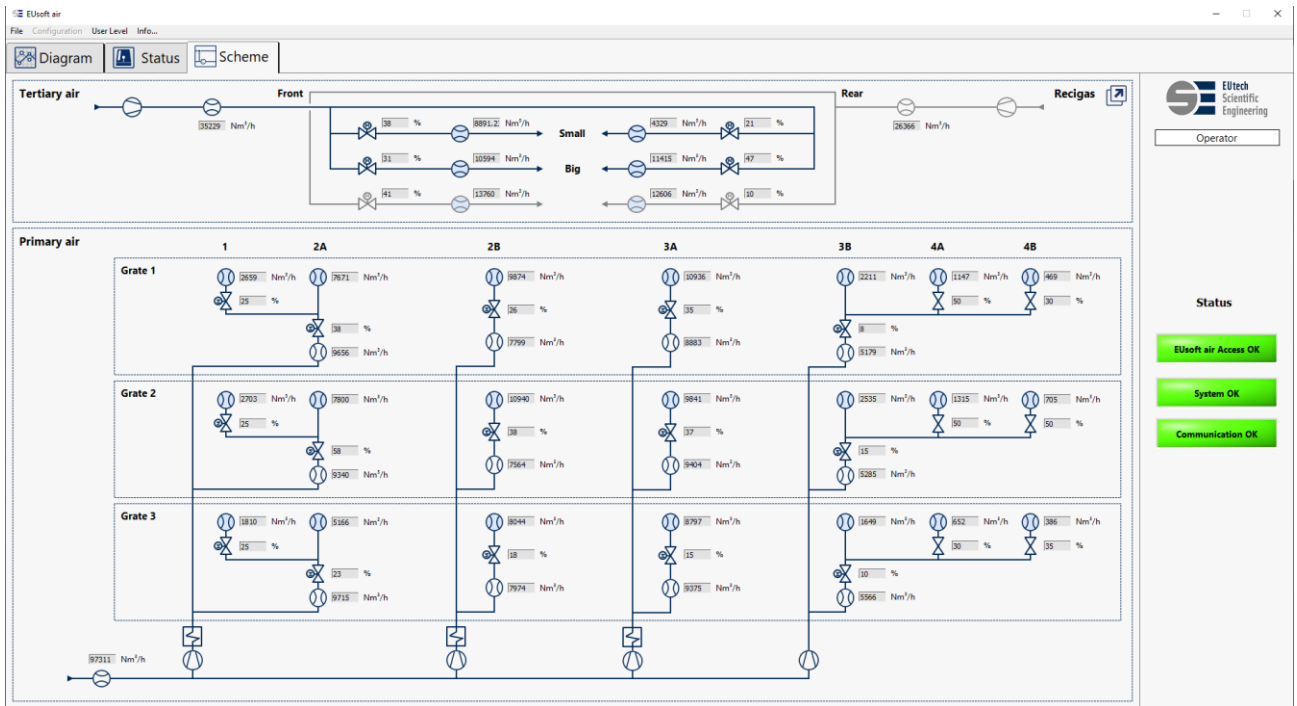


Abbildung 7 – Übersicht Luftmengenverteilung (Benutzeroberfläche EUsoft air)

## 4.3 ERGEBNISSE

Bei der Analyse der virtuell ermittelten Luftmengen und dem Vergleich mit der realen Sensorik fällt auf, dass sich trotz Verstellen von Luftklappen teilweise keine Veränderung der Luftmenge bei der realen Sensorik zeigt, während sich die virtuell bestimmten Luftmengen analog zu den Klappenstellungen verändern. Abbildung 8 zeigt anschaulich das Verhalten.

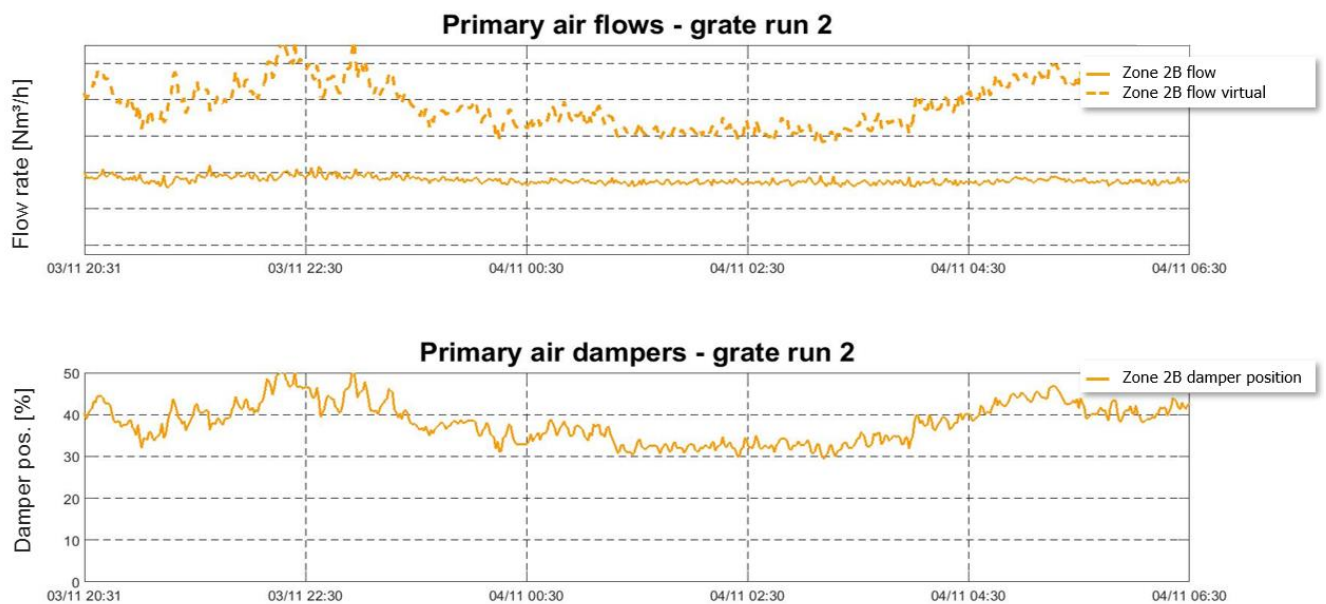


Abbildung 8 – Nachweis der fehlerhaften physikalischen Luftmengenmessung mit Hilfe des virtuellen Sensors (EUsoft air)

## Betriebsoptimierung durch den Einsatz von virtueller Sensorik am Beispiel der Luftmengenmessung

Das untere Diagramm zeigt die Klappenstellung, das obere Diagramm die Luftmengen. Die gestrichelte Linie zeigt den virtuellen Sensorwert, während die nahezu konstant verlaufende Linie den real gemessenen Wert zeigt. Aufgrund der Echtzeitbestimmung ist kein Phasenversatz vorhanden.

Diese Fehlmessung hat große Auswirkungen auf die Regelung und ist mitverantwortlich für die vorherrschende Schiefelage der Flamme im ersten Zug. Die Überprüfung dieser Schlussfolgerung wird durch die Korrektur des fehlerhaften Messwerts in der entsprechenden Zone mit Hilfe des Differenzwerts zum virtuellen Messwert erbracht. Die in Abbildung 6 gezeigte Temperaturschiefelage verschwindet und es zeigt sich (Abbildung 9) unmittelbar über den gesamten Querschnitt erstreckende vergleichmäßigte Temperaturverteilung. Bei einer dauerhaften Korrektur des Luftmengenwertes kann eine stabile Betriebssituation erzielt werden, die sich vorteilhaft auf die gesamte Prozessführung auswirkt.

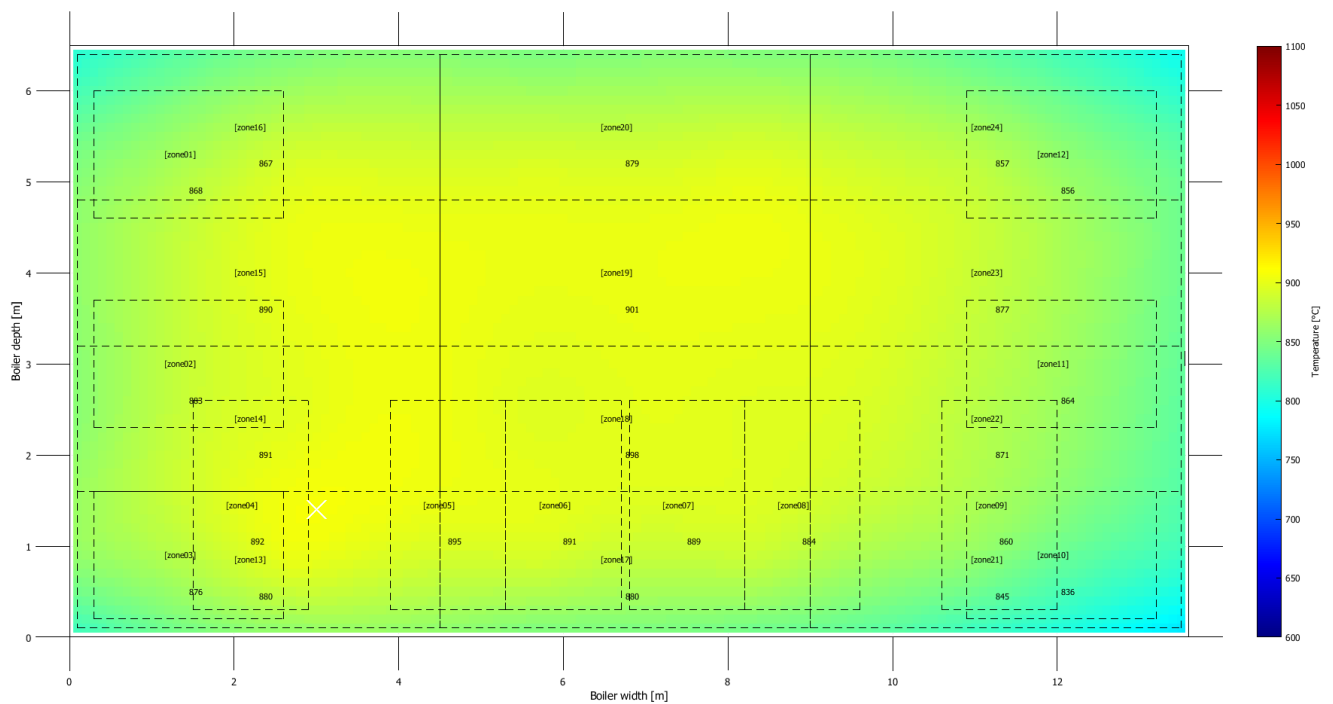


Abbildung 9 – Vergleichmäßigte Temperaturverteilung im Kesselquerschnitt nach Optimierung der Luftmengen

Insbesondere stehen als Folge dieser Korrektur der nachgeschalteten SNCR Anlage in allen Eindüszonen die erforderlichen Temperaturen dauerhaft zur Verfügung, so dass die angestrebten Emissionswerte von  $70 \text{ mg/m}^3$  bei geringen Schlupfmengen erreicht werden können.

## **5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

Die virtuelle Luftmengenmessung ermöglicht die schnelle Überprüfung vorhandener direkt messender Sensorik und identifiziert Falschmessungen. In Verbindung mit der zweidimensionalen Echtzeittemperaturmessung EUflame 2D konnten unmittelbar die Auswirkungen der fehlerhaften Luftmessung auf die Feuerungsregelung nachgewiesen werden. Mit der Nutzung der zuverlässigen Luftmengenmessung konnte direkt die Schiefelage beseitigt werden.

Als Konsequenz des Vorgehens wird die Anlage dauerhaft mit einer virtuellen Luftmengenmessung ausgestattet und so in die Feuerungsleistungsregelung implementiert, dass die virtuellen Messwerte der Regelung zur Verfügung stehen. Auf diese Weise wird vermieden, dass durch Verschmutzung und Fehlmessungen es zu einer Schiefelage im Feuerraum kommt. Durch die Einbindung in die Feuerungsleistungsregelung werden im nächsten Schritt optimierende Maßnahmen zur Einhaltung einer gleichmäßigen und optimalen Temperaturverteilung durchgeführt. Die zweidimensionale Temperaturmessung wird dabei zum einen für einen intelligenten und effizienten Betrieb der SNCR Anlage eingesetzt, zugleich und vor allem für eine optimierte Prozessführung genutzt.

## **6 QUELLENVERZEICHNIS**

[1] Fortuna, L. Graziani, S., Rizzo, A. Xibilia, M.: Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes, Springer Verlag, London, 2007

[2] Klasen, T: Erstellung und Validierung eines mathematischen Modells für die heterogene Verbrennung auf dem Müllrost und dessen Anwendung bei CFD-Simulationen hinsichtlich einer optimierten Feuerungstechnik, Universität-Gesamthochschule Essen Fachbereich 12, Maschinenwesen (Energie-, Maschinen- und Verfahrenstechnik), Mülheim an der Ruhr, 2003

[3] Strauß, K.: Kraftwerkstechnik: zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen, Springer Verlag, New York, Berlin und Heidelberg, 1997

[4] Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen-#siedlungsabfalle-haushaltstypische-siedlungsabfalle>