

# Kopplung einer modernen Feuerungsregelung mit einem modellbasierten System

## – Grenzen und Möglichkeiten

Von:

Martin Zwiellehner, SAR GmbH, Dingolfing  
Dr. Ragnar Warnecke, GKS GmbH, Schweinfurt  
Volker Müller, GKS GmbH, Schweinfurt  
Martin Weghaus, Weghaus GmbH, Würzburg

Anlässlich:

VDI Wissensforum :

Seminar „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in

Großfeuerungsanlagen“

Oberhausen,

12.-13. Juni 2008

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Motivation.....	4
3	Exkurs: Gehobene Methoden der Prozessführung - Advanced Process Control (APC) .....	5
4	Das Feuerungsmodell „Combate“ .....	10
5	Kopplung des Modells mit der Feuerungsregelung .....	13
5.1	Aufbau der Kopplung .....	13
5.2	Kopplungsparameter .....	15
5.2.1	Bereich Rost – Transport + Beschickung .....	16
5.2.2	Bereich Verbrennungsluft.....	20
5.2.3	Input - Brennstoffzusammensetzung.....	21
6	Einsatzmöglichkeiten .....	23
6.1	Offline-Betrieb .....	23
6.2	Online-Betrieb mit Kopplung an Feuerungsregelung.....	23
6.2.1	Simulationsbetrieb .....	23
6.2.2	Kopplung an eine reale Anlage .....	24
7	Weitere Maßnahmen .....	27
8	Ausblick.....	29
9	Literaturverzeichnis.....	30
10	Abbildungsverzeichnis.....	31

# 1 Einleitung

Die GKS – Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH (GKS) betreibt im Grundlastwerk zwei Kohlekesselanlagen (IBS 1990) und drei Müllkesselanlagen (IBS 1994). Aufgabe des GKS ist es, die Fernwärmeversorgung der drei Schweinfurter Großbetriebe und der Stadt Schweinfurt sicher zu stellen. Das Kraftwerk (Kohle und Müll) wird kraftwärmegekoppelt betrieben. In den thermischen Abfallbehandlungsanlagen (MVA) wird der ca. zu 80% Restmüll der kommunalen Anlieferer und 20 % haushaltsähnlicher Gewerbemüll behandelt.

Nach nun mehr als 12 Betriebsjahren der MVA wurde ein Austausch der bestehenden Feuerungsregelung (FR) erforderlich, da im Zuge von zukünftig vorgesehenen Optimierungsmaßnahmen wie Veränderungen im Bereich der Feuerraumgeometrie, der Verbrennungsluftführung und –Mengenströme realisiert werden sollen. Diese Änderungen, die einen erheblichen Eingriff in die Regelstruktur der bestehenden Feuerungsregelung erforderlich machen, ließen sich mit dem bestehenden „Alt“-System aufgrund fehlender Ressourcen und Programmquell-Codes nicht abbilden. Auch war die Ersatzteilverfügbarkeit der sich im Einsatz befindlichen Steuerungshardware nicht mehr gewährleistet und somit sah der Betreiber die Anlagenverfügbarkeit gefährdet.

Die Anforderungen an moderne Feuerungs- bzw. Feuerleistungsregelungen sind hinreichend bekannt: üblicherweise besteht die Aufgabenstellung darin, über den Betriebszeitraum unter Berücksichtigung von allen relevanten Randbedingungen (Heizwert, Zusammensetzung, Bedienpersonal, ..... ) und Störgrößen eine möglichst konstante Wärmeentbindung zu erzielen. Hierbei ist die Einhaltung der von der durch die Feuerung beeinflussbaren Werte (z.B. Emissionswerte wie CO und NO<sub>x</sub> oder Feuerraumtemperaturen) sowie die weitestgehende Vermeidung von Beeinträchtigungen und Schäden für die Anlage (z.B.: Belagsbildung, Korrosion) zu beachten. Für die GKS Schweinfurt GmbH ist es auf Grund des Sammelschienen-Prinzips und dem Schluckvermögen der Turbinen relevant, dass die Anlagen mit einem möglichst konstanten Dampfmassenstrom betrieben werden.

## 2 Motivation

Bei der „alten“ Feuerungsregelung wurde versucht über eine Mittelwertbildung der Hydraulikdrücke im Vor- und Rückhub auf die Schichthöhe des Müllbettes zu schließen. Da sich die Druckverläufe über die Reisezeit verändern und mechanische Einflüsse wie z. B. Buntmetallaufschweißungen auf dem Roststabbrücken, Schwergängigkeiten, Verklemmungen o.ä. wesentlich deutlicher bemerkbar machen als die Schichthöhe, war diese Einflussgröße nahezu zu Null gewichtet.

Da sich die Methode der Schichthöhendetektion über die Hydraulikdrücke als nicht brauchbar erwiesen hatte, wurde nun versucht über die sich ändernde Primärluftpressung im Unterwindtrichter auf die Schichtdicke bzw. auf eine Tendenz zu schließen. Es wurden im Unterwindbereich Druckmessungen installiert, um den statischen Druck im Unterwindtrichter zu messen, da mit dieser Vorgehensweise schon recht gute Erfahrungen gemacht wurden. Leider zeigt auch dieses System zeigt bei den vorhandenen Rosten nicht das gewünschte Ergebnis. Die Drücke die sich einstellten, waren in einem zu kleinen mbar-Bereich um reproduzierbare Rückschlüsse auf die Schichthöhe ziehen und diese regelungstechnisch verwerten zu können.

Somit ist der Schichthöhen-Regelkreis auch bei der neuen Feuerungsregelung nicht aktiv, wenngleich es nach wie vor äußerst interessant erschien, die sich im Moment auf dem Rost befindliche bzw. aufgegebene Schichthöhe zu kennen...

An dieser Stelle wurde die Idee geboren, die Regelgröße „Schichthöhe“ – wenn sie schon nicht messbar sei – über ein Modell berechnen zu lassen und in weiterer Folge innerhalb der Feuerungsregelung einen Regelkreis „Schichthöhenregelung“ aufzubauen, d.h. Einführung einer gehobenen Methode der Prozessführung. Im Rahmen von Advanced Process Control-Maßnahmen wird diese Art der Anwendung als „Soft Sensor“ beschrieben.

### 3 Exkurs: Gehobene Methoden der Prozessführung - Advanced Process Control (APC)

Der inzwischen in der Prozessindustrie eingebürgerte Begriff „Advanced Process Control“ wird im deutschen Sprachraum mit den Begriffen „gehobene Methoden der Prozessführung“ oder genauer „gehobene Regelungsverfahren“ übersetzt. Eine allgemeingültige Definition des Begriffs APC fehlt jedoch, er wird daher subjektiv – abhängig von Ausbildungs- und Erfahrungshintergrund des Anwenders – ausgelegt. In der Literatur wird scherzhaft die Aussage zitiert: *„that an advanced control strategy is any technique which a process engineer has not actually used“* [5].

Fest steht jedoch, dass unter „Advanced Process Control“ nicht einfach eine bestimmte Anzahl von Regelungsstrategien zu verstehen ist, sondern eine auf die Verbesserung der Prozessführung gerichtete Vorgehensweise, die Elemente aus verschiedenen Teilgebieten der Regelungs- und Automatisierungstechnik, Mathematik, Physik und Informatik wie z.B.:

- Theoretische Modellbildung und Simulation,
- experimentelle Prozessidentifikation,
- moderne Regelungs- und Steuerungstechnik,
- angewandte Statistik,
- Fehlererkennung und Diagnose und
- künstliche Intelligenz

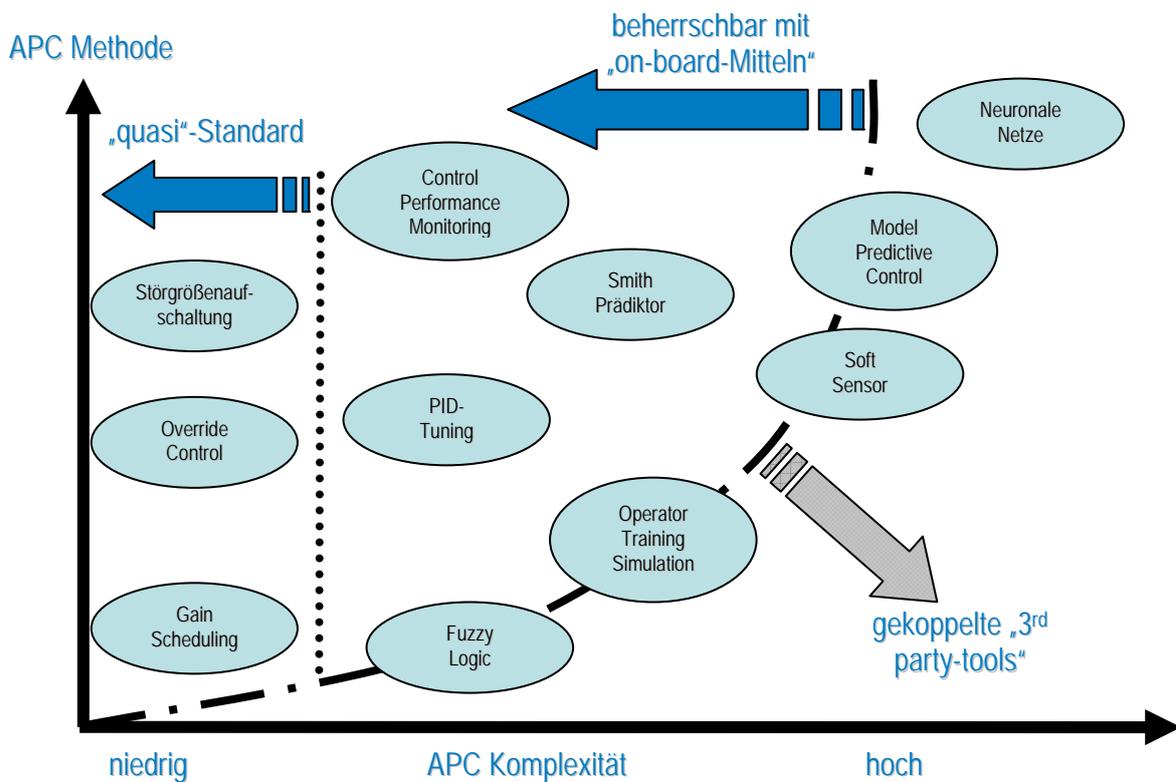
nutzt und integriert, und damit über standardmäßige PID-Regelungen und Ablaufsteuerungen hinausgeht.



Ein funktionierendes System von PID-Basisregelungen bildet allerdings das unverzichtbare Fundament, auf das APC Methoden aufsetzen!

Durch den gezielten Einsatz von modernen Regelungsverfahren (Advanced Process Control, APC) steht den Unternehmen der Prozessindustrie ein konkreter Hebel zur Kostenreduzierung und Qualitätssteigerung zur Verfügung. Diesbezgl. Vorreiter waren sicher die Branchen Chemie, Pharma und Petrochemie, jedoch finden diese Methoden immer öfter auch Anwendung in Kraftwerken und somit auch in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung. [5]

In folgender Abbildung 1 sind die wichtigsten Elemente und Methoden aufgeführt die unter dem Oberbegriff der APC zusammengefasst werden:



**Abbildung 1: Wichtige APC-Elemente und Methode**

Die strich-punktierte Linie soll die Grenze darstellen, welche APC-Methoden mit vernünftigem Aufwand ins betriebliche Prozessleitsystem integriert werden können und welche Methoden aufgrund ihrer Komplexität besser über externe Systeme betrieben werden.

Die gepunktete Linie markiert eine Grenze, die anzeigen soll, welche APC-Methoden heute schon als „quasi-Standard“ in modernen Prozessleitsystemen möglich sind und auch heutzutage schon vielfach in Industrieanlagen aller Art einschl. Kraftwerken eingesetzt werden, die also schon „zum Stand der Technik“ gehören.

Im Folgenden werden die am weitesten verbreiteten APC-Methoden kurz vorgestellt [5], [1]:

**Gain Scheduling:** Methode für nicht-lineare Prozesssteuerung zur Beherrschung von unterschiedlichen Arbeitspunkten.

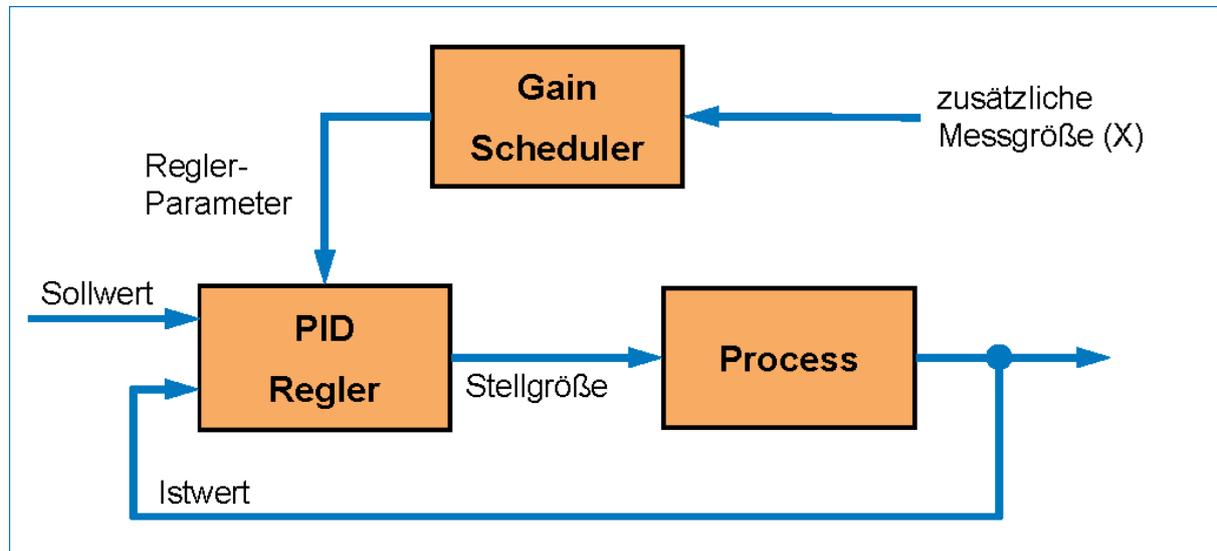


Abbildung 2: Blockschaltbild APC-Methode „Gain Scheduling“

**Override Control (Ablösende Regelung):** Zwei Regler teilen sich ein Stellglied und der Zugriff auf das Stellglied wird anhand des Prozesszustandes entschieden (Stichwort: Begrenzungsregler).

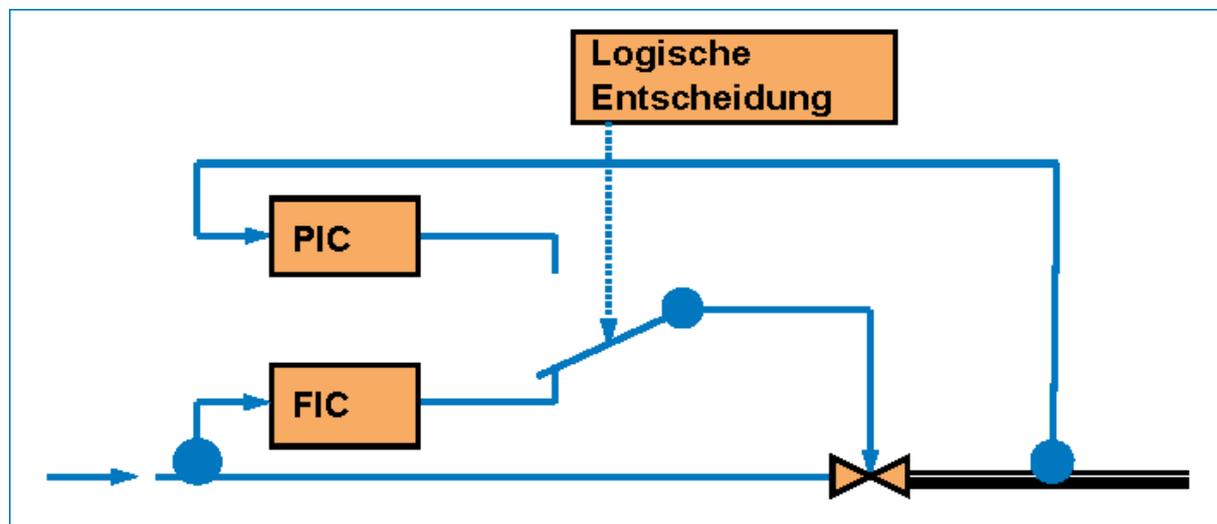


Abbildung 3: Blockschaltbild APC Methode „Override Control“

**Störgrößenaufschaltung:** wird angewandt bei Prozessen, bei denen eine kräftige, bekannte Störung auf den Regelkreis einwirkt und die Ursache der Störung messbar ist. Der sich durch die Störgrößenaufschaltung ergebende Vorteil manifestiert sich dahingehend, dass die Kompensation bereits vorher eingreift, bevor die Störung den Prozess weit vom Sollwert weggetrieben hat.

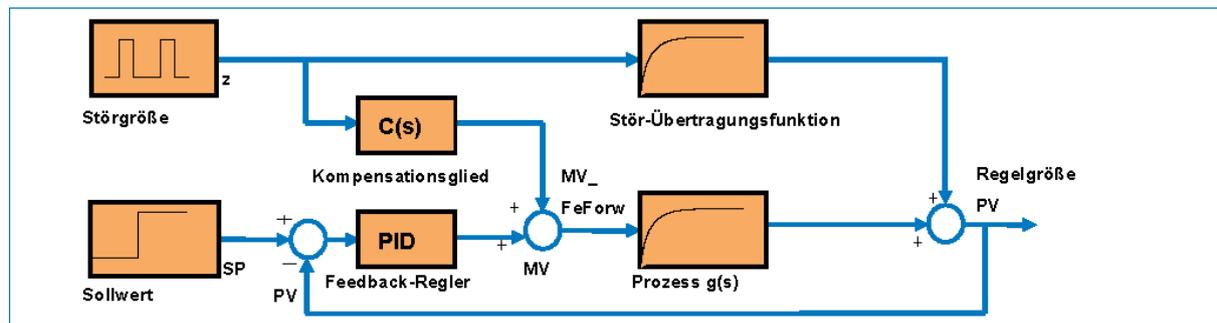


Abbildung 4: Blockschaltbild APC Methode "Störgrößenaufschaltung"

**Control Performance Monitoring:** Stochastische Merkmale wie Mittelwert und Standardabweichung von Regelgröße und Stellgröße werden überwacht und analysiert in gleitendem Zeitfenster. Bildung eines Control Performance Index: aktuelle Standardabweichung bezogen auf einen definierten Gut-Zustand (z.B. bei der Inbetriebnahme). Des Weiteren können deterministische Merkmale überwacht werden, wie z.B. Überschwinger eines Regelkreises (absolut und bezogen auf Sprunghöhe) sowie die Einschwingzeit eines Regelkreises (absolut und bezogen auf die Anstiegszeit).

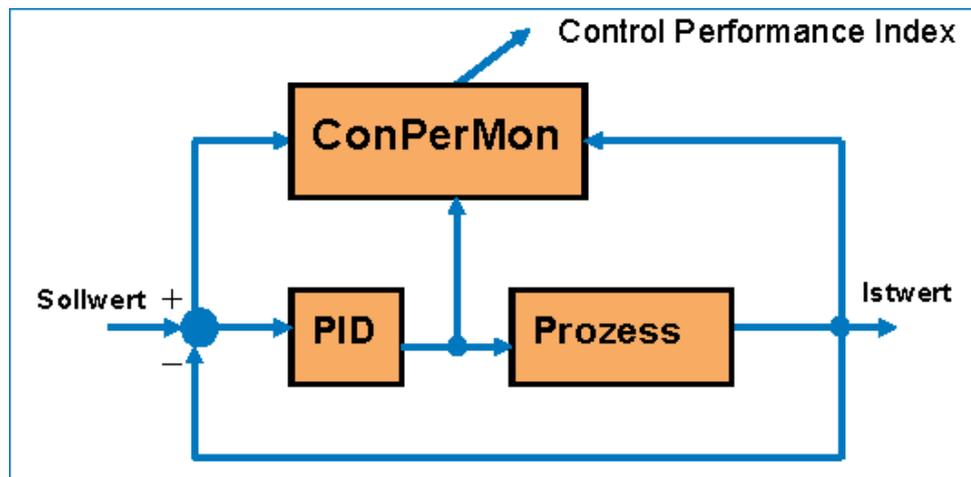
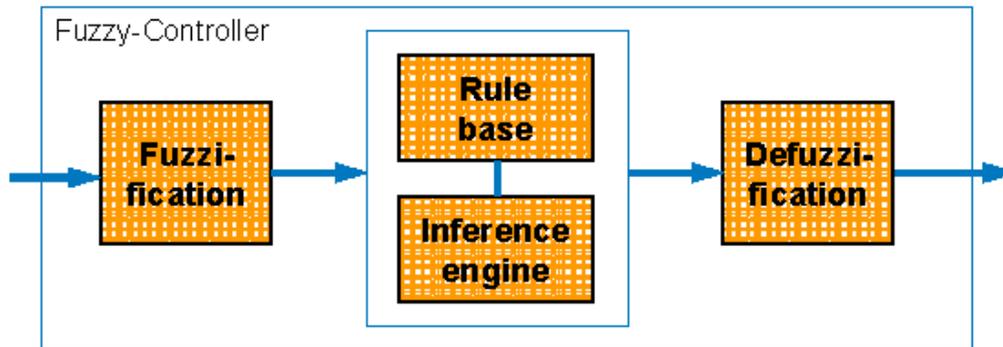


Abbildung 5: Blockschaltbild APC Methode „Control Performance Monitoring“

**Fuzzy Control:** Anwendung bei nichtlinearen Prozess bzw. unbekanntem mathematischen Modellen. Idee ist die Modellierung/Nachbildung der Fähigkeiten menschlicher Bediener durch Formulierung der linguistischen Variablen mittels Wenn/Dann-Bedingungen.



**Abbildung 6: Blockschaltbild APC Methode "Fuzzy Control"**

**Soft Sensor:** Softsensoren sind Berechnungsverfahren, die auf Basis der messbaren Prozesswerte (Drücke, Durchflüsse, Temperaturen, Füllstände etc.) die nicht messbaren Qualitätsgrößen ermitteln.

Es gibt verschiedene Modellformen wie z.B. Übertragungsfunktionen, künstliche neuronale Netzwerke, Nutzung von Vorwissen. Die Modellstruktur kann also statisch oder dynamisch bzw. linear oder nichtlinear sein.

Im hier vorliegenden Fall handelt es sich um ein dynamisches, nichtlineares chemisch-physikalisches Prozessmodell welches mathematisch umgesetzt wurde, sein zugrunde liegendes Modell aber nicht online adaptiert werden kann, da „fix“ programmiert.

**Modellbasierte prädiktive Mehrgrößenregelung (model predictive control, MPC):** Diese Regelungen wurden in den 70er Jahren zunächst auf heuristischer Grundlage entwickelt und zur Regelung von komplizierten verfahrenstechnischen Prozessen eingesetzt. Kein anderes gehobenes Regelverfahren hat seither eine solche Erfolgsgeschichte in der industriellen Anwendung aufzuweisen. Insbesondere für den Raffineriesektor gilt die Anwendung von MPC weltweit zum Stand der Technik. Besonders in den letzten Jahren ist aber auch ein stärkeres Vordringen in andere Bereiche der Prozessindustrie (Papier und Zellstoff, Zement, Kraftwerke) zu erkennen und vor allem auch der Einsatz für mittlere bis kleinere Regelungsaufgaben (z.B. Einspritzregelung und / oder Trommelniveauregelung eines Dampferzeugers).

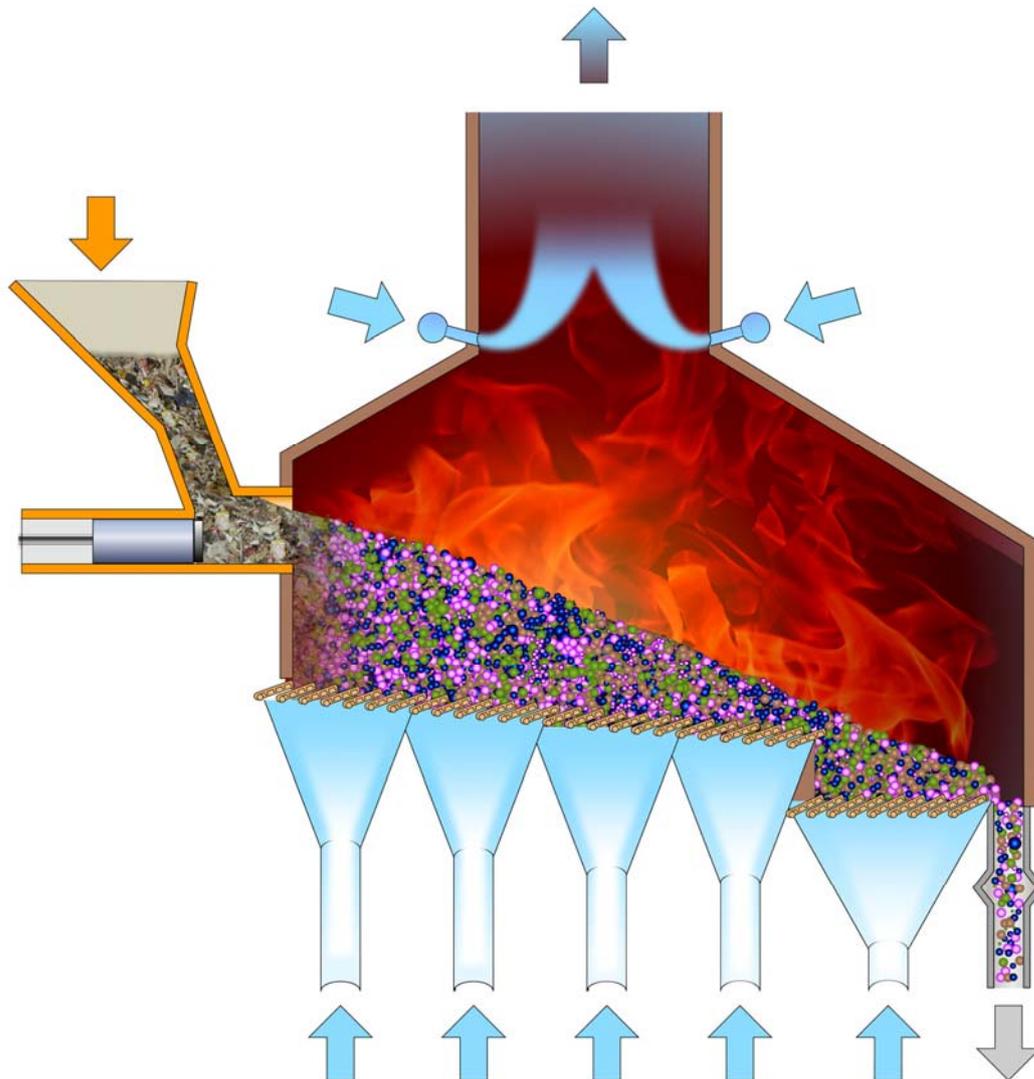
Charakteristisch für alle MPC-Regelungen ist, dass ein Modell für das dynamische Verhalten der Regelstrecke nicht nur in der Entwurfsphase, sondern auch in der Betriebsphase des Reglers mit dem Ziel der Vorhersage des Verhaltens der Regelgrößen und der Berechnung der Stellgrößen verwendet wird.

## 4 Das Feuerungsmodell „Combate“

Die Vorgänge im Feuerraum sind wesentliche Ursache für die ablaufenden Prozesse in den nachgelagerten Anlagenkomponenten. Dies betrifft u.a. die Wärmetechnik ebenso wie die Schadstoffbildung von z.B. CO, NO<sub>x</sub>, aber auch von korrosionsfördernden Spezies wie Chloride. Allerdings sind nicht alle Probleme in thermischen Behandlungsanlagen der Feuerung zuzuordnen. Auch die nachgelagerten Aggregate bieten genügend Potential für „Fehler“.

Das Potential einer Verbesserung der Feuerung, ist allein schon Grund genug zu versuchen, die Vorgänge in der Feuerung aufzudecken und zu beschreiben. Möglicherweise kann, wie jetzt schon bei der feuerungsseitigen CO- und NO<sub>x</sub>-Minderung, auch die Korrosion und Belagsbildung durch primäre, d.h. feuerungsseitige, Maßnahmen vermindert werden. Derartige Maßnahmen werden teilweise schon von diversen Anbietern versprochen, jedoch sind die meisten Realisierungen nicht erfolgreich gewesen, d.h. statistisch ist der Umbau einer Feuerung im Bezug auf eine Verbesserung hinsichtlich Korrosion und Verschmutzung nicht erfolgreicher als der Neubau von Anlagen. Auch bei letzteren hat jeder Anlagenbauer „gute“ und „schlechte“ Anlagen, ohne wirklich zu wissen, wo die Ursachen für den Erfolg oder Misserfolg liegen. Wenngleich es nicht zu leugnen ist, dass es für die Feuerführung gewisse Rahmenbedingungen gibt bzw. geben sollte, um die oben erwähnten Beschädigungen an der Anlage soweit möglich zu vermeiden.

Hoffnung gibt die Tatsache, dass es Anlagen gibt, die nahezu störungsfrei laufen. Eine aufwändige Auswertung konstruktiver und verfahrenstechnischer Parameter mit multivarianten, statistischen Methoden hat noch kein eindeutiges Ergebnis einer „optimalen“ Anlage liefern können. Möglicherweise werden die wirklich signifikanten Daten im Rahmen der konventionellen Verfahrenstechnik und Konstruktion nicht aufgenommen. Daher ist ein alternativer Lösungsweg die Entwicklung eines Feuerungsmodells, mit dem ggf. diese relevanten Parameter deutlich gemacht werden können.



**Abbildung 7: Modellvorstellung von „Combate“**

Ein Modell beschreibt Teilstücke der Realität, um sie besser verstehen (diagnostizieren) zu können und Aussagen über die Zukunft machen zu können (prognostizieren). Es geht also um das Erkennen, Beschreiben und Prognostizieren von Realität in Strukturen und Prozessen.

Ein Modell ist ein abstraktes Abbild eines Systems, welches stellvertretend für das System untersucht werden kann, speziell an Stellen wo eine Untersuchung des Systems nur sehr schwierig oder gar nicht möglich ist.

Der Grad der Abstrahierung der Realität im Modell beeinflusst die Qualität der Ergebnisse. Abweichend von den bereits vorhandenen Feuerraummodellen, soll im vorliegenden Modell besonderes Augenmerk auf die Implementierung möglichst praxisrelevanter Parameter gelegt werden. Eine Modellbildung über abstrakte Beschreibungen und Kennzahlen, die noch dazu meistens dimensionslos sind, wird beim praktischen Gebrauch wenig Akzeptanz bieten.

Es sollten möglichst alle Ausgangs- und Ziel-Werte praktisch begreifbar sein, mit der Problemstellung, dass sie aber auch mathematisch exakt berechnet werden können müssen.

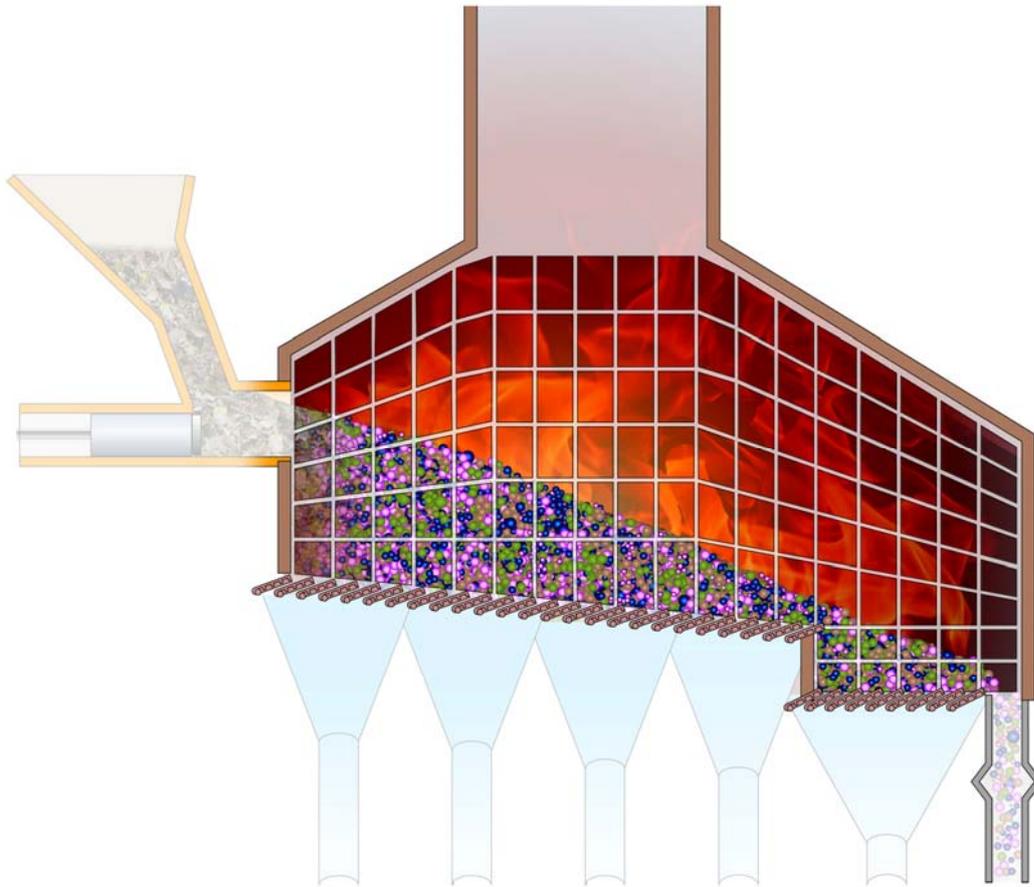


Abbildung 8: diskretisierter Feuerraum der Modellvorstellung von „Combate“

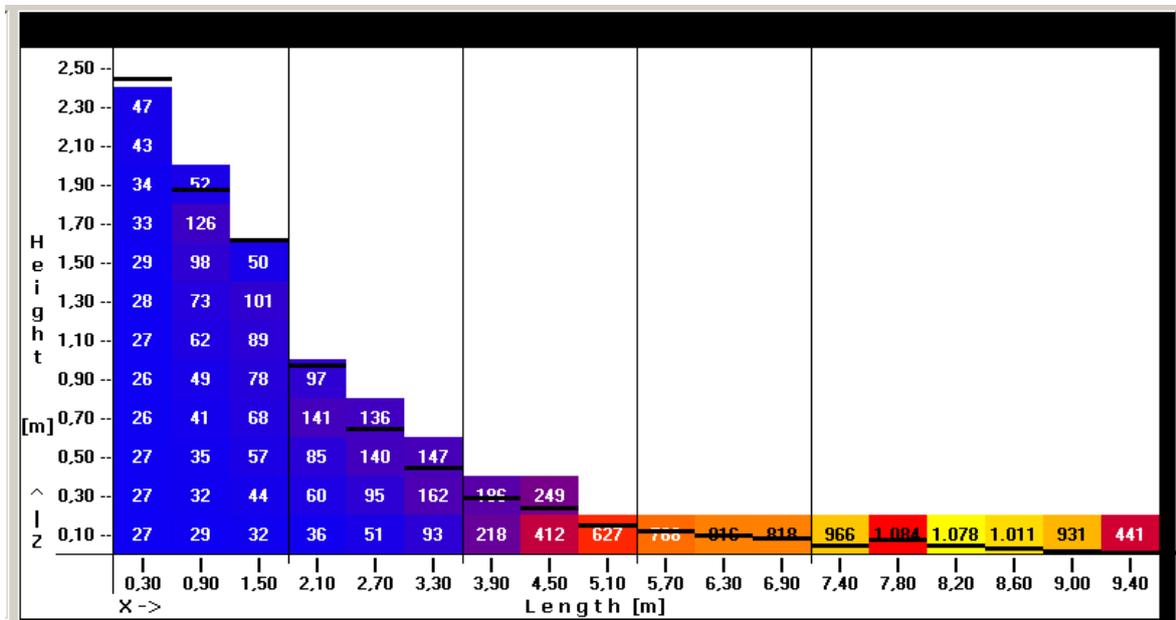


Abbildung 9: Umgesetzte Diskretisierung der Modellvorstellung in die Berechnungszellen des Modells

## 5 Kopplung des Modells mit der Feuerungsregelung

### 5.1 Aufbau der Kopplung

Grundsätzlich können und müssen Fremdsysteme über verschiedene Möglichkeiten an die vorhandene Prozessleittechnik angekoppelt werden. Als Schnittstellen stehen offene Systeme wie z.B. der Industriestandard OPC, Gateways usw. zur Verfügung.

Werden Regelungssysteme an eine übergeordnete Leittechnik gekoppelt, so werden mehrere Regelkreise hintereinander geschaltet. Die Feuerungsregelung gibt einen Sollwert über die Schnittstelle auf den Anlagenbus / Baugruppe. Innerhalb der Baugruppe werden der Sollwert und der Ist-Wert innerhalb eines PID-Reglers als geschlossener Regelkreis verarbeitet. Auf Grund dessen ist es relevant, dass beide Regelkreise (Regler der Feuerungsregelung und Regler der Leittechnik) aufeinander abgestimmt werden und innerhalb des Regelkreises in der Leittechnik keine bzw. eine unrelevante bleibende Regelabweichung besteht. Die Ankoppelung (Abb. 10) der auf Simatic PCS 7 basierenden Feuerungsregelung erfolgt linienbezogen jeweils über ein spezielles Gateway welches Industrial Ethernet auf den CS 275-Teleperm-Bus umsetzt.

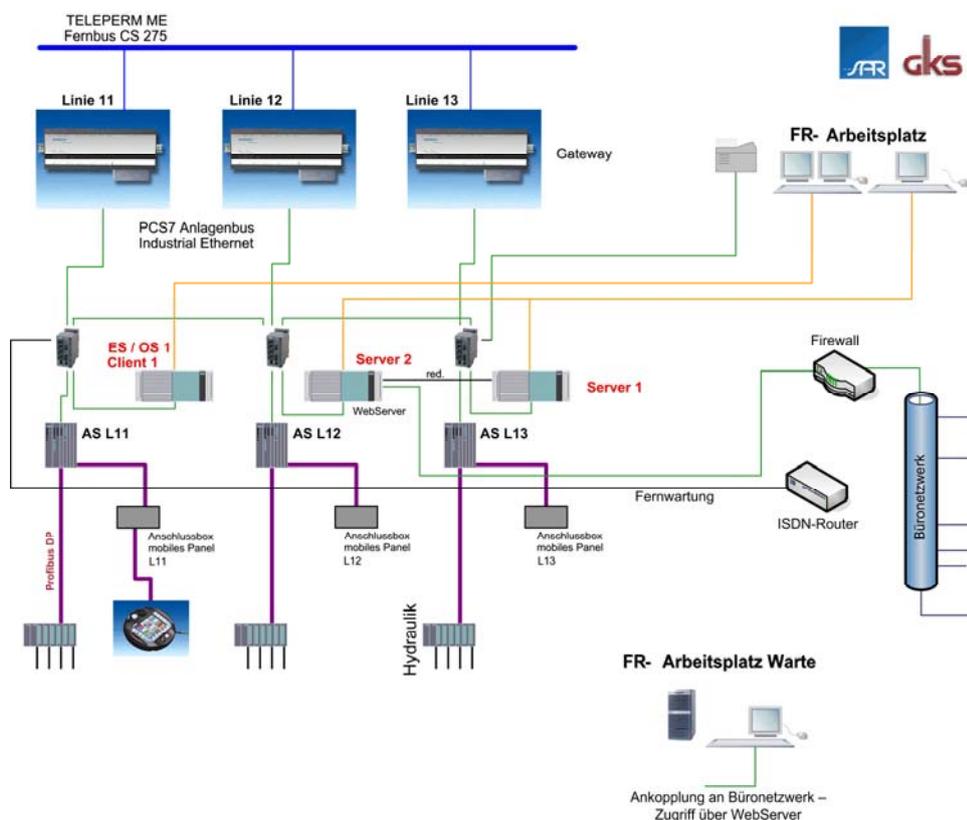
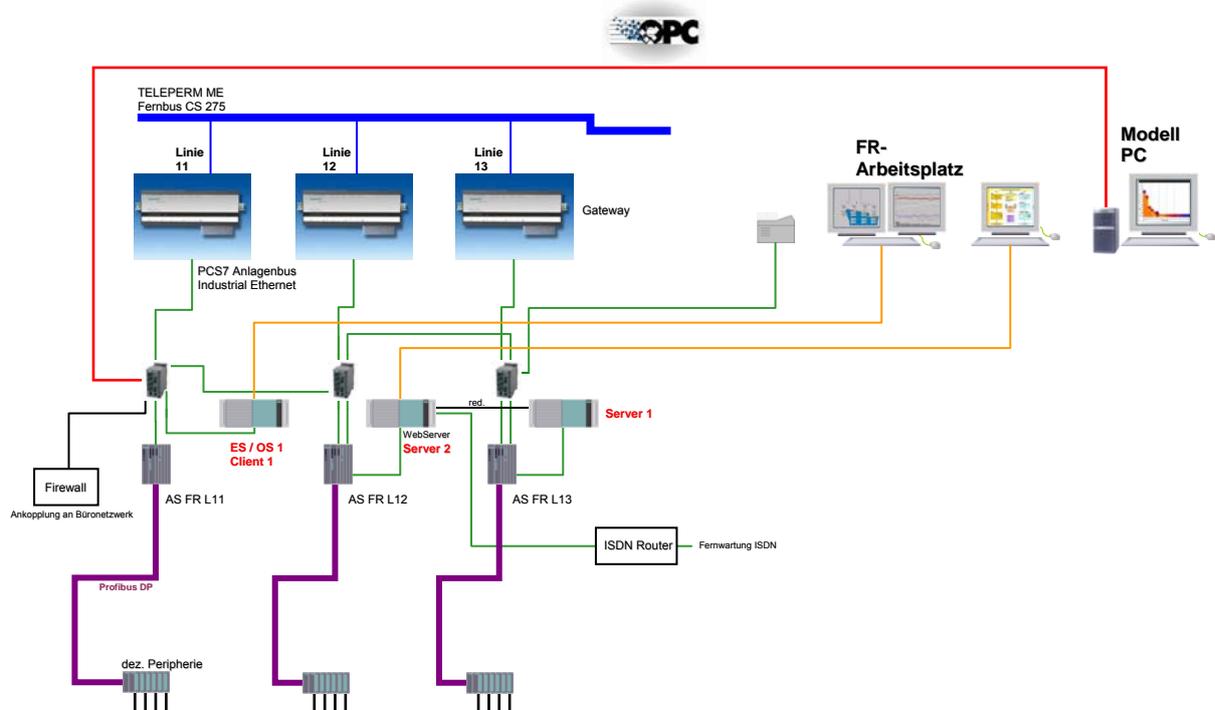


Abbildung 10: Aufbau der Feuerungsregelung mit Kopplung an die Prozessleittechnik, Ausgangszustand

Neben der auf Abbildung 10 dargestellten Kopplung zur übergeordneten zentralen Leittechnik (ZLT) musste nun auch die Kopplung zum Feuerungsmodell, welches auf einem „normalen“ Office-PC lauffähig ist, hergestellt werden; der Industriestandard OPC wurde als geeignet evaluiert, so dass sich folgende Konfiguration ergibt:



**Abbildung 11: Kopplung der Feuerungsregelung ans Prozessleitsystem und Modell-PC**

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich, ist das Feuerungsmodell dzt. an die Verbrennungslinie 11 angekoppelt, durch die OPC-Verbindung ist es aber problemlos möglich mehrere Verbrennungslinien parallel anzukoppeln und berechnen zu lassen, da die OPC-Client Schnittstelle auf dem Modell-PC auf alle relevanten Prozessdaten von allen 3 Verbrennungslinien zugreifen kann.



Abbildung 12: Aufbau vor-Ort

## 5.2 *Kopplungsparameter*

Um vergleichbare Bedingungen zwischen dem „Modellbetrieb“ und dem Betrieb der realen Anlage zu erhalten, ist es notwendig, alle relevanten dzt. vorherrschenden Stellgrößen und Istwerte dem Modell zur Verfügung zu stellen. Im Modell wurde strikt darauf geachtet, nur mit SI-Einheiten zu rechnen, während in der Feuerungsregelung bzw. im Prozessleitsystem die „betrieblich praktischen“ Einheiten im Vordergrund stehen. Aus diesem Grund existiert die Notwendigkeit, jeden Wert der vom OPC-Client des Modells eingelesen wird mittels Umrechnungsfaktor auf die richtige Einheit umrechnen zu können. Auch für verfahrens- oder anlagentechnisch bedingte Umrechnungen wird dieser Faktor verwendet.

Im Folgenden werden die zu übergebenden Werte und die daraus resultierenden Besonderheiten vorgestellt.

## 5.2.1 Bereich Rost – Transport + Beschickung

In folgenden Abbildungen, die jeweils einen Ausschnitt aus der Prozessvisualisierung zeigen, sind alle relevanten Betriebswerte rot markiert, die dem Feuerungsmodell zur Verfügung gestellt werden (müssen). Bei den ans Feuerungsmodell gesendeten Werten handelt es sich Momentanwerte, die „jetzt“ auch am echten Prozess als Stellgrößen anliegen.



**Abbildung 13: Visualisierung aus dem Bereich Rost + Beschickung – markierte Istwerte**

Die Müllaufgabe erfolgt im Modell in einer festgelegten Zelle am oberen linken Rand als Massenquelle, d.h. kontinuierliche Beschickung im Gegensatz zur quasi-kontinuierlichen Beschickung der realen Anlage. Die kurze Totzeit während dem Rückhub der Beschickung wird vernachlässigt, geht aber über den Umrechnungsfaktor auf Müllmasse indirekt mit ein.

Da die Aufgabe mathematisch also als Massenstrom in  $[\text{kg/s}]$  erfolgt, muss dieser Wert in genau dieser Form zur Verfügung gestellt werden. Leider liegt eine Bewertung der Müllbeschickung in der Form nicht vor und kann auch nicht einfach gemessen werden. Da es sich bei der beschickten Müllmenge aber um einen zentralen Wert handelt (der sich je nach Vorgabe der Feuerungsregelung permanent ändert), muss dieser in Ermangelung besserer Alternativen empirisch ermittelt werden.

Es wurde der Zusammenhang zwischen der beschickten Müllmenge (in  $[\text{t/h}]$ ) und der jeweils vorherrschenden Geschwindigkeit der Beschickeinrichtung (in  $[\text{D}^{\text{H}}/\text{h}]$ ) hergestellt, unter der Annahme, dass diese Aufgabegeschwindigkeit direkt proportional zum eingebrachten Müllmassenstrom ist.

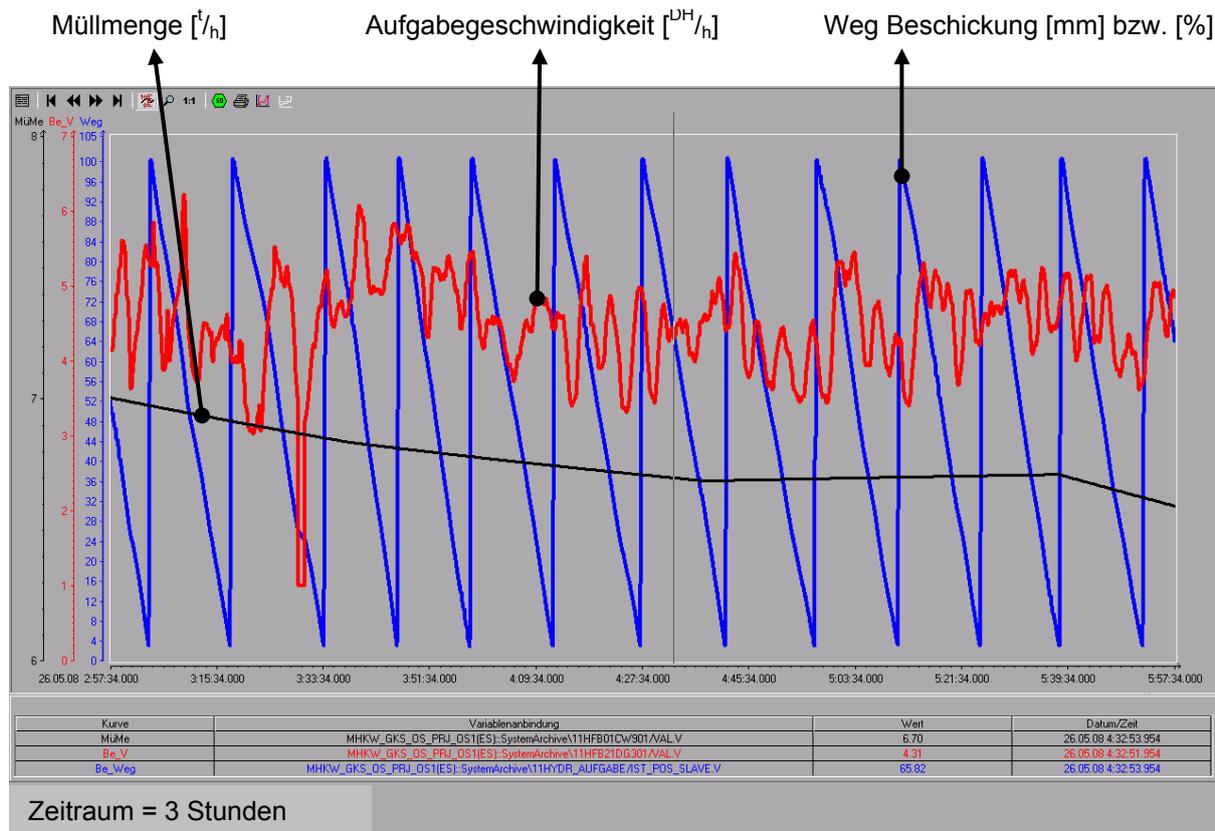


Abbildung 14: Trendanzeige Müllmenge – Aufgabegeschwindigkeit - Beschickhöhe

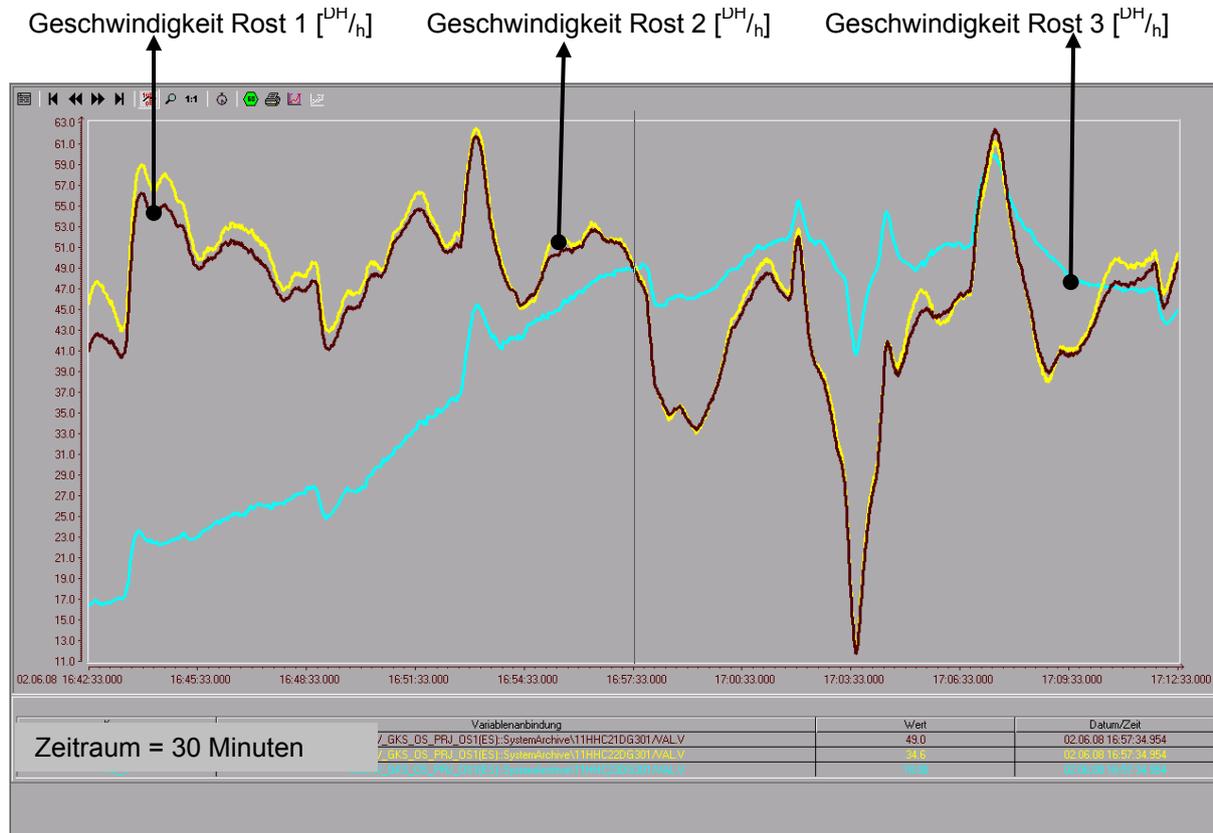
Über einen Zeitraum von einem Monat wurden die eingebrachten Müllmengen und die jeweils gefahrenen Aufgabegeschwindigkeiten gegenübergestellt und so die Müllmenge berechnet, die von einem Beschickhub auf den Rost aufgegeben wird. Um das Ergebnis repräsentativer zu gestalten, wurden diese Berechnungen jeweils in 6 aufeinanderfolgenden Monaten angestellt (Auszüge aus den Auswertungen – siehe Anhang):

Nr.	Monat	Müllmenge 11HFB01CW901	Beschickhöhe 11HFB21DG301	Müllmenge / Beschickhub
1	Dez 07	7,41 t/h	5,92 DH/h	1DH = 1,252 t
2	Jan 08	7,73 t/h	5,55 DH/h	1DH = 1,393 t
3	Feb 08	7,89 t/h	5,81 DH/h	1DH = 1,358 t
4	Mrz 08	7,38 t/h	5,24 DH/h	1DH = 1,408 t
5	Apr 08	6,95 t/h	5,32 DH/h	1DH = 1,306 t
6	Mai 08	6,97 t/h	4,86 DH/h	1DH = 1,434 t
7	Mittelwert			1 DH = 1,359 t

Abbildung 15: Ermittlung der Müllmenge pro Beschickhub

Der oben errechnete Wert von  $1359 \text{ kg/DH}$  wird als konstant angenommen und mit der jeweils gefahrenen Aufgabegeschwindigkeit  $[\text{DH/h}]$  kann ein aktuell vorherrschender Müllmassenstrom in  $[\text{kg/s}]$  berechnet und dem Modell als Eingangsgröße zur Verfügung gestellt werden.

Von der Feuerungsregelung werden zur Ansteuerung der 3 Rostwägen Rostgeschwindigkeiten in  $[\text{DH/h}]$  berechnet - siehe Abbildung 16.



**Abbildung 16: Trendanzeige - Rostgeschwindigkeiten**

Diese Rostgeschwindigkeiten werden zur Ansteuerung des Hydraulik-Lageregelkreises immer in aktuelle Hubfrequenzen umgerechnet und manifestieren sich in unterschiedlichen Steilheiten des „Sägezahnes“ der die zurückgelegten Wege der Rostwägen anzeigt; d.h. geringere Geschwindigkeit ergibt geringere Steilheit und höhere Geschwindigkeit ergibt auch größere Steilheit. Da sich – analog zur Beschickung – die Geschwindigkeit und somit die Steilheit während eines Hubes quasi permanent ändert, ist auf eine ausreichende Abtastzeit des Geschwindigkeitssignales zu achten, welches dem Modell als Eingangsgröße zur Verfügung gestellt wird.

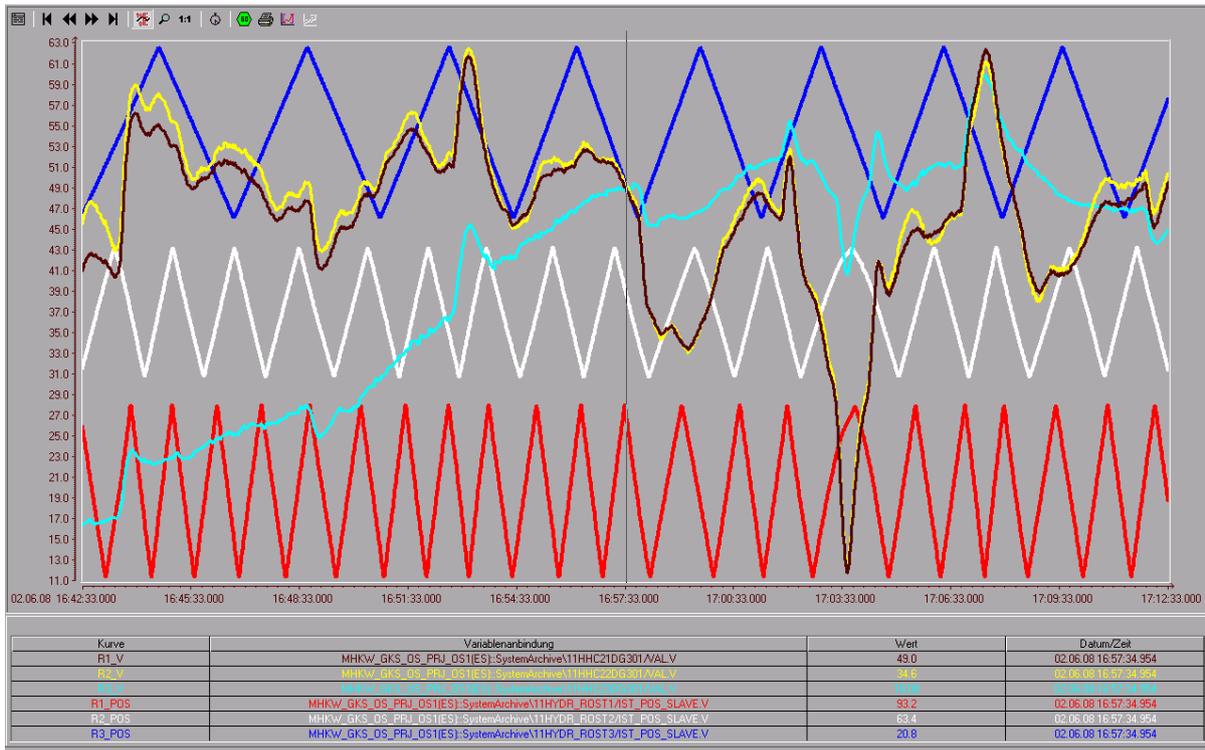


Abbildung 17: Trendanzeige – Rostgeschwindigkeiten – Rosthübe

In folgender Abbildung, die eine Hardcopy des Bildschirminhaltes der Feuerungsmodell-Software darstellt, ist die Umrechnung des Wertes welcher von der Feuerungsregelung kommt am Beispiel der Rostgeschwindigkeit / Hubfrequenz dargestellt.

Umrechnungsfaktor von  $[^{DH}/h]$  auf Hubfrequenz  $[1/s]$

Aktuelle Rostgeschwindigkeit von der Feuerungsregelung in  $[^{DH}/h]$

Abbildung 18: Bildschirmhardcopy – Umrechnungsfaktor für den Bereich Rostbewegung

### 5.2.2 Bereich Verbrennungsluft

Analog gilt es zu verfahren für die Verbrennungsluftmengen. Wiederum sind die relevanten Werte in nachfolgender Abbildung 19 markiert:

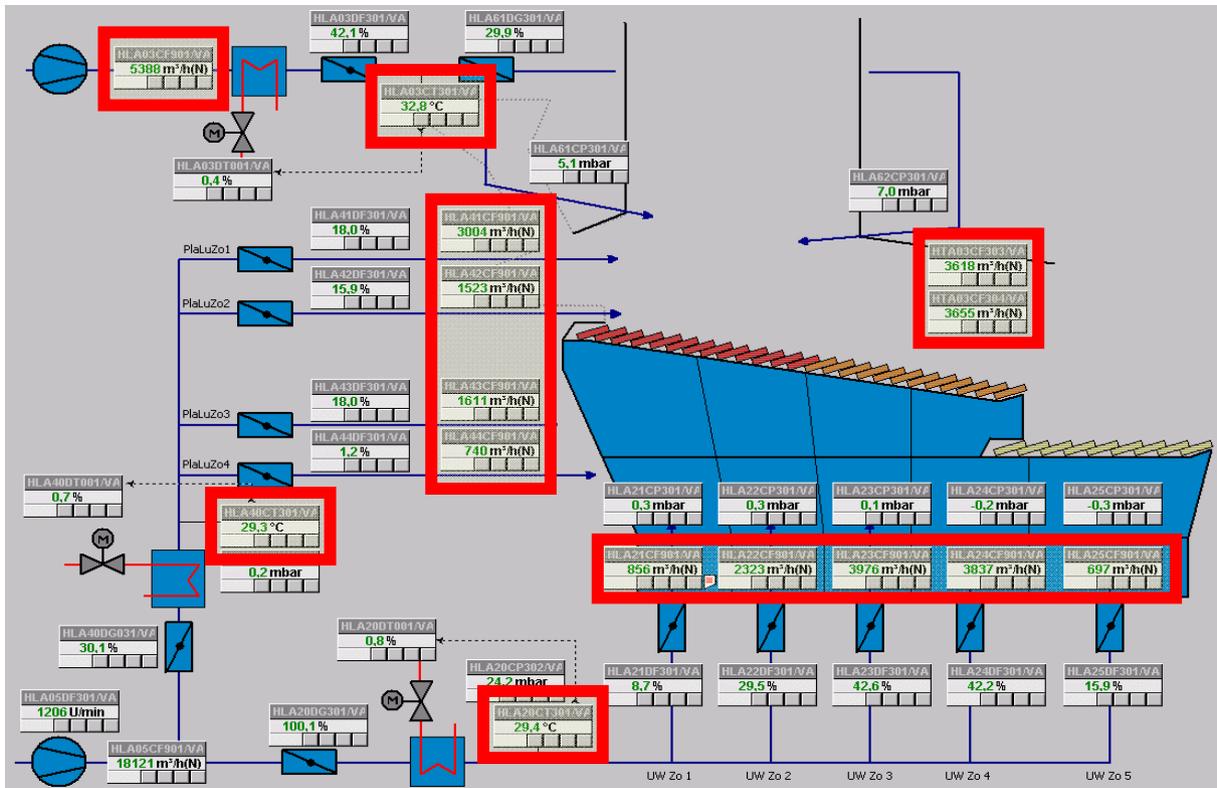


Abbildung 19: Visualisierung aus dem Bereich Rost + Beschickung – markierte Istwerte

**Primary Air Mass Controller**

Nr	Old:	New:	OPC:	-100%	0%	500%			
1	0,17 kg/s	0,206107 kg/s	626,6747				0	OPC	OK
2	0,82 kg/s	0,703647 kg/s	2139,459				0	OPC	OK
3	0,95 kg/s	1,217731 kg/s	3702,546				0	OPC	OK
4	0,84 kg/s	1,353256 kg/s	4114,616				0	OPC	OK
5	0,15 kg/s	0,213173 kg/s	648,159				0	OPC	OK

**OPC Item**

Item

OPC Primary Air Mass Nr: 3

11HLA23CF901/VAL.V

Conversion Factor:

0,00032889

Current Value 3698,73583984375

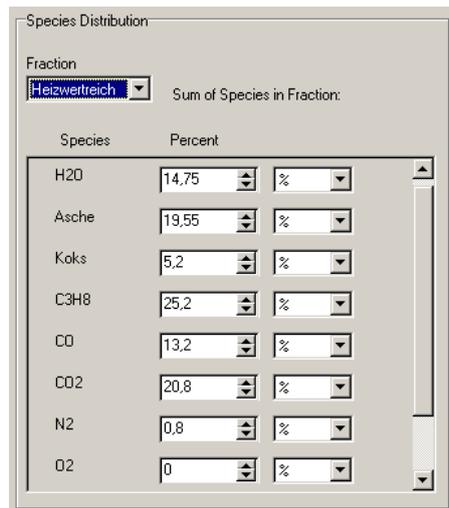
OK Cancel OPC Server Settings...

Es muss wieder umgerechnet von einem Normvolumenstrom in  $[Nm^3/h]$  in einen Massenstrom in  $[kg/s]$ .

Abbildung 20: Bildschirmhardcopy – Umrechnungsfaktor für den Bereich Verbrennungsluft

### 5.2.3 Input - Brennstoffzusammensetzung

Die wichtigste Größe, mit der das Modell „gefüttert“ werden muss, ist natürlich die Zusammensetzung des Brennstoffes, die ja in der realen Anlage nicht bzw. nicht online gemessen werden kann. Aus diesem Grund, wurde folgender Weg beschritten: Es gibt grundsätzlich zwei Fraktionen – eine heizwertarme (z.Z. parametrierbar auf  $8000 \text{ kJ/kg}$ ) und eine heizwertreiche (z.Z. parametrierbar auf  $15000 \text{ kJ/kg}$ )<sup>1</sup>. Jede dieser beiden Fraktionen besitzt eine individuell parametrierbare Zusammensetzung aus



mehreren Spezies (u.a.  $\text{H}_2\text{O}$ , Asche, Koks,  $\text{C}_3\text{H}_8$  ( $=\text{C}_x\text{H}_y$ ),  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ). Des Weiteren können unterschiedliche Wärmekapazitäten, Durchmesser für die Partikel und unterschiedliche Dichten für die Fraktionen parametrierbar werden.

Aus den beiden Fraktionen (heizwertarm und heizwertreich) kann nun entweder manuell ein bestimmter Heizwert zusammengestellt werden:

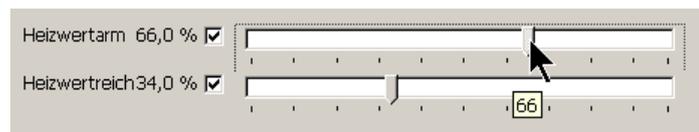
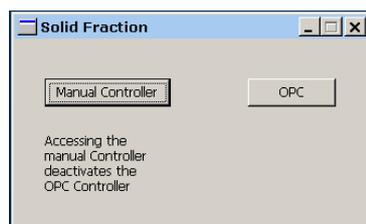


Abbildung 21: Zusammensetzung Fraktionen und einstellbare Mischung der Fraktionen

Zum Beispiel ergeben 50% heizwertarme und 50% heizwertreiche Fraktion einen Heizwert von  $11500 \text{ kJ/kg}$ . Somit kann die Reaktion der Feuerung (und vor allem der Feuerungsregelung!) auf Heizertschwankungen untersucht werden, die manuell „provziert“ wurden. Alternativ zu der soeben



beschriebenen Methode können die dem Modell präsentierten Heizertschwankungen auch den „echten“ Heizertänderungen nachempfunden sein, indem die in der Prozessleittechnik berechneten Heizerte (markiert in Abbildung 22) dem Modell über die OPC Schnittstelle übermittelt werden. Es kann jederzeit zwischen manueller und automatischer Heizertvariation umgeschaltet werden.

Dieser Heizwert entspricht aufgrund der langen Zeitverzögerung (bedingt durch die 4h-Mittelwertbildung des Krangreifergewichts) nicht dem sich momentan auf dem Rost befindenden Heizwert und v.a. können kurzfristige Heizertschwankungen („1 schlechter Greifer“) durch diese Methode nur unzureichend übertragen werden. Die kurzfristigen Heizertschwankungen müssen also mit der „manuellen Methode“ eingestellt werden. Mittel- bis längerfristige Tendenzen im Heizwert können jedoch sehr wohl zuverlässig abgebildet werden.

<sup>1</sup> Zusätzlich Fraktionen können vom Benutzer jederzeit hinzugefügt werden.

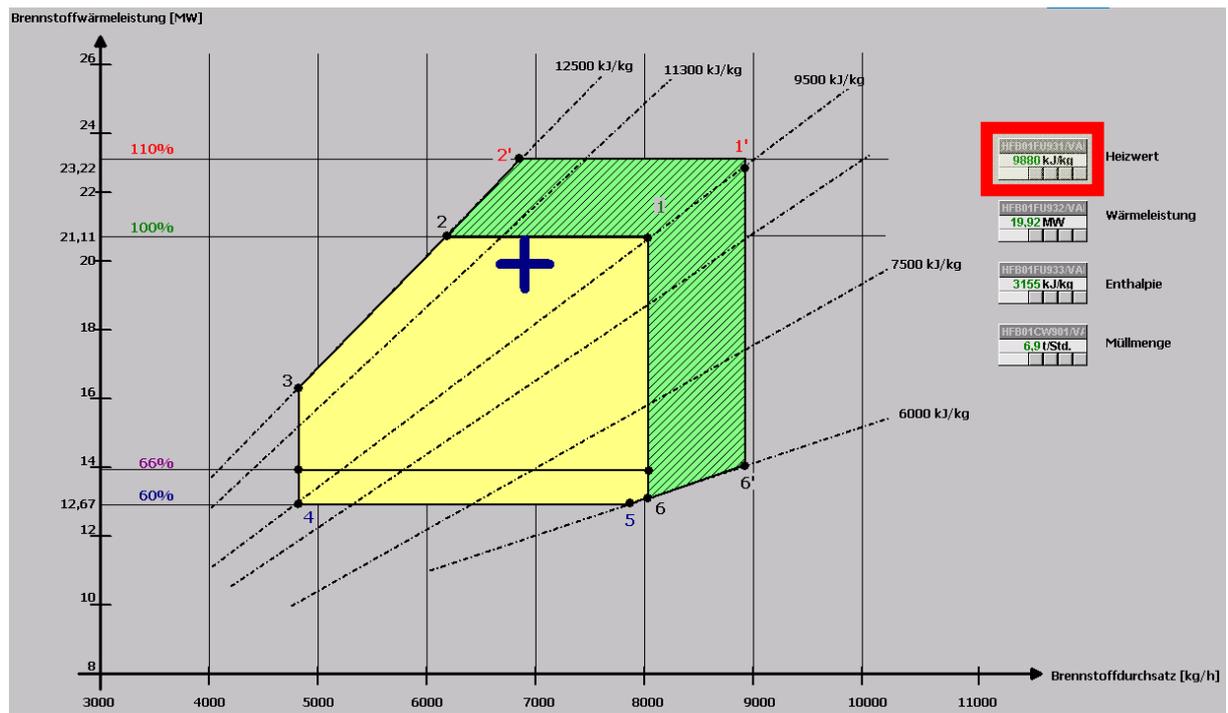


Abbildung 22: Feuerleistungsdiagramm mit berechnetem Heizwert (markiert)

## 6 Einsatzmöglichkeiten

### 6.1 Offline-Betrieb

Unter dem offline-Betrieb versteht man ein Betreiben des Modells ohne jegliche Kopplung, d.h. egal wo und auf welchem PC kann das Modell gestartet werden und je nach Ziel und Wunsch des Bedieners könne bestimmte Szenarien „durchgespielt“ werden und die Auswirkungen in umfangreicher Form beobachtet und analysiert werden. Diese Betriebsart wird in [2] ausführlich behandelt.

Interessant erscheint hier die Tatsache, dass das Modell auch ca. um den Faktor 100 schneller als Echtzeit rechnen kann – was für den Anwender insbesondere im offline-Betrieb von Interesse ist.



### 6.2 Online-Betrieb mit Kopplung an Feuerungsregelung

- im Simulationsbetrieb oder
- an „echte“ Anlage.

#### 6.2.1 Simulationsbetrieb

Mit der online-Kopplung des Modells im Simulationsbetrieb wird der Feuerungsbetrieb simuliert und an die Feuerungsregelung gekoppelt. Das dazu notwendige Automatisierungssystem wird mittels einem Software-Tool simuliert, d.h. Feuerungsregelung erhält die berechneten Istwerte vom Modell und sendet die berechneten Werte wie Dampfmenge, Sauerstoffgehalt, Feuerraumtemperaturen etc. retour an die in der Prozessleittechnik realisierte Feuerungsregelung. Die Kopplung erfolgt wiederum über OPC, d.h. die beiden Programme – Feuerungsregelung und Modell – können also gleichzeitig auf ein und demselben Rechner laufen.

Auf diese Weise kann einerseits die Software der Feuerungsregelung effektiv bereits in-house getestet und Fehler im Vorfeld der Inbetriebnahme behoben werden. Zum Anderen bietet sich hier die Möglichkeit mit verschiedenen Parametern – hier insbesondere Reglerparameter – zu „experimentieren“. Das bietet einerseits den Vorteil Reglerparameter u.U. empirisch zu ermitteln, die man sich in der realen Anlage „nie getraut hätte auszuprobieren“. Auch der Schulungs- und Lerneffekt der dadurch entsteht sei hervorgehoben.

Für Anlagenneubauten, für die noch keine Erfahrungswerte vorliegen können so bereits die ersten Erfahrungen gesammelt werden, bevor die tatsächliche Inbetriebnahme startet. Hier wiederum ist die Möglichkeit die Simulation schneller als in Echtzeit laufen zu lassen von Vorteil, da bestimmte Strategien z.B. Rostgeschwindigkeiten, Hublängen etc. in kurzem tatsächlichen Zeitaufwand simuliert und bewertet werden können.

### 6.2.2 Kopplung an eine reale Anlage

Grundsätzlich läuft beinahe jede reale Anlage ausgestattet mit einer Prozessleittechnik in der eine Feuerungsregelung – egal welcher Typ oder welcher Hersteller – implementiert ist. Im hier vorgestellten Fall läuft parallel zur Verbrennungslinie 11 im GKS Schweinfurt das Feuerungsmodell mit den Stellgrößen der „echten“ Feuerungsregelung, wie z.B. Rost- und Beschickungsgeschwindigkeiten, Verbrennungsluftmengen und –temperaturen etc. An dieser Stelle kommen die unter 5.2 beschriebenen Kopplungsparameter (Umrechnungsfaktoren) und der variable Input zum Tragen.

Die Kopplung des Modells an die reale Anlage dient in einem ersten Schritt dazu, die vom Modell berechneten Werte wie z.B. Dampfmenge oder Sauerstoffgehalt validieren zu können, wie auf folgenden beiden Abbildungen 23 und 24 zu sehen ist:

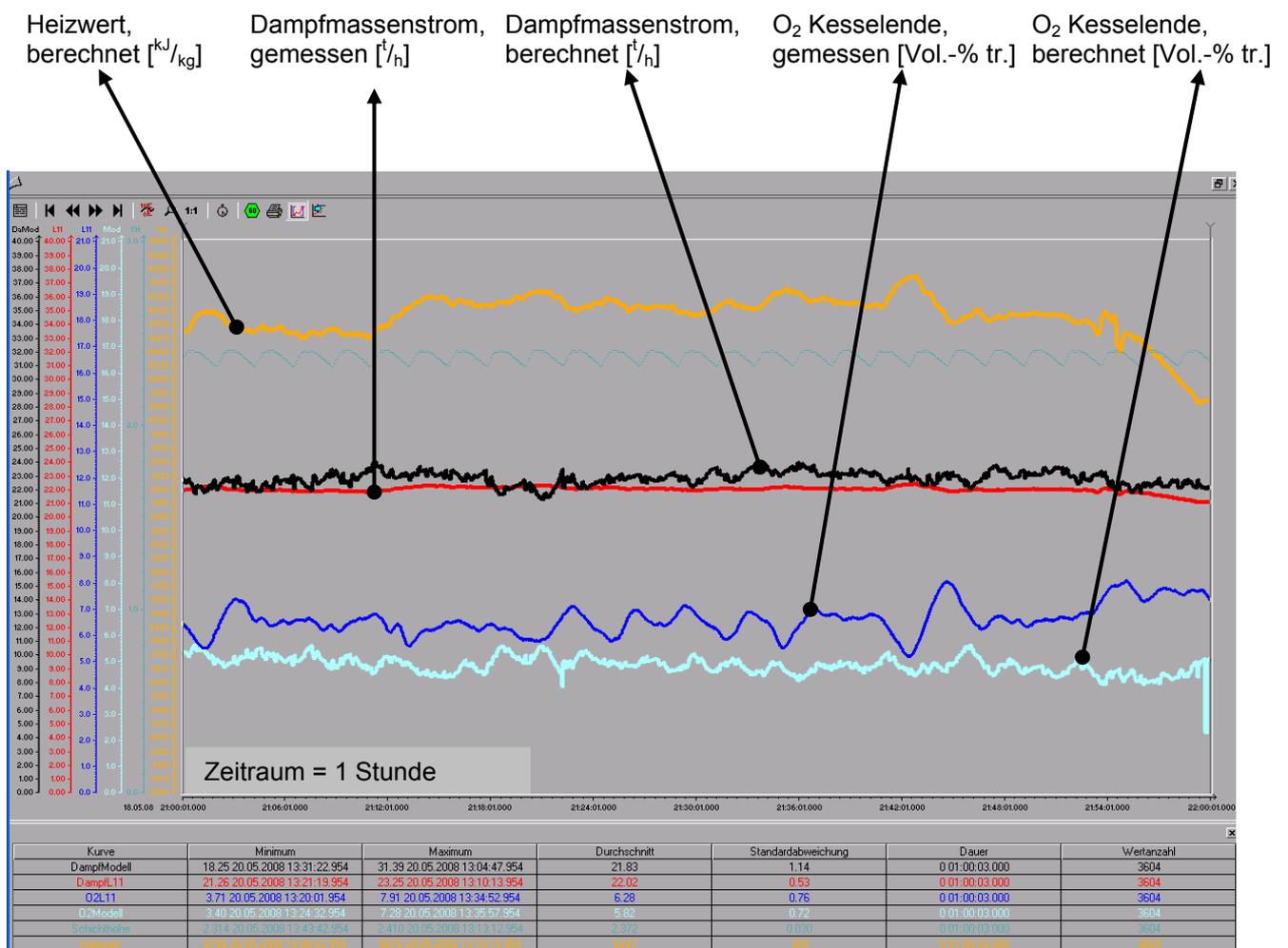


Abbildung 23: Trendanzeige – Vergleich „echter“ Anlagenbetrieb ↔ Modellbetrieb

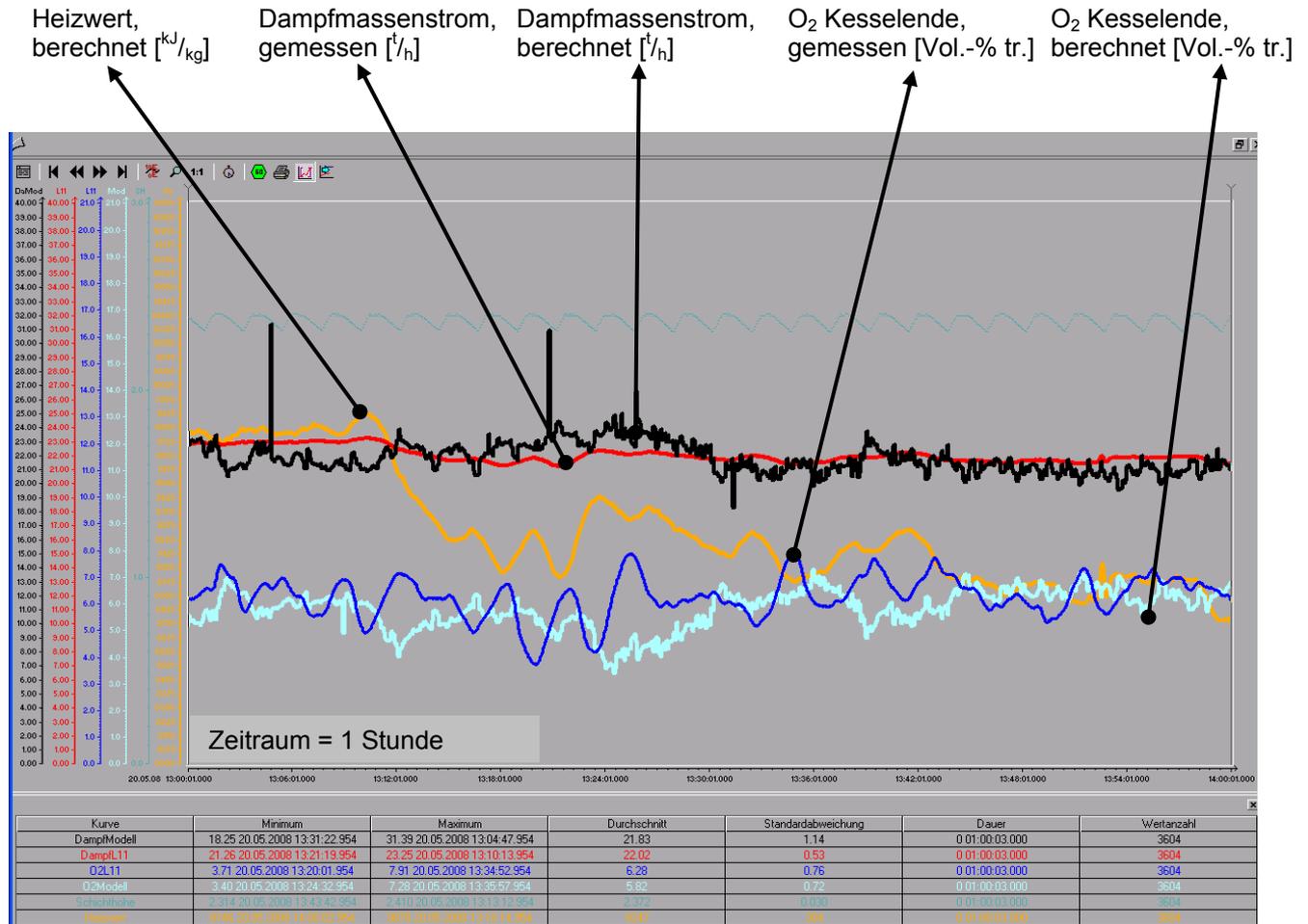


Abbildung 24: Trendanzeige – Vergleich „echter“ Anlagenbetrieb ↔ Modellbetrieb

Man erkennt auf den Abbildungen, dass insbesondere die berechnete und die gemessene Dampfmenge annähernd gut zusammenpassen. Hierbei noch nicht berücksichtigt sind die dämpfende Wirkung des Dampfkessels sowie die Zeitverzögerung (=Totzeit) bis zur Dampfmenge messung, weiter bis zur Messwert aufbereitung und anschließend in die Leittechnik. Hier kann sicher von ca. 3-5 Minuten ausgegangen werden.

Auch der gemessene und der berechnete Sauerstoffgehalt passen annähernd zusammen, allerdings kann man erkennen dass das Niveau des berechneten O<sub>2</sub>-Gehaltes tendenziell niedriger als das des gemessenen O<sub>2</sub>-Gehaltes. Vermutlich ist dies zurückzuführen auf die noch nicht beachteten „allgemeinen“ Falschlufmengen, Sperrluft- und Kühlluftgebläse der beiden Brenner, Sperrluft der Rußbläser.

Die interne Dämpfung der Messung, die Dämpfung der Messung im Prozessleitsystem sowie die Totzeiten sind hier noch nicht berücksichtigt. Die Totzeit der Sauerstoffmessung ist sicher als etwas kürzer anzusetzen als bei der Dampfmenge, da das Rauchgas durch den Kessel „nur“ etwa 40 Sekunden benötigt, wie eine CFD-Simulation (siehe Abbildung 25) ergeben hat. Hinzu kommen noch die Gasentnahme und die Messwert aufbereitung, sodass im Fall des Sauerstoffsignals von ca. 1-2 Minuten Totzeit ausgegangen werden kann.

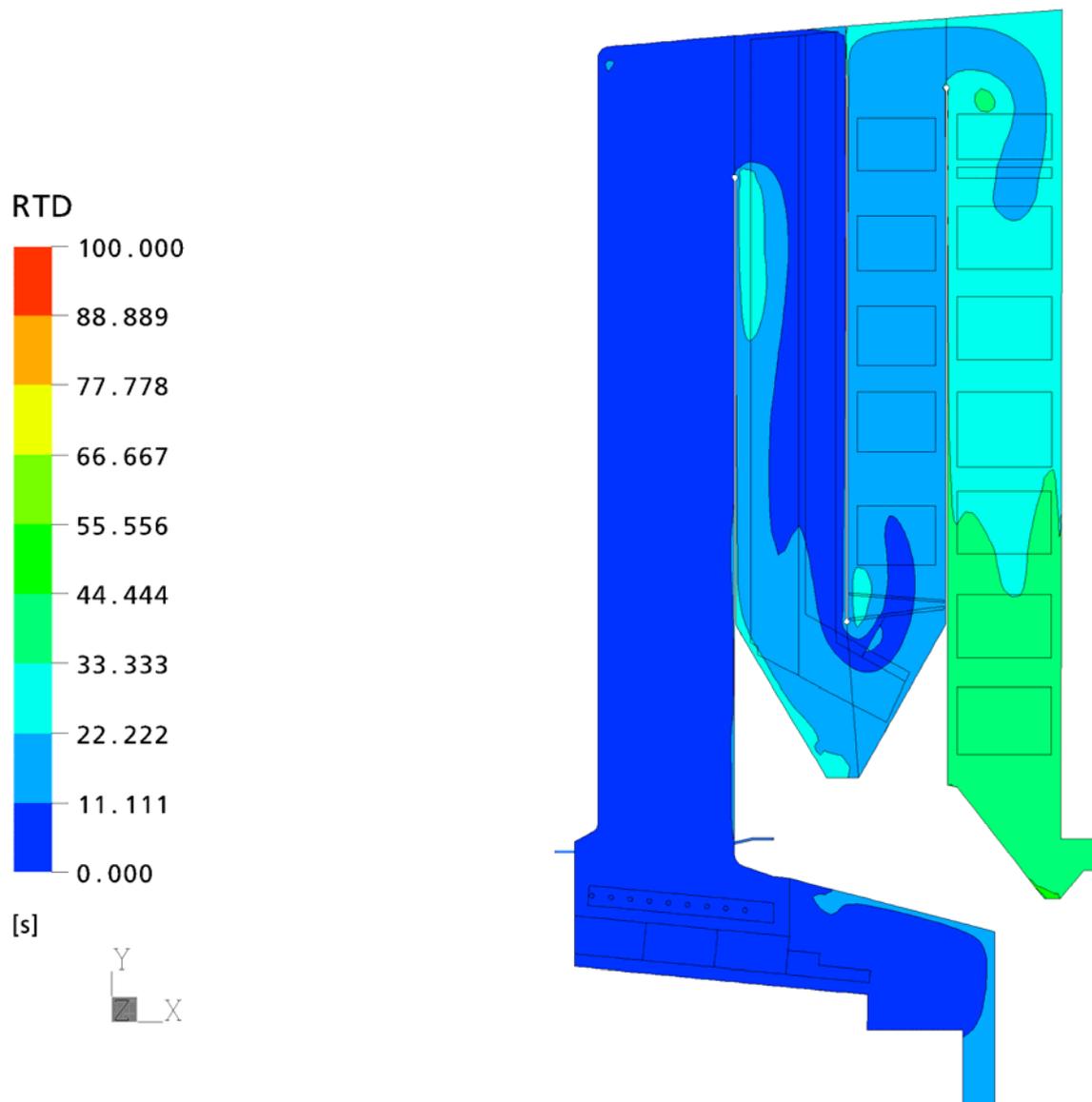


Abbildung 25: CFD-Simulation – Verweilzeit Rauchgas

## 7 Weitere Maßnahmen

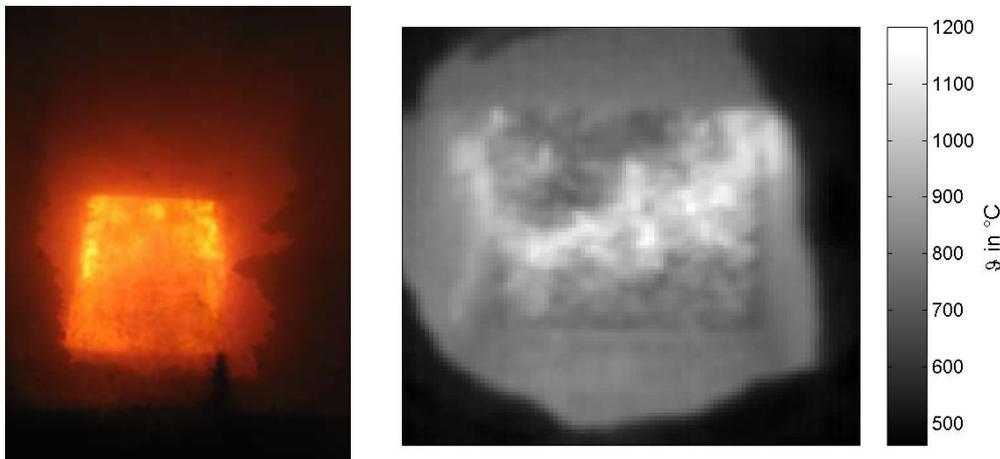
Um verlässliche und v.a. vergleichbare Werte für z.B. Dampfmenge und Sauerstoffgehalt vom Modell zu erhalten, müssen die oben beschriebenen Maßnahmen bzgl. Implementierung der Totzeiten und Dämpfungen umgesetzt werden.

Im nächsten Schritt müssen die weiteren vom Modell berechneten Werte wie z.B. die Schichtdicken und die Brennbetttemperaturen validiert werden. Die vom Modell berechneten Schichtdicken bzw. das Förderverhalten des „Modell-Rostes“ werden z.Z. durch Versuche überprüft, wie untenstehende Abbildung 26 beispielhaft zeigt:



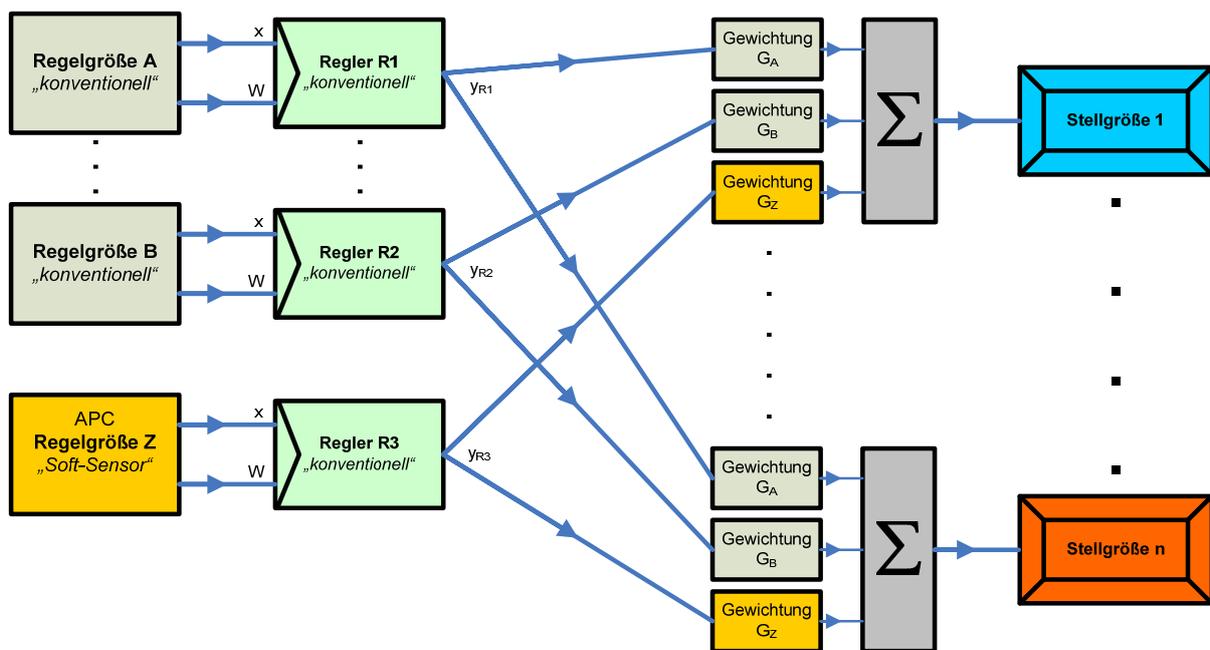
**Abbildung 26: Versuch zur Ermittlung der Müllschichtdicke**

Für eine Validierung der vom Modell berechneten Brennbetttemperaturen, hier insbesondere der Brennbettoberflächentemperaturen, ist angedacht, diese mittels einer Infrarot-Kamera zu messen und mit den berechneten Werten zu vergleichen. IR-Kameras sind in Verbindung mit spezieller Auswertesoftware in der Lage, die Flammen und den Flugstaub im Rauchgas auszublenden und die absolute Brennbettoberflächentemperatur zu messen:



**Abbildung 27: Brennbettoberfläche ermittelt durch IR-Kamera**

Als weiterer Schritt ist angedacht, die unter Kapitel 2 formulierte Schichthöhenregelung zu realisieren. Die in der Feuerungsregelung notwendigen Parameter, Gewichtungen und PID-Regler sind bereits implementiert und folgendes Konzept für die Einbindung des „Soft Sensors Schichthöhe“ ist vorgesehen:



**Abbildung 28: Regelschema Feuerungsregelung inkl. Einbindung „Soft Sensor“**

Die vom „Soft-Sensor“ ermittelte Messgröße wird – analog den bereits vorhandenen – Messgrößen auf einen konventionellen PID-Regler aufgeschaltet. Die Sollwertbildung wird als gleitender Mittelwert geführt um kurzfristige(re) Änderungen / Abweichungen in den Schichtdicken detektieren zu können.

Die Stellgröße des Schichtdickenreglers R3 (siehe Abbildung 28) kann über Gewichtungsfaktoren unterschiedlich stark auf die verschiedenen Stellgrößen aufgeschaltet werden; so kann realisiert werden, dass z.B. eine vom Sollwert abweichende Schichtdicke in der Zone 1 wenig Einfluss auf die Rostzonen 2 und 3 hat, auf die Beschickung und auf die Rostzone 1 jedoch mehr Einfluss hat.

Durch diese flexible Parametrierung ist z.B. auch denkbar zusätzlich zu den Änderungen an Rost und Beschickung eine Unterwindmengenerhöhung in den/der Zone(n) mit der (zu) hohen Schichtdicke vorzunehmen.

## 8 Ausblick

In wieweit weitere Entwicklungen in den Bereichen modellbasierender Regler bzw. modellbasierende Soft-Sensoren für MVAs einen Vorteil für den sicheren Betrieb ergeben bleibt abzuwarten, wenngleich mit dem vorliegenden Modell beachtliche Erfolge erzielt werden konnten. Mit der Ankopplung an eine reale Anlage wurde Neuland betreten und es hat sich gezeigt, dass erst durch die im Prozessleitsystem zur Verfügung stehende Infrastruktur wie z.B. die Möglichkeit von Trendaufzeichnungen eine sinnvolle und seriöse Validierung der Modelldaten möglich wird, denn: ohne Validierung dieser Daten sind sie nur die Hälfte wert.

Auch der Zweck als Schulungsmittel und zum Testen bzw. zum Demonstrieren einer Feuerungsregelungs-Software konnte nachgewiesen werden.

Eine vollständige Validierung der vom Modell gelieferten Werte ist noch ausständig, aber in erster Näherung sind diese Werte durchaus als brauchbar und nachvollziehbar einzustufen, es liegen nicht „Welten“ zwischen den gerechneten und den gemessenen, echten Werten, sondern lediglich Feinheiten sind noch zu korrigieren und zu berücksichtigen.

Das primäre Ziel, vom Modell zusätzliche Informationen über die Vorgänge im Feuerraum – sowohl in der Gasphase als auch im Feststofftransport zu erhalten – wurde auf jeden Fall erfüllt.

Die kommende Herausforderung wird das Einschleifen der vom Modell berechneten Werte (Soft-Sensor) in die bestehende Feuerungsregelung. Die Vorbereitungen hierzu sind bereits getroffen, lediglich die Reglerparameter und die Gewichtungen müssen noch bestimmt werden.

Insbesondere in diesem Kontext wird – im Bereich der Feuerungsregelung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen – absolutes Neuland betreten und spannende Erkenntnisse scheinen garantiert.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Pfeiffer B.-M.: Standardisierung gehobener Regelungsfunktionen als Messstellen-Typen. VDI-Berichte Nr. 1980, 2007.
- [2] Wirtz S., Marzi Th., Weghaus M., Warnecke R.: Brennstoff- und Rostmodell zur Beschreibung der Vorgänge im Feuerraum – GKS-Feuerungsmodell. VDI Wissensforum: Seminar „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Korrosion in Großfeuerungsanlagen, Frankfurt am Main, 2007
- [3] Müller V., Warnecke R.: Vergleich und Optimierung konventioneller Feuerungs-Regelungen – Optimierung Feuerungsregelung. VDI Wissensforum: Seminar „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Korrosion in Großfeuerungsanlagen, Frankfurt am Main, 2007
- [4] Müller V., Zwiellehner M. H.: Modernisierung einer Feuerungsregelung hinsichtlich Steigerung der Anlageneffizienz und -verfügbarkeit. In: Energie aus Abfall – Band 2, K. J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.); M. Beckmann (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2008
- [5] Dittmar R., Pfeiffer B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung – Eine Einführung für Ingenieure. Oldenbourg Verlag, München 2004.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wichtige APC-Elemente und Methode .....	6
Abbildung 2: Blockschaltbild APC-Methode „Gain Scheduling“ .....	7
Abbildung 3: Blockschaltbild APC Methode „Override Control“ .....	7
Abbildung 4: Blockschaltbild APC Methode „Störgrößenaufschaltung“ .....	8
Abbildung 5: Blockschaltbild APC Methode „Control Performance Monitoring“ .....	8
Abbildung 6: Blockschaltbild APC Methode „Fuzzy Control“ .....	9
Abbildung 7: Modellvorstellung von „Combate“ .....	11
Abbildung 8: diskretisierter Feuerraum der Modellvorstellung von „Combate“ .....	12
Abbildung 9: Umgesetzte Diskretisierung der Modellvorstellung in die Berechnungszellen des Modells .....	12
Abbildung 10: Aufbau der Feuerungsregelung mit Kopplung an die Prozessleittechnik, Ausgangszustand .....	13
Abbildung 11: Kopplung der Feuerungsregelung ans Prozessleitsystem und Modell-PC .....	14
Abbildung 12: Aufbau vor-Ort .....	15
Abbildung 13: Visualisierung aus dem Bereich Rost + Beschickung – markierte Istwerte.....	16
Abbildung 15: Ermittlung der Müllmenge pro Beschickhub .....	17
Abbildung 22: Feuerleistungsdiagramm mit berechnetem Heizwert (markiert).....	22
Abbildung 23: Trendanzeige – Vergleich „echter“ Anlagenbetrieb ↔ Modellbetrieb.....	24
Abbildung 24: Trendanzeige – Vergleich „echter“ Anlagenbetrieb ↔ Modellbetrieb.....	25
Abbildung 25: CFD-Simulation – Verweilzeit Rauchgas .....	26
Abbildung 26: Versuch zur Ermittlung der Müllschichtdicke .....	27
Abbildung 28: Regelschema Feuerungsregelung inkl. Einbindung „Soft Sensor“.....	28