

Vergleich und Optimierung konventioneller Feuerungs- Regelungen

- Optimierung Feuerungs-Regelung -

Von:

Volker Müller, GKS

Ragnar Warnecke, GKS

Anlässlich:

VDI Wissensforum:

Seminar „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in

Großfeuerungsanlagen - 2007“,

Frankfurt am Main,

12.-13. Juni 2007

Inhalt

1	Einleitung.....	3
1.1	Anlagenbeschreibung	3
1.2	Anlagenrandbedingungen	5
2	Aufgabenstellung Feuerungsregelung	5
3	Reglerarten	9
3.1	Regelungsgrundlagen	9
3.2	Regelungssysteme	11
3.2.1	PID-Regler	12
3.2.2	Fuzzy-Regler.....	13
3.2.3	Künstliche Neuronale Netze	13
3.2.4	Modellprädiktive/Modellbasierte Regler.....	14
4	Feuerungsregelung mit PID Regler.....	14
4.1	Anforderungen an die neue Feuerungsregelung (Software).....	15
4.2	Aufbau und Struktur	15
4.2.1	Basistabellen und Vertrimmung.....	18
4.2.2	Gewichtung und Sollwertgenerierung.....	19
5	Einbindung in die übergeordnete Leittechnik.....	22
6	Vergleich „Alt-“ / „Neu-System“	23
6.1	Veränderungen gegenüber „Alt-System“	23
6.2	Regelgüten	25
6.2.1	Regelgüte der Dampfproduktion.....	25
6.2.2	CO-und Sauerstoff-Werte am Kesselende	27
6.2.3	Ausbrand- und Schlackequalität.....	28
6.2.4	Konstruktionstemperaturen	29
6.3	Handeingriffe Fahrpersonal.....	30
6.4	Weitere Ansätze für Optimierung	32
7	Zusammenfassung.....	34

1 Einleitung

Die GKS – Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH (GKS) betreibt im Grundlastwerk zwei Kohlekesselanlagen (IBS 1990) und drei Müllkesselanlagen (IBS 1994). Aufgabe der GKS ist es, die Fernwärmeversorgung der drei Schweinfurter Großbetriebe und der Stadt Schweinfurt sicher zu stellen. Das Kraftwerk (Kohle und Müll) wird kraftwärmegekoppelt betrieben. Im Kohlekraftwerk wird deutsche Nusskohle als Primärenergieträger eingesetzt. 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 Veränderungen im Bereich der Feuerraumgeometrie, der Verbrennungsluftführung und –Mengenströme realisiert werden sollen. Diese Änderungen, die einen Eingriff in die Regelerstruktur der bestehenden Feuerungsregelung erforderlich machen, lassen sich mit dem „Alt“-System aufgrund fehlender Ressourcen und Programmquell-Codes nicht abbilden. Mitte 2006 wurden Ausschreibungsunterlagen erstellt und potenzielle Wettbewerber angefragt.

1.1 Anlagenbeschreibung

Die Feuerungen (Bauform Noell) sind jeweils mit drei voneinander unabhängig ansteuerbaren luftgekühlten Vorschubrosten (Einbahner mit einer wirksamen Rostbreite von 2,9 m) ausgestattet. Der Antrieb der Aufgabevorrichtung und der drei Roste erfolgt jeweils mit 2 hydraulisch betätigten Zylindern die über eine zentrale Hydraulik versorgt werden.

An der linken und rechten Seitenwand sind luftgekühlte Plattenluftfelder installiert.

Die Feuerungsanlagen sind mit einem Primärluft-, einem Sekundärluft- und einem Rauchgas-Rezirkulationsgebläse ausgestattet. Die Primärluftmenge wird aus dem Müllbunker angesaugt und druckseitig in den Unterwind- und den Plattenluftstrang aufgeteilt. Jedem Strang ist ein dampfbeheizter Luftvorwärmer zugeordnet. Die Luftvorwärmung ist in der der-

zeitigen Betriebsfahrweise nicht zugeschaltet. Der Unterwind wird in fünf Unterwindzonen verteilt und unter den Rost geführt (siehe Abbildung 1).

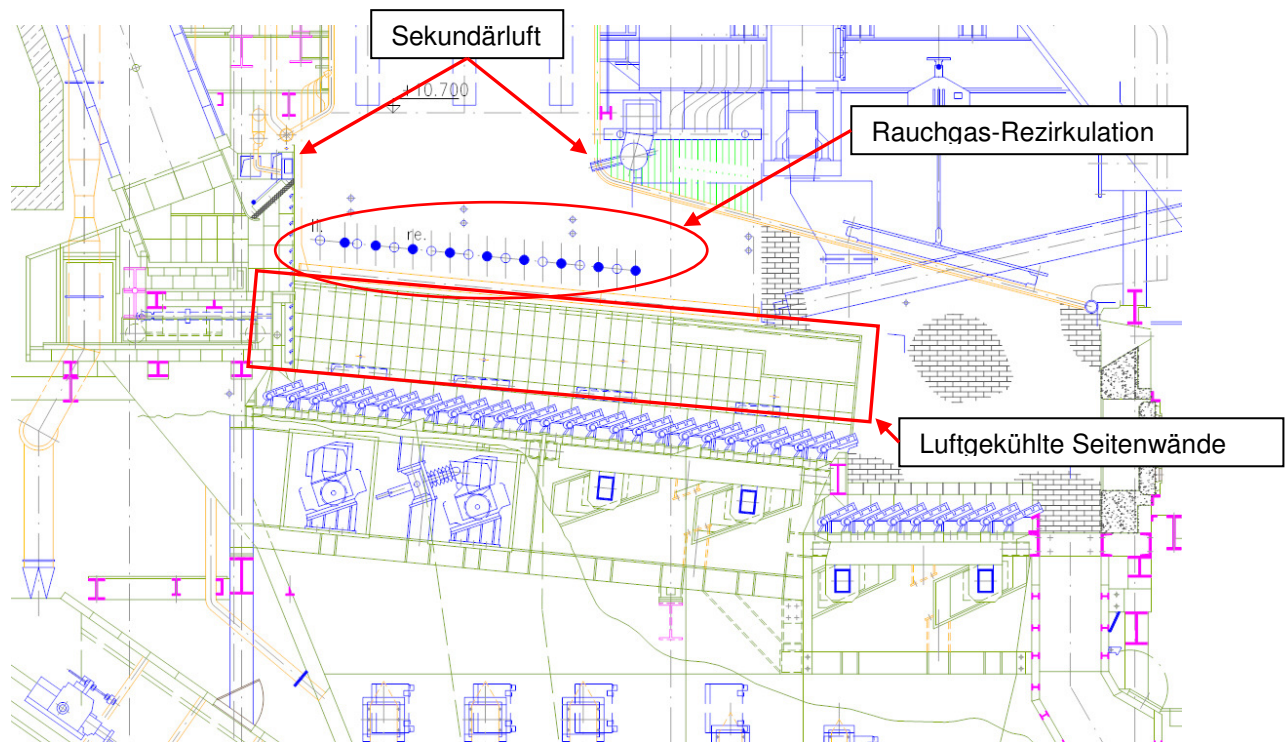


Abbildung 1: Längsschnitt Feuerung

Die Plattenluft wird auf 4 Plattenluftzonen aufgeteilt, wobei die Plattenluftzone 1 mit zwei Plattenluftfeldern an der Feuerungsseitenwand, Sturz 1, Sekundärluftbalken 1 und Aufgabevorrichtung die größte Plattenluftzone darstellt. Die Luftmengen der jeweiligen Unterwind- und Plattenluftzonen werden derzeit über Klappen geregelt, die Mengemessung erfolgt über Venturimessungen (parametrierter Messbereich max. 5.000 m³/h im UW; max. 8.000 m³/h im Plattenluftbereich). Die Sekundärluft wird durch jeweils einen an Vorder- und Rückwand liegenden Luftbalken zugeführt. Die Verteilung zwischen dem vorderen und hinteren Sekundärluftbalken erfolgt über eine Drei-Wege-Klappe, bei der alten FR nur über die Handvertrimmung am Bedien- und Beobachtungssystem (OM650).

Das Rauchgas-Rezirkulationsgebläse dient bei An- und Abfahrvorgängen sowie bei Ansprechen der Kesselsicherheitskette als Saugzug und leitet die Rauchgase nach der Vorentstaubung über einen Bypass in den Kamin ab. Im Normalbetrieb wird vorentstaubtes Rauchgas durch die Membranwände auf der linken und rechten Kesselseite oberhalb der Plattenluftfelder über jeweils 9 Düsen eingeblasen.

1.2 Anlagenrandbedingungen

Die Dampfmenge der MVA wird über eine gemeinsame Frischdampf-Sammelschiene auf zwei Turbinen zur energetischen Nutzung geleitet (Abbildung 2). Die Turbinen (bzw. die Umleitstationen) regeln den Systemdruck auf der Sammelschiene für die Müllkesselanlagen. Die Turbinen sind in ihrem Schluckvermögen auf jeweils 40 t/h Mülldampf begrenzt. Der an Turbine 1 installierte Kondensationsteil kann ebenfalls 40 t/h verarbeiten.

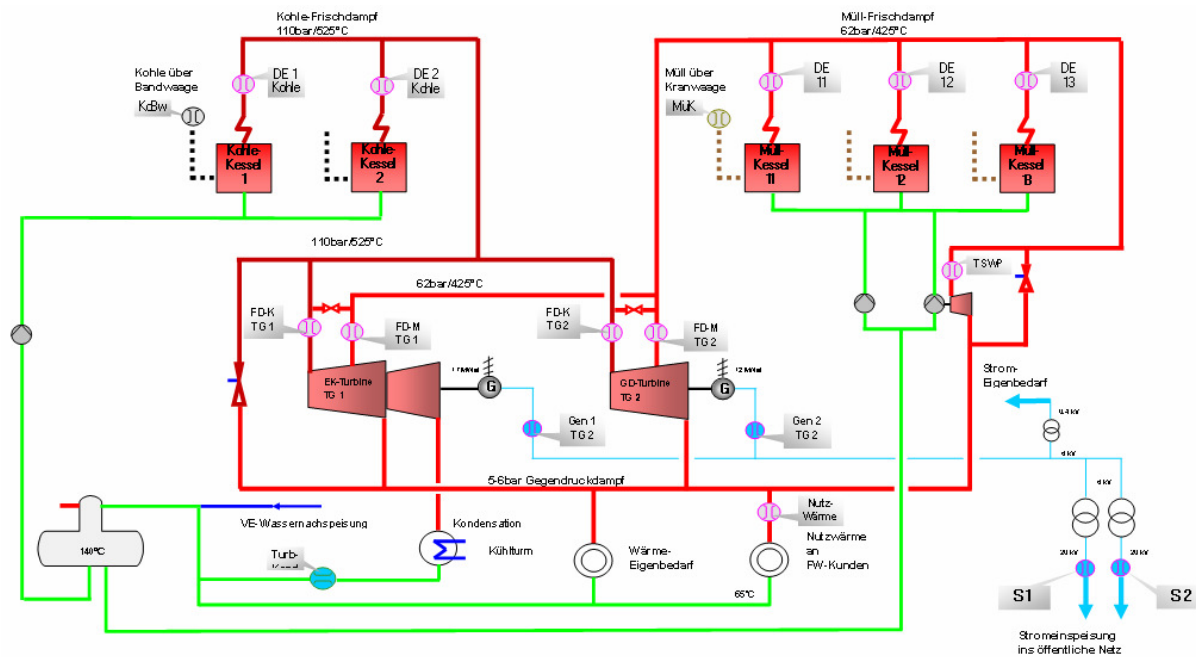


Abbildung 2: Blockschaltbild GKS Grundlastwerk

2 Aufgabenstellung Feuerungsregelung

Thermische Anlagen arbeiten innerhalb einer bestimmten Bandbreite der technisch möglichen Randbedingungen. Bei MVA's haben sich Feuerungsleistungsdiagramme (FLD) zur Beschreibung der Auslegungsbedingungen durchgesetzt (Abbildung 3). Innerhalb der im

FLD beschriebenen Grenzen soll die Anlage unter allen üblichen Betriebsbedingungen arbeiten und möglichst wenig Handeingriffe des Bedienpersonals erforderlich machen.

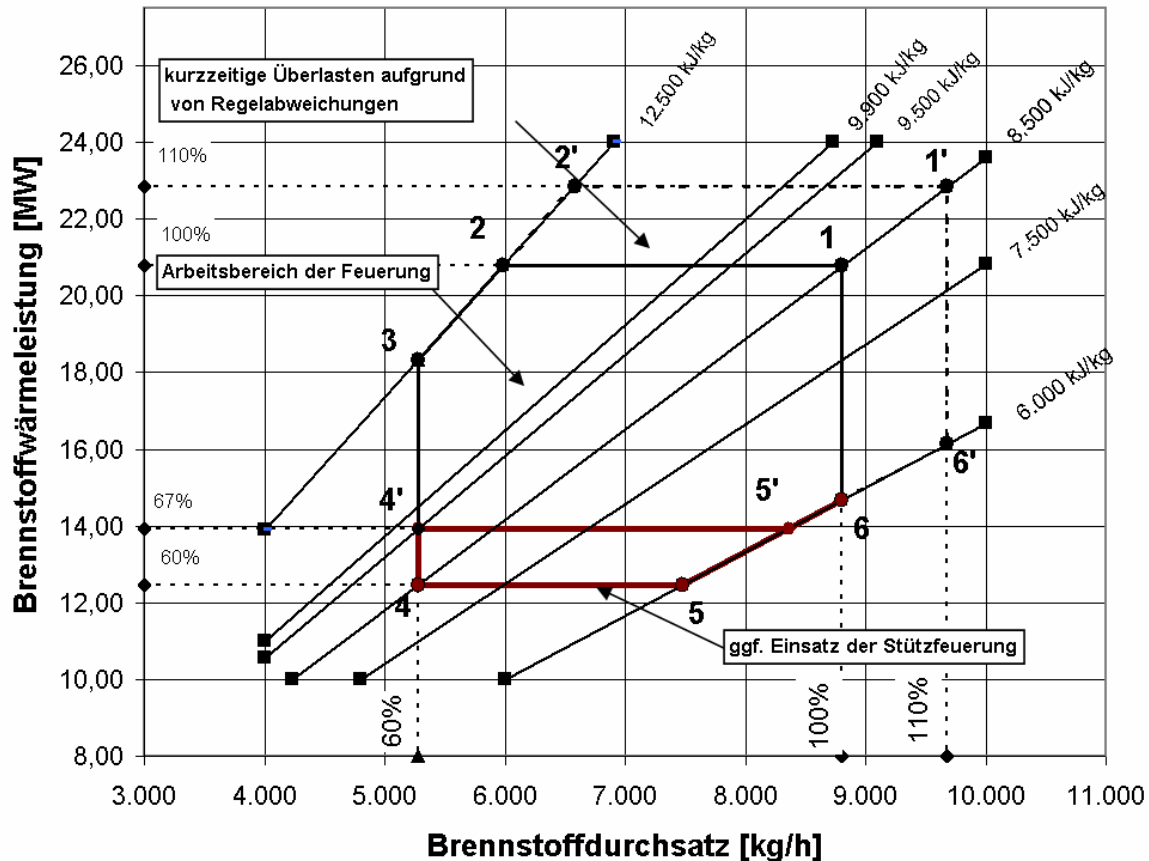


Abbildung 3: Feuerungsleistungsdiagramm nach Leistungserhöhung

Üblicherweise besteht die Aufgabenstellung für eine Feuerungsregelung darin über den Betriebszeitraum unter Berücksichtigung von allen relevanten Randbedingungen (Heizwert, Zusammensetzung, Bedienpersonal,) und Störgrößen eine konstante Wärmeentbindung zu erzielen. Hierbei ist die Einhaltung der von der durch die Feuerung beeinflussbaren Werten (z.B. Emissionswerte wie CO und NO_x oder Feuerraumtemperaturen) sowie die weitestgehende Vermeidung von Beeinträchtigungen und Schäden für die Anlage (z.B: Belagsbildung, Korrosion) zu beachten. Als Führungsgröße wird in der Regel die Dampfmenge in Form einer Sollwertvorgabe eingesetzt. Die Brennstoffwärmeleistung stellt grundsätzlich die richtige Führungsgröße für eine Regelung dar. Da aber hierbei gleich mehrere nicht unmittelbar messbare Größe enthalten sind (Heizwert, Brennstoffmassenstrom –starke Schwankungen durch Greiferbeschickung) bleibt die Frischdampfmenge (ermittelt über Differenzdruck –Blende- oder Staudruckmessung) mit den zugehörigen Parametern Druck und Temperatur als primäre Regelgröße.

Für GKS ist es auf Grund des Sammelschienen-Prinzips und dem Schluckvermögen der Turbinen relevant, dass die Anlagen mit einem konstanten Dampfsollwert betrieben werden. Auf Grund der brennstoffspezifischen Randbedingungen kann eine MVA nicht als „schnellregelbare“ Feuerung zum Ausgleich von Schwankungen auf der Abnahmeseite eingesetzt werden.

Für den optimalen Betrieb einer MVA ist es notwendig, dass innerhalb der Systemgrenzen unter Berücksichtigung von:

- Verhalten des Brennstoffes auf den Rost (Entgasung und Abbrand)
- Transport (Rost)
- Verbrennungsluftsystem (Unterwind, Plattenluft (GKS) und Sekundärluft)

das Regelverhalten der Stellgrößen effizient gestaltet wird. Nur so können Tendenzen in der Dampfproduktion effektiv in Richtung Sollwert beeinflusst werden. Weiterhin sind selbstverständlich die rauchgasseitigen Emissionswerte die nicht durch die Rauchgasreinigung beeinflusst werden relevant.

Auffällig ist, wie wenige Stellgrößen regelungstechnisch überhaupt ansprechbar bzw. notwendig sind. Eine grundsätzliche Übersicht gibt Abbildung 4.

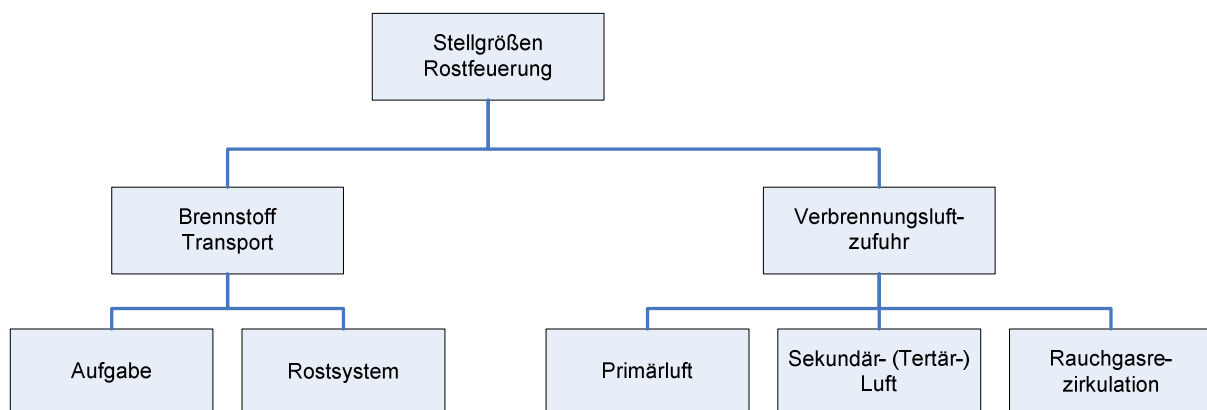


Abbildung 4: Grundsätzliche Stellgrößen für eine Rostfeuerung

Diese maximal 5 Stellgrößen können durch Untergliederung noch erweitert werden, z.B. durch mehrere voneinander unabhängig bewegbare Rostzonen (in der Länge, aber auch durch mehrbahnige Anordnung in der Breite) oder durch verschiedene Unterwindzonen.

Nichtsdestotrotz sind die Freiheitsgrade (Stellgrößen) der Regelung damit überschaubar und kein konfuses „Hightech-Hexenwerk“.

Im GKS (einbahniger Rost mit 3 getrennt regelbaren Rostzonen, 5 Unterwindzonen) stehen als Stellgrößen im Wesentlichen 16 Aggregate (Abbildung 5) zur Verfügung, die jeweils mit Stellungsrückmeldung und Störgrößenaufschaltungen in geschlossenen Regelkreisen abgebildet werden müssen (Abbildung 6).

Feuerungsregelung		
Primäre Stellgröße		Sekundäre Stellgröße
Transport	Verbrennungsluft	
Geschwindigkeit Aufgabe	UW Zone 1	Primärluftgebläse
Geschwindigkeit Rost 1	UW Zone 2	
Geschwindigkeit Rost 2	UW Zone 3	
Geschwindigkeit Rost 3	UW Zone 4	
	UW Zone 5	
	Plattenluft Zone 1	
	Plattenluft Zone 2	
	Plattenluft Zone 3	
	Plattenluft Zone 4	
	Sekundärluft	
Anzahl:	4	10
		2

Abbildung 5: Stellgrößen-Übersicht für das GKS

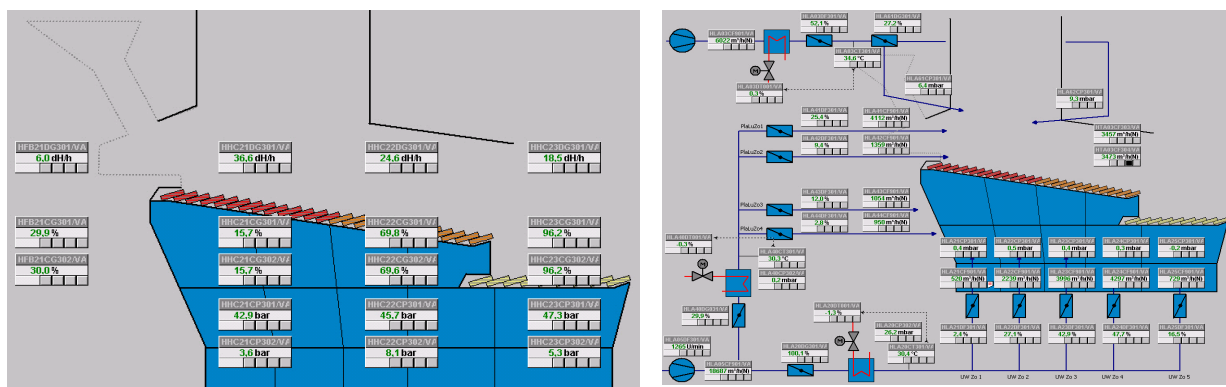


Abbildung 6: Stellgrößen im GKS (Visualisierung FR)

Während die für den Betrieb der Anlage relevanten Stellgrößen damit für jeden vergleichsweise einfach überschaubar sind, sind doch die Möglichkeiten der Ermittlung von Führungsgrößen vielfältig. Sie sind einerseits von der Reglerart und andererseits von der mehr oder

weniger intelligenten Realisierung des Reglers selbst abhängig. Gerade bei letzterem gibt es erhebliche qualitative Unterschiede.

3 Reglerarten

Für die bereits großtechnisch eingesetzten Regelungsverfahren werden im Folgenden Kapitel die Regelungsprinzipien (Fuzzy und künstliche neuronale Netze) der Vollständigkeit halber kurz erwähnt. Die komplexe Thematik der einzelnen Systeme wird im Detail nicht diskutiert.

Grundsätzlich ist zwischen einer Regelung und einer Steuerung zu unterscheiden. Eine Steuerung ist ein rein vorwärts gerichteter Prozess ohne Rückkopplung des Istwertes. Die Ausgangsgröße wird dabei nicht überwacht und kann sich durch Störungen von außen verändern. Ein einfaches Beispiel ist die Steuerung eines Motors mit einer einstellbaren Spannung. Durch Laständerungen wird sich die Drehzahl des Motors ändern. Soll nun die Drehzahl konstant gehalten werden, bedarf es einer Rückkopplung um über die Spannung die Drehzahl anzupassen. Diese Rückkopplung ist das Kennzeichen einer Regelung. Das Regeln ist ein Vorgang, bei dem die Ausgangsgröße, im Beispiel die Drehzahl, fortlaufend überwacht wird und bei Abweichung über die Stellgröße, im Beispiel die Spannung, korrigiert wird. Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis, statt.

3.1 Regelungsgrundlagen

Regler: Ist der Teil des Regelkreises, der unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke aus der Regelabweichung die Korrekturmaßnahmen zum Ausregeln ergreift.

Regelstrecke: Ist der Teil des Regelkreises, der vom Regler geregelt werden soll.

Führungsgröße (Sollwert) w : Vorgegebener Wert, auf dem die Regelgröße durch die Regelung gehalten werden soll. Sie ist eine von der Regelung nicht beeinflusste Größe und wird von außen zugeführt.

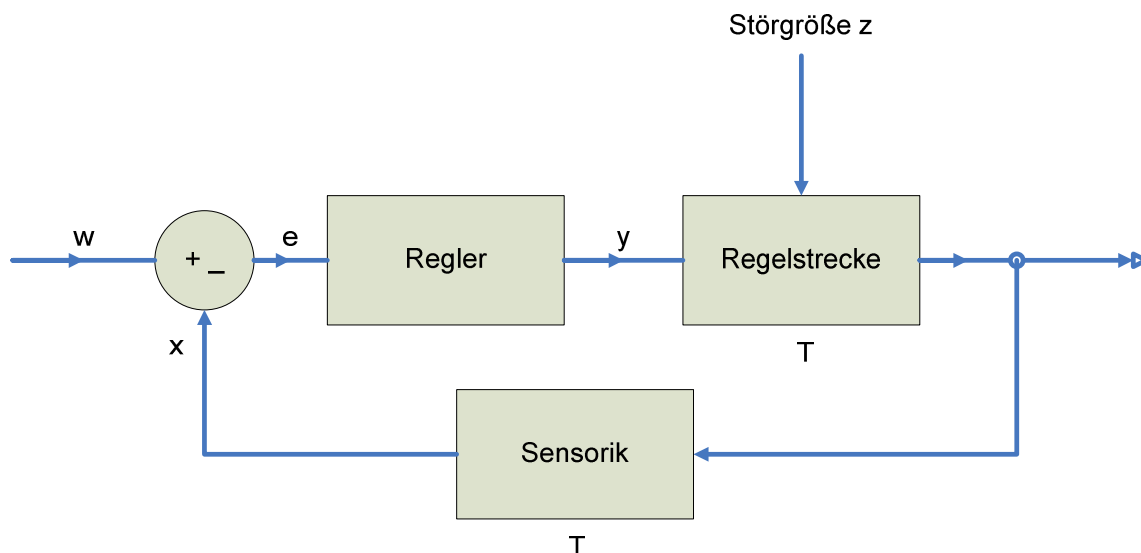
Regelgröße (Istwert) x : Ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke, die zum Zweck des Regels erfasst und zum Vergleich rückgeführt wird. In der Rückführung noch eine Messeinrichtung (Sensor) installiert, die den Istwert erfasst.

Regelabweichung e : Differenz zwischen Führungsgröße und Regelgröße $e = w - x$, bildet die eigentliche Eingangsgröße des Reglers.

Stellgröße y : Ausgangsgröße der Regeleinrichtung und zugleich Eingangsgröße der Strecke. Sie überträgt die steuernde Wirkung des Reglers auf die Strecke.

Störgröße z : Eine von außen wirkende Größe, die eine Änderung des Istwertes der Regelgröße bewirkt und einen Regelvorgang auslöst.

Totzeit T : Verzögerungen durch Regelstrecke, Sensorik und Messgrößenaufbereitung



- w: Soll-Wert
- x: Ist-Wert (Rückführung über Sensorik)
- e: Regelabweichung
- y: Stellgröße
- z: Störgröße
- T: Totzeiten in Sensorik und Anlage (Regelstrecke)

Abbildung 7: Regelkreis

In thermischen Anlagen sind die Einflussgrößen auf die Regelkreise (Abbildung 7) deutlich umfangreicher und die Verschaltungen innerhalb der Regelstrecke komplexer. Die von der Feuerungsregelung unter der Berücksichtigung der Störgrößen und Istwerte ermittelten Sollwerte müssen in der Prozessebene nochmals in Regelkreisen (Beispiel Unterwind: Stellorgan Klappe, Istwert über Venturimessung) verarbeitet werden.

In der gesamten Regelstrecke kann es prozessbedingt und durch die eingesetzte Messtechnik zu erheblichen Totzeiten kommen die bei der Parametrierung der einzelner Regelbausteine berücksichtigt werden müssen. Ohne ein genaues Wissen um das dynamische Verhalten der Regelstrecke ist es nicht möglich geeignete Regler auszuwählen und diese zu parametrieren (Abbildung 8).

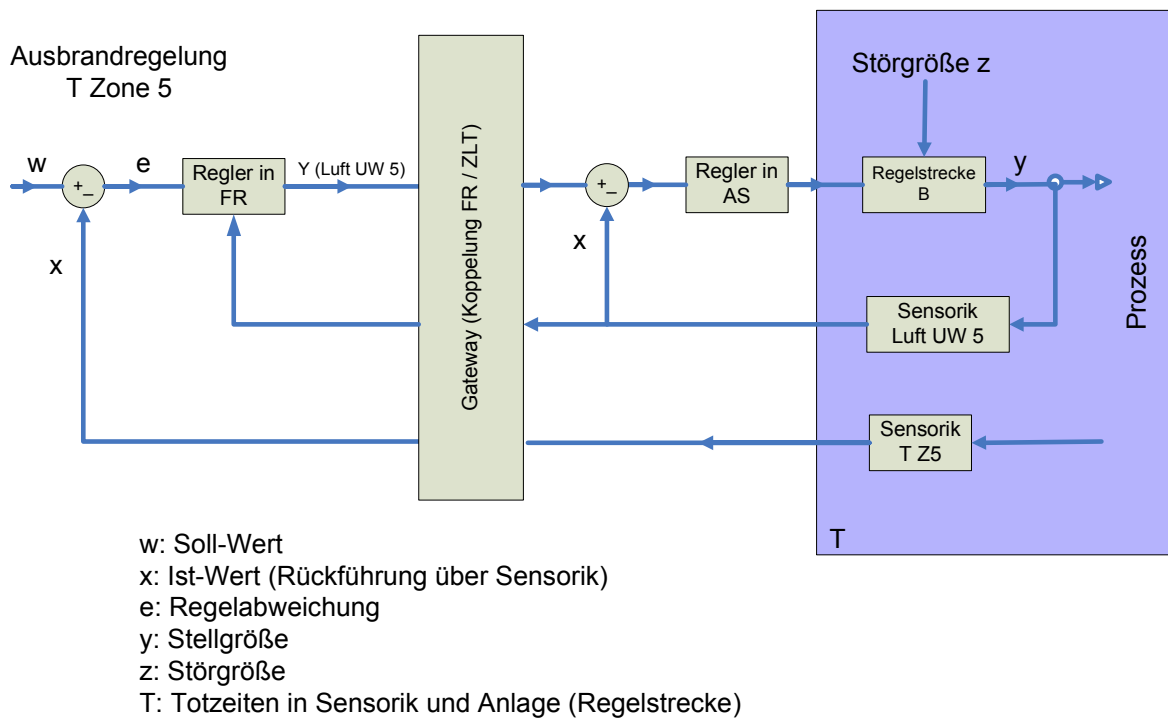


Abbildung 8: Regelkreis Anlage, Beispiel UW Zone 5 (Ausbrandregelung)

3.2 Regelungssysteme

Es werden 4 unterschiedliche Regelungssysteme unterschieden:

1. PID-Regler
2. Fuzzy-Regler
3. Künstliche Neuronale Netze
4. Modellprädiktive/Modellbasierte Regler.

3.2.1 PID-Regler

Der PID-Regler setzt sich aus drei Komponenten zusammen, die in ihren jeweiligen Stellgrößen meistens additiv zu einer gemeinsamen Stellgröße verarbeitet werden.

P-Anteil: Die Ausgangsgröße verhält sich proportional zur Regelabweichung.

Der proportionalwirkende Regler multipliziert die Regelabweichung mit seinem Verstärkungsfaktor **K_p** und gibt das Ergebnis unverzögert weiter. Der P-geregelte Kreis ist einfach und kann als mittelschnell bezeichnet werden. Der Nachteil ist eine bleibende Regelabweichung.

I-Anteil: Der integralwirkende Regler summiert die Regelabweichung über der Zeit auf und multipliziert die Summe (d.h. das Integral) mit dem Faktor **K_i**. Je länger eine Regelabweichung ansteht, desto größer wird die Stellgröße des I-Reglers. Der I-geregelte Kreis kann als langsam bezeichnet werden. Er hat aber den Vorteil, dass die Regelabweichung vollständig eliminiert wird.

D-Anteil: Der D-Anteil bewertet die Änderung einer Regelabweichung (er differenziert) und berechnet so deren Änderungsgeschwindigkeit. Diese wird mit dem Faktor **K_d** multipliziert.

Ein D-Anteil kann nicht eigenständig arbeiten und wird mit reinen P-Reglern und/oder PI-Reglern kombiniert. Wird der D-Anteil zum P-Anteil hinzuaddiert, so reagiert der PD-Regler damit schon auf Ankündigungen von Veränderungen. Das bewirkt sozusagen ein Vorhalten beim Regeln.

Die Kombination von P- und I-Regler zu einem PI-Regler bringt den Vorteil des P-Reglers, nämlich schnelle Reaktion, mit dem Vorteil des I-Reglers, der exakten Ausregelung zusammen. Der PI-geregelte Kreis ist also genau und mittelschnell.

Der PID Regler ist der universelle und klassische Regler. Er vereinigt die guten Eigenschaften aller Regler-Komponenten. Der PID-geregelte Kreis ist genau und sehr schnell.

Der Einsatz des PID-Reglers in MVA Feuerungsregelungen ist die „konventionelle“ Regelungsart.

3.2.2 Fuzzy-Regler

Ein Fuzzy-Regler ist ein nichtlinearer Kennfeld- oder Zustandsregler. Dieser bietet bei einfachen Systemen eine hohe Transparenz bei gleichzeitiger Flexibilität. Der Fuzzy-Regler eignet sich daher sehr gut dafür, Anwenderwissen in einen Regler umzusetzen ohne dabei ein kompliziertes Systemmodell erstellen zu müssen. Voraussetzung ist allerdings, dass das erforderliche Wissen zur Verfügung steht.

Wenn, wie bei GKS, die FR zu nahezu 100 % im Automatikbetrieb (abgesehen von Vertrimmungen) läuft, ist die Frage wo dieses erforderliche Wissen herkommt? Mittlerweile sind ausreichende Erfahrungen im MVA Bereich mit diesem Regelungssystem vorhanden, so dass diese Wissenslücke durch den Regelungsspezialisten ausgeglichen werden kann.

Der Fuzzy-Regler bestimmt die Ausgangsgröße aus der Regelabweichung durch Abarbeitung von drei Schritten (Fuzzyifizierung, Fuzzy-Inferenz, Defuzzyifizierung).

Die Weiterführung von Regelungskonzepten sieht eine Kombination aus Fuzzy-Regler und künstlichen Neuronalen Netzen vor. Die rein fuzzy-basierenden Regelgrenzen werden hierbei zusätzlich durch die Bewertung des aktuellen Anlagenzustandes über Neuronale Netze ergänzt.

3.2.3 Künstliche Neuronale Netze

Bei den Neuronalen Netzen werden, in Anlehnung an die Natur, Netzwerke von Knotenpunkten (Neuronen) aufgebaut. Diese Neuronen bearbeiten einzelne einfache Aufgaben. Miteinander zu einem komplexen Netzwerk verknüpft können komplexe Regelungsaufgaben bewältigt werden. Dem Neuronalen Netz muss das Prozess- bzw. Anlagenverhalten in einer Lernphase beigebracht werden. Weiterhin lernt das Netz während des Anlagenbetriebes. Bei entsprechender Rechenleistung sind Prognosen über das zu erwartende Anlagenverhalten möglich. Neuronale Netze sind im weitesten Sinne Systeme mit statistischem Hintergrund. Nicht gelernte Zustände können nicht geregelt werden, da sie statistisch nicht auswertbar sind.

3.2.4 Modellprädiktive/Modellbasierte Regler

Grundlage für diesen Reglertyp sind physikalisch-chemische Modelle, die die Vorgänge im Prozess abbilden. Modellprädiktive Regler sind in der Lage auf der Basis der Modelle das Verhalten einer Anlage vorherzusagen. Sie sind selbst eigenständige Regler. In der Regel gibt es noch Probleme mit der Güte des Modells in Relation zur realen Anlage. Modellbasierte Regler setzen auf einem der 4 Regelsysteme (in der Regel auf einem PID-Regler) auf und nutzen ein Modell, um z.B. nicht oder ungenau messbare Größen zu berechnen und als zusätzliche „Sensor-Größen“ einzuwirken.

4 Feuerungsregelung mit PID Regler

GKS hat sich bereits im Vorfeld der Anfrage für den Einsatz einer auf PID-Basis arbeitenden Regelung entschieden. Die Gründe für diese Entscheidung waren:

1. Sehr guten Erfahrungen mit der bisherigen Feuerungsregelung
2. Die Zusammenhänge der verschiedenen Einflussgrößen lassen sich mit PID-Regelbausteinen gut beschreiben.
3. Physikalische Zusammenhänge und kinetische Abläufe sind mathematisch zu beschreiben.
4. Modellbasierte Informationen können leicht als zusätzliches Modul integriert werden.
5. Die Regelungen der gesamten Kraftwerkstechnik basiert im GKS auf PID-Regelbausteinen, somit ist im leittechnischen Bereich Know-how vorhanden, um bei Bedarf das Regelsystem an Veränderungen der Betriebsbedingungen anzupassen.
6. Das Regelkonzept und das Einwirken der Regelung sind dem Betriebspersonal gut plausibel zu machen. „Der Anlagenfahrer versteht, was die Anlage macht“ und kann falls notwendig überlegt eingreifen, wodurch er auch in Grenzbereichen noch ein Gefühl für die Anlage hat.

4.1 Anforderungen an die neue Feuerungsregelung (Software)

Die Programmierung der neuen Feuerungsregelung wurde in Anlehnung an den Altbestand ausgeführt. Wesentliche Berücksichtigung fanden nachstehende Punkte:

- Strukturierte, einfache und nachvollziehbare Parametrierung.
- Offene, transparente Programmstrukturen. Der Programm-Quellcode ist offen zugänglich.
- Hierarchie-Ebenen, jeweils durch Password geschützt
- Archivierung von Prozess- und Reglerdaten über einen Zeitraum von mindestens 6 Monaten sowie Exportfunktion in die Bürowelt.
- Grafische Visualisierung der Reglerausgänge über Zeiträume von 30 Minuten bis zu mindestens 24 Stunden
- Möglichkeit zur Fernwartung und Einbindung in das Büronetzwerk.
- Modularer Programmaufbau mit ausreichenden Platzreserven für Erweiterungen.
- Zusätzliche Koppelmöglichkeit von Fremdsystemen.

4.2 Aufbau und Struktur

Die Parametrierung erfolgt über die Engineering-Station bzw. über Web-Anbindung in der Bürowelt. Für das Fahrpersonal steht in der Warte ein zusätzlicher Visualisierungsmonitor zur Verfügung. Hier können alle Bedien- und Parametrierbilder sowie die zugehörigen MFA (Melde-Folge-Anzeigen), im Wesentlichen die Fehlermeldungen aus der ebenfalls neu integrierten Hydrauliksteuerung, angezeigt werden.

Die eigentliche Bedienung der Anlage erfolgt über die OM-Terminals (Abb. 9) der zentralen Leittechnik. Hier sind alle für den Betrieb der Anlage relevanten Größen und Stellorgane verfügbar.

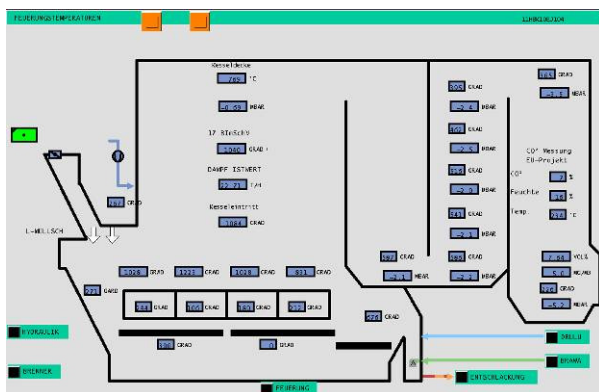
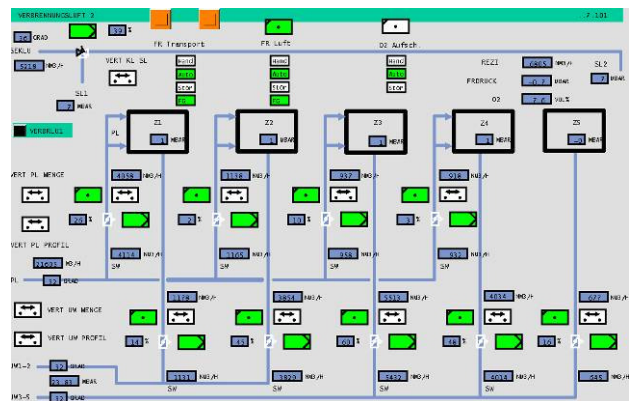
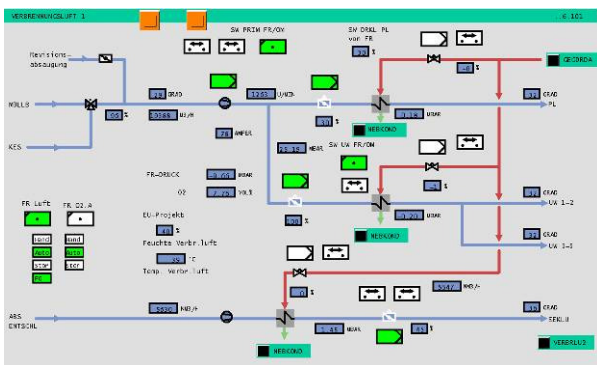
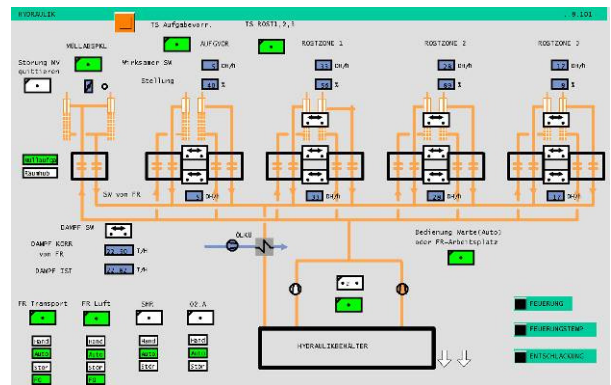
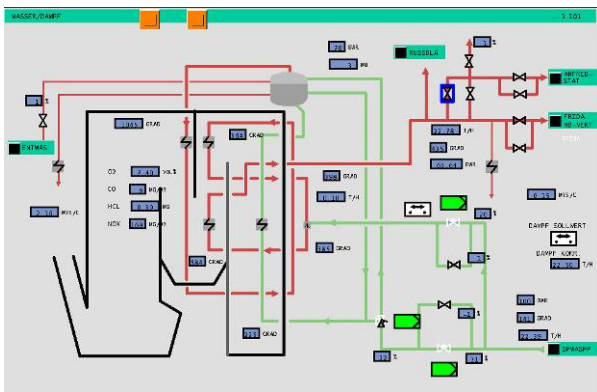


Abbildung 9: Bedien- und Beobachtung OM 650

Die Feuerungsregelung ist strukturiert und modular aufgebaut (Abb. 10). Es wird nach Transport (mittelfristige und langfristige Beeinflussung) und Verbrennungsluftführung (kurzfristige Beeinflussung) unterschieden.

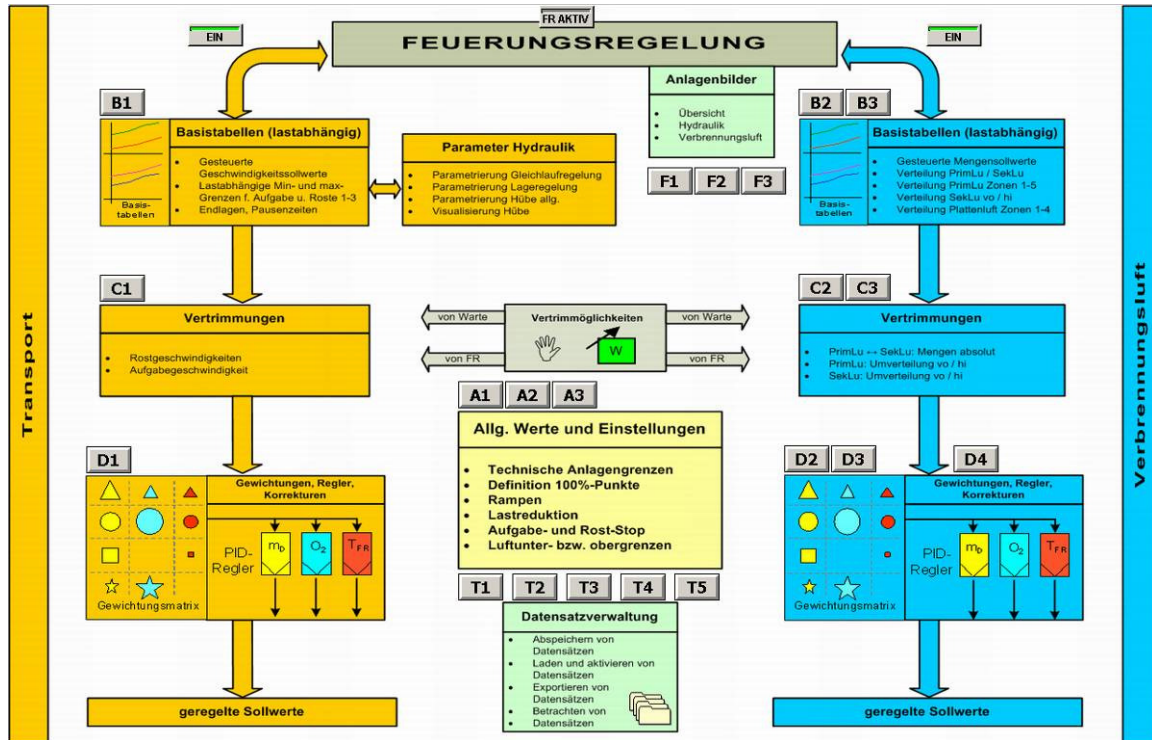


Abbildung 10: Modularer und strukturierter Aufbau der FR

Für jeden Bereich sind jeweils die Bereiche

- Basistabellen
- Vertrimmungen
- Gewichtungen der Reglerbausteine mit Sollwertausgabe

vorhanden.

Zusätzlich sind allgemeine Grenzkriterien und Rampenfunktionen definiert. Trendaufzeichnungen mit vordefinierten Größen sind ebenfalls abzurufen.

Über entsprechende Sprungmarken gelangt man zu den jeweiligen Parametrierbildern.

4.2.1 Basistabellen und Vertrimmung

Für jeden Funktionsbereich (Transport und Verbrennungsluft) sind entsprechende Tabellen generiert, in denen für verschiedene Lastpunkte entsprechende Basiswerte (Abb. 11) festgelegt sind. Befindet sich die Anlage in einem Lastpunkt zwischen zwei Stützpunkten so wird entsprechend interpoliert.

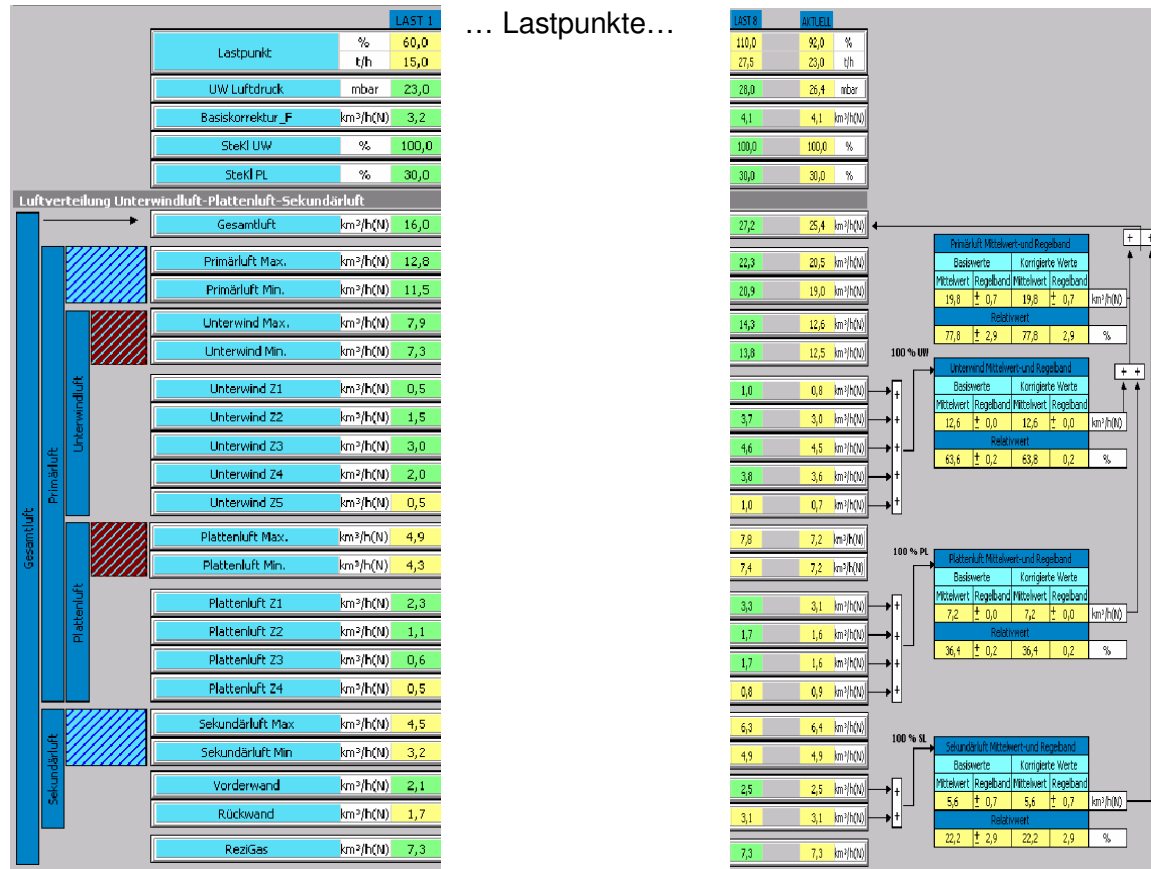


Abbildung 11: Basistabellen (Beispiel Verbrennungsluft)

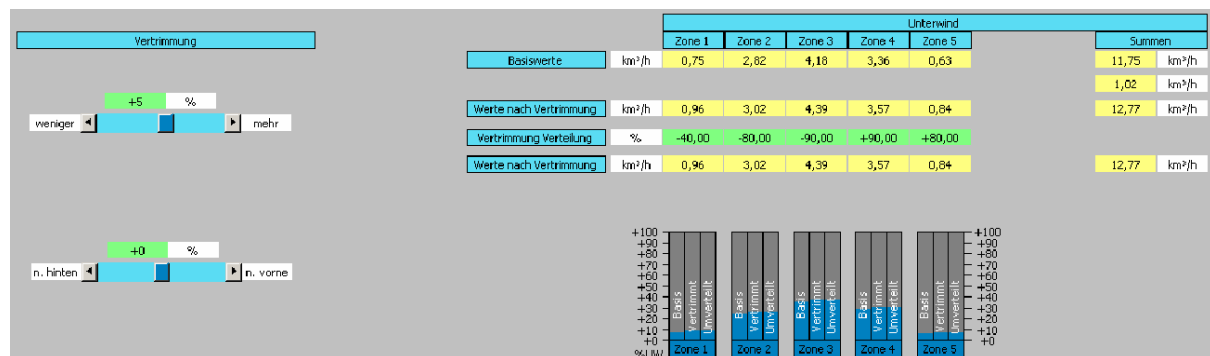


Abbildung 12: Vertrimmungen (Unterwind Menge und Profil)

Die ermittelten Basiswerte werden anschließend durch ggf. vom Fahrpersonal eingestellte Vertrimmungen (Abb. 12) korrigiert. Als Vertrimmmöglichkeit sind im Unterwindbereich sowohl die Menge als auch das Profil entlang des Rostes (kürzeres- oder längeres Feuer) möglich. Im Bereich Transport sind Vertrimmmöglichkeiten für die Aufgabe, Rost 1, 2 und 3 vorhanden.

4.2.2 Gewichtung und Sollwertgenerierung

	ZONE 1 ■		ZONE 2 ■	
	Gewichtung / Korrekturfakt.		Gewichtung / Korrekturfakt.	
Dampfmenge	+15,0	-0,01	+45,0	-0,03
O2-Luft	+0,0	+0,00	+15,0	-0,02
FT-Luft	+0,0	+0,00	+5,0	-0,03
Feuerraumtemp. Z1	+5,0	+0,05	+0,0	+0,00
Feuerraumtemp. Z2	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
Feuerraumtemp. Z3	-5,0	-0,03	-10,0	-0,05
EXT1	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
EXT2	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
EXT3	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
EXT4	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
EXT5	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
EXT6	+0,0	+0,00	+0,0	+0,00
Summe	+0,01		-0,13	
Basiswert	1,0	km ³ /h	3,0	km ³ /h
Basiskor.	4,1	km ³ /h	4,1	km ³ /h
Korrekturwert	0,1	km ³ /h	-0,5	km ³ /h
Sollwert	1,0	km ³ /h	2,5	km ³ /h

Abbildung 13: Gewichtung der einzelnen Regler auf die entsprechenden Stellorgane (Beispiel Unterwind)

Die verschiedenen Störgrößen werden mittels Gewichtungsfaktoren auf die jeweilige Stellgröße aufgeschaltet. Die hieraus ermittelten Korrekturwerte bilden additiv den geregelten Sollwert.

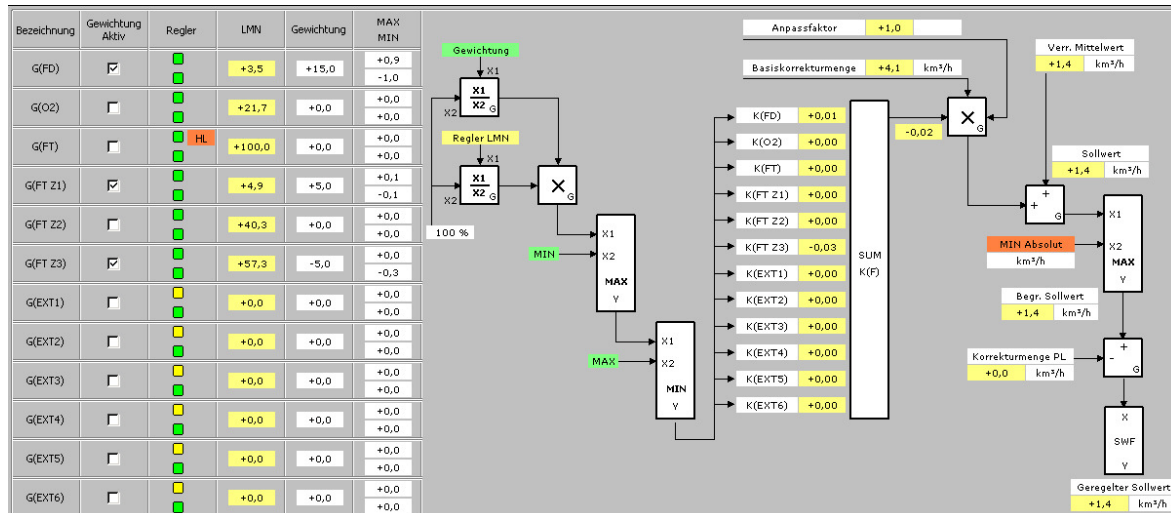


Abbildung 14: Detail der Korrekturwertermittlung (Beispiel UW Zone 1)

Alle Reglerbausteine sind als PID-Stetigregler (Abb. 15) aufgebaut. Die I- und D-Anteile der Regler sind meistens (noch) deaktiviert. Nur im Bereich Transport erfolgt bei der Aufgabe und bei Rost 1 eine Aufschaltung des I-Anteils.

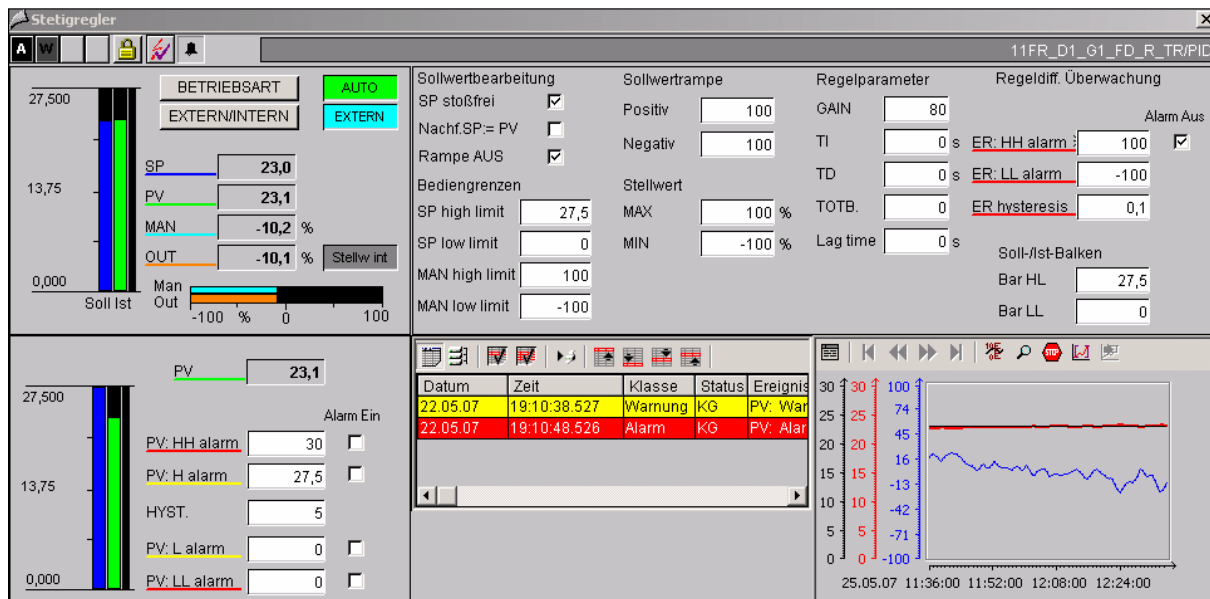


Abbildung 15: Detail eines Stetigreglers (PID) mit entsprechenden Einstellmöglichkeiten

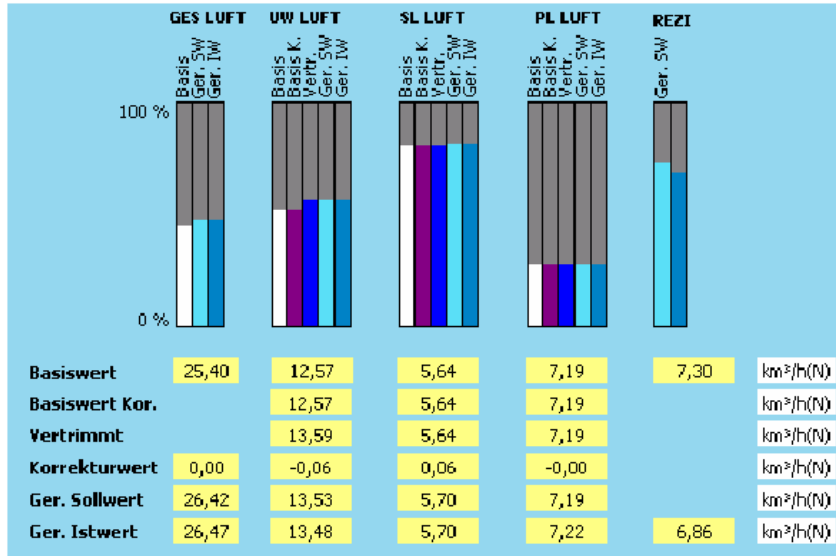


Abbildung 16: Darstellung Basis-Werte, Vertrimmungen, Korrektur durch Regler, Soll-Wert, Ist-Wert

Diese Darstellung ist für jeden Parameter bzw. für jedes System abrufbar. Sie stellt einfach und übersichtlich die entsprechenden Parameter dar (Abbildung 16 und 17).

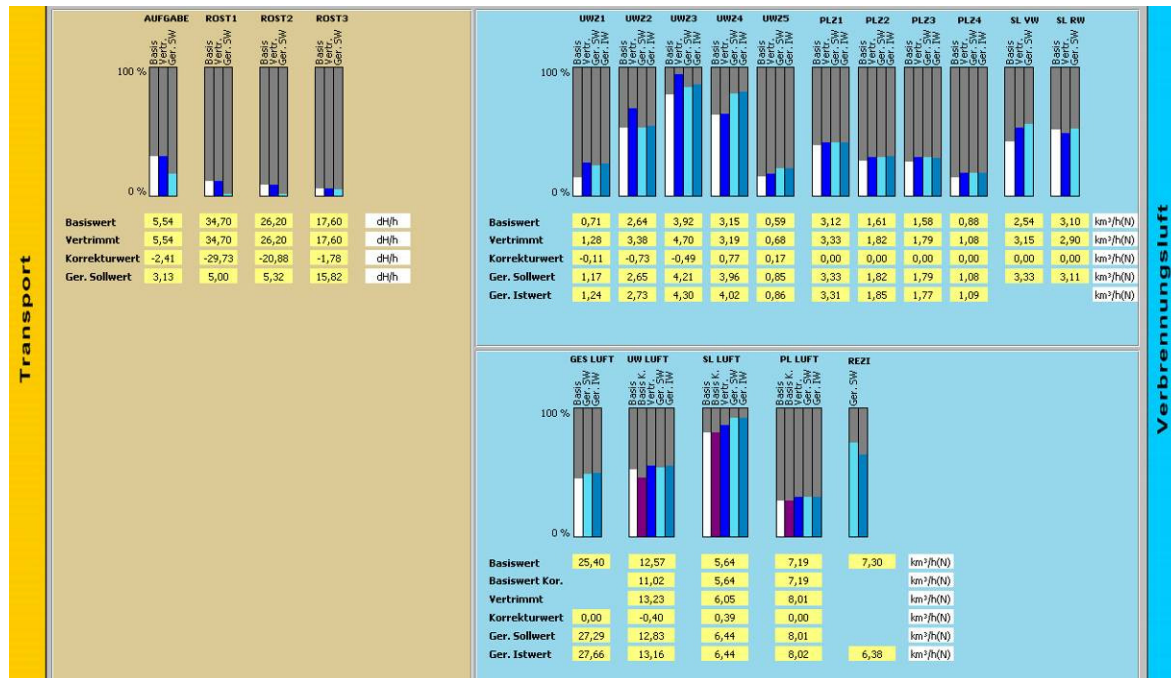


Abbildung 17: Gesamtübersicht Basis-Werte, Vertrimmungen, Korrektur durch Regler, Soll-Wert, Ist-Wert

5 Einbindung in die übergeordnete Leittechnik

Grundsätzlich können Fremdsysteme über verschiedene Möglichkeiten an die Prozessleittechnik angekoppelt werden. Als Schnittstellen stehen offene Systeme wie z.B. OPC-Server und -Client Systeme, Gateways usw. zur Verfügung.

Werden Regelungssysteme als „Black-“ oder „White-Box“ in eine übergeordnete Leittechnik implementiert, so werden mehrere Regelkreise hintereinander geschaltet.

Beispiel Luftmenge UW Zone X (s. Abb. 8):

Die Feuerungsregelung gibt einen Sollwert über die Schnittstelle auf den Anlagenbus / Baugruppe. Innerhalb der Baugruppe werden der Sollwert und der Ist-Wert innerhalb eines PI(D)-Reglers als geschlossener Regelkreis verarbeitet. Auf Grund dessen ist es relevant, dass beide Regelkreise (PID der FR und PI(D) der Leittechnik aufeinander abgestimmt werden und innerhalb des Regelkreises in der Leittechnik keine bzw. eine unrelevante bleibende Regelabweichung besteht.

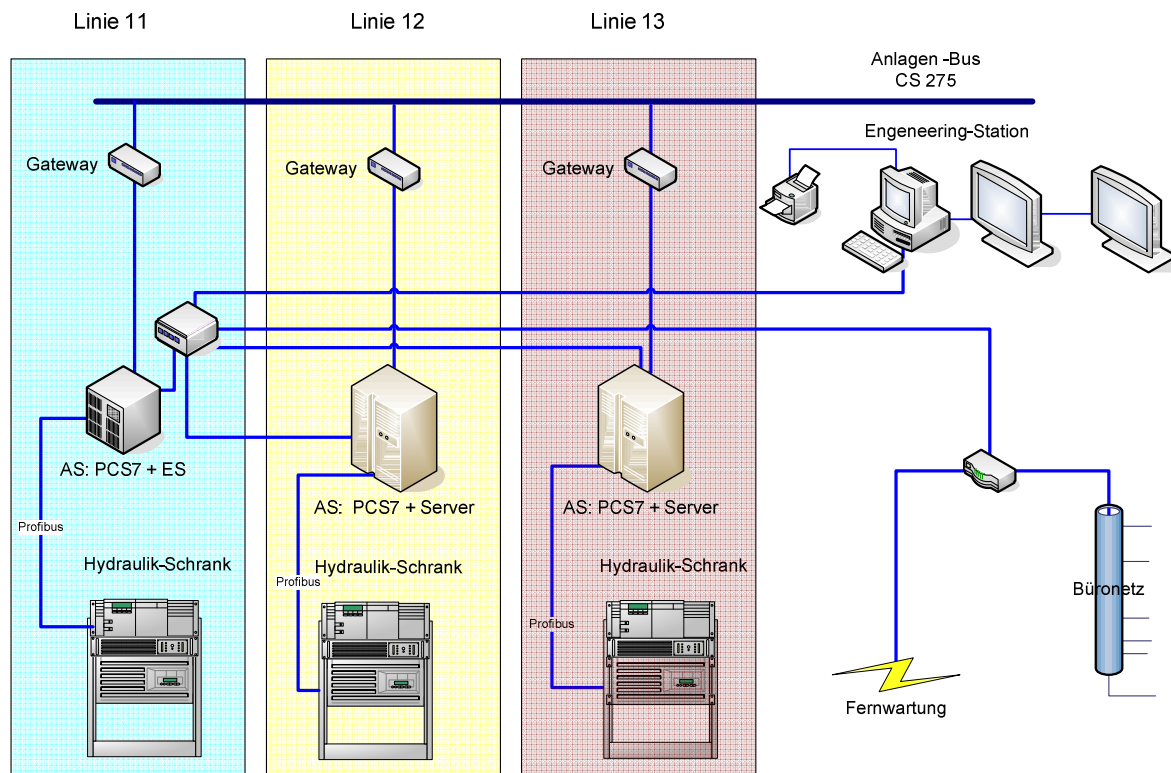


Abbildung 18: Schematische Darstellung der LT-Einbindung

Im System Plattenluft erfolgt nur noch eine Verschiebung innerhalb des Systemes bei Überschreitungen von Konstruktionstemperaturen. Somit wird mit beiden Maßnahmen eine Reduzierung der Plattenluftmengen insbesondere in der ersten Zone erreicht. Dieses hat den positiven Effekt, dass aufgrund der geringeren Luftmengen in diesem Bereich die freigesetzten Flüchtigen aus dem Brennstoff nicht sofort durchzündend und zu einem Anstieg der Temperaturen in diesem Bereich führen.

Schichthöhenregelung

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 wesentlich deutlicher bemerkbar machen als die Schichthöhe, war diese Einflussgröße nahezu zu Null gewichtet.

Bei der neuen Regelung wurden im Unterwindbereich zusätzliche Druckmessungen installiert, um über diesen Wert auf die Schichthöhe des Müllbettes zu schließen. Auch dieses System zeigt bei unseren Rosten nicht das gewünschte Ergebnis. Der Druck in Unterwindzonen lässt keinem reproduzierbaren Rückschluss auf die Schichthöhe zu. Somit ist dieses Modul auch bei der neuen Feuerungsregelung nicht aktiv.

In wieweit sich aus dem „Brennstoff- und Rostmodell“ (siehe Vortrag Warnecke) verwertbare Daten erzeugen lassen wird sich zeigen. Das System wird als zusätzliches Tool an die Anlage via OPC Schnittstelle gekoppelt und validiert.

Sauerstoffregelung

Der Sauerstoffgehalt konnte bei der alten Regelung über verschiedene Module geregelt werden. Neben einer anfänglichen Polygonzug-Regelung (Veränderung Gesamtluft über O₂) war eine über Gradienten bewertete Regelung des Sauerstoffwertes aktiv.

Die neue O₂-Regelung basiert auf Basistabellen mit entsprechenden Stützpunkten über der Kessellast.

6.2 Regelgüten

Nachstehend werden verschiedene relevante Parameter der alten Feuerungsregelung mit der neuen verglichen. Als Betrachtungszeitraum wird der Monat April im Jahr 2006 und Monat April im Jahr 2007 herangezogen. Die Daten werden als 10 Minuten-Mittelwerte aus der Leittechnik abgefragt. Die Zykluszeit der Datenerfassung liegt bei 10 Sekunden.

Die Anlage wurde in 2006 am 23. Februar nach der Jahresrevision angefahren. In 2007 erfolgte der Einbau der neuen Regelung im Zeitraum der Jahresrevision. Die Linie 11 wurde am 26.02.2007 mit der neuen Feuerungsregelung in Betrieb genommen und entsprechend optimiert. Der Probetrieb wurde am 03.04.2007 erfolgreich abgeschlossen.

Somit sind saisonale Einflüsse auf Müllzusammensetzung und Anlagenbetriebszeit nach Revision vernachlässigbar.

6.2.1 Regelgüte der Dampfproduktion

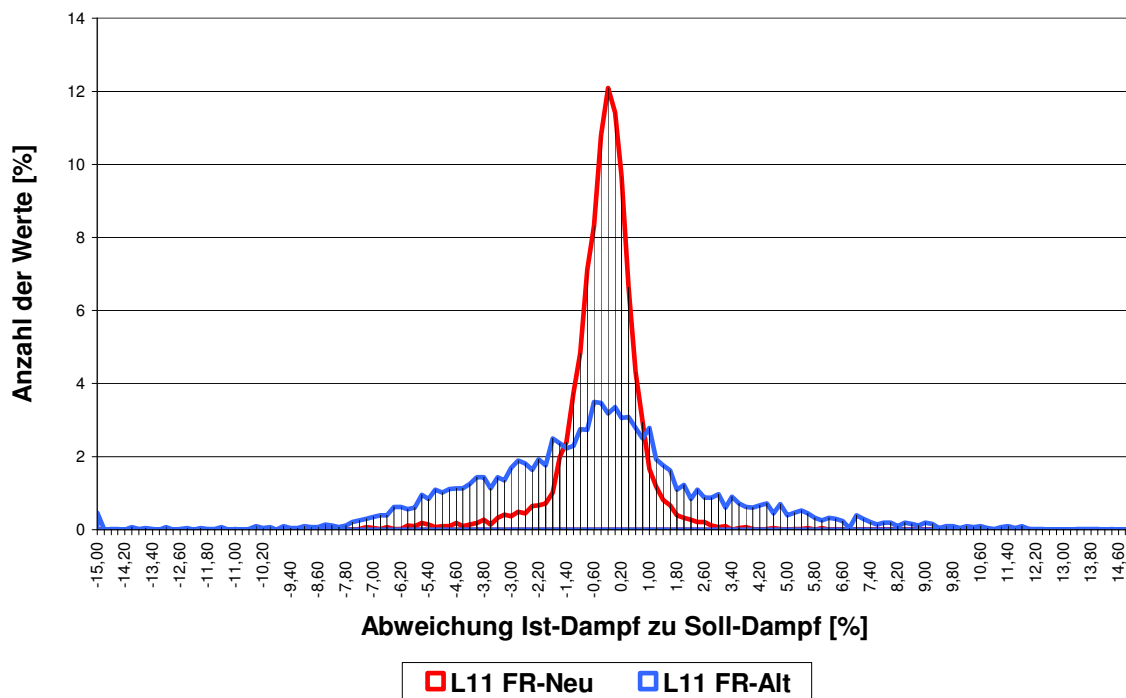


Abbildung 20: Regelgüte Dampfproduktion

Die dargestellte Häufigkeitsverteilung zeigt die prozentuale Abweichung des Ist-Wertes-Dampf vom vorgegebenen Sollwert (Abbildung 20). Auf der Ordinate ist die Anzahl der Werte in Prozent in der jeweiligen Klasse dargestellt. Die Standardabweichung für 2006 beträgt $\sigma = 0,83$ t/h bzw. 3,79 %. In 2007 beträgt die Standardabweichung $\sigma = 0,56$ t/h bzw. 1,30 %.

Somit lagen mit der alten Feuerungsregelung 95 % aller Dampfwerte innerhalb einer Schwankungsbreite von $\pm 1,66$ t/h bzw. $\pm 7,58$ % um den Mittelwert.

Bei der neuen Feuerungsregelung lagen 95 % aller Dampfwerte innerhalb einer Schwankungsbreite von $\pm 1,12$ t/h bzw. $\pm 2,60$ % um den Mittelwert.

Somit ist eine deutliche Steigerung der ohnehin nicht schlechten Regelgüte erkennbar die über einen langen Zeitraum erreicht wird.

Zum Vergleich ist in Abb. 21 die Häufigkeitsverteilung für den Monat Mai 2006 und 2007 dargestellt. Es ist deutlich, dass in diesem Zeitraum ebenfalls eine Verbesserung der Regelgüte erreicht wurde.

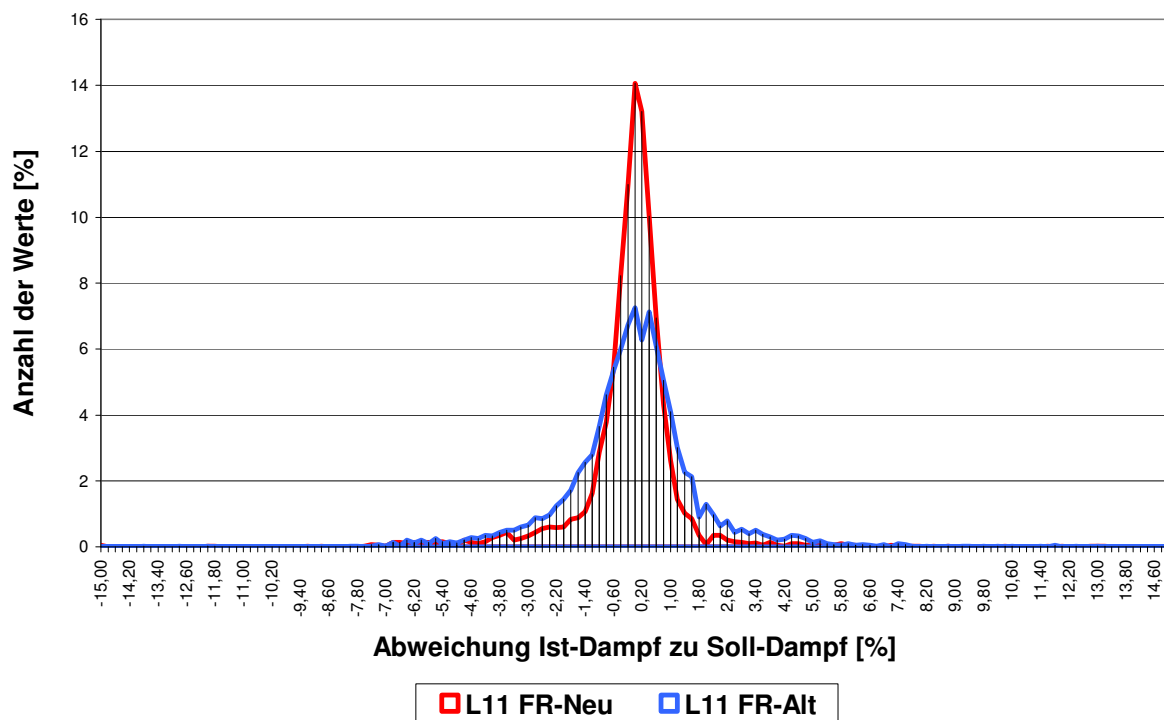


Abbildung 21: Regelgüte Dampfproduktion Mai 2006 / Mai 2007

6.2.2 CO-und Sauerstoff-Werte am Kesselende

Als weiterer relevanter Parameter wird die CO-Konzentration (Angaben in mg/m^3 (i.N., tr.)) am Kesselende über den gleichen Auswertezeitraum betrachtet (Abbildung 22).

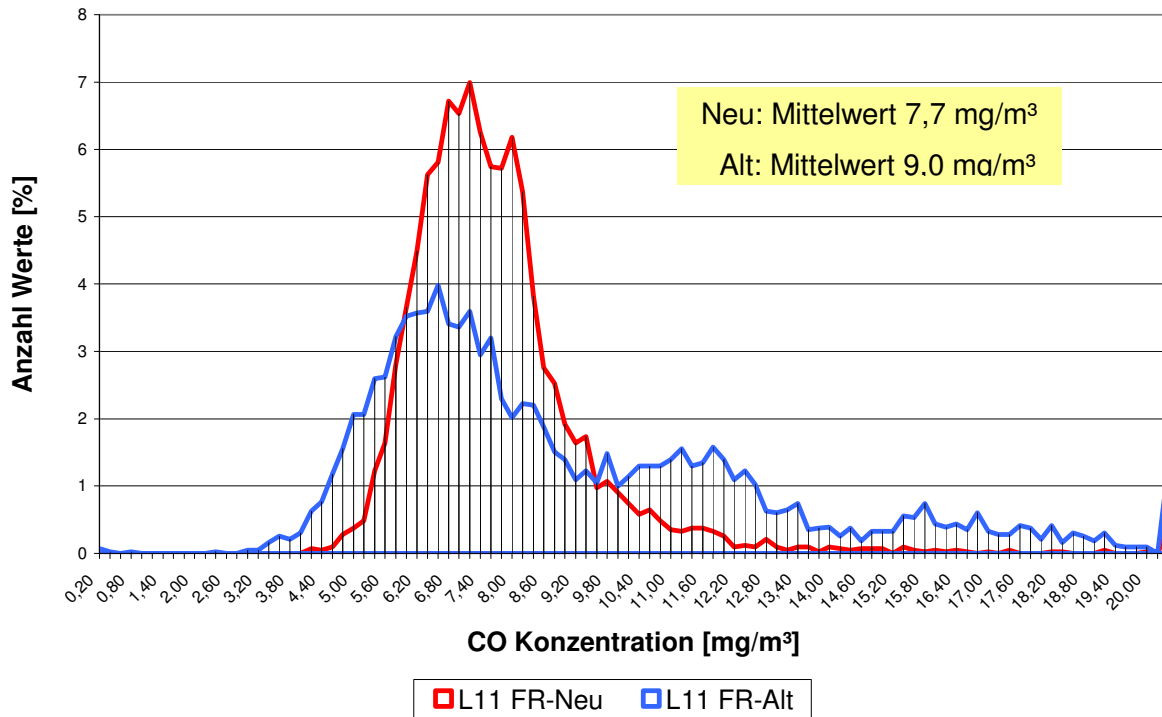


Abbildung 22: CO-Werte Kesselende

Bei dem Vergleich der beiden Zeiträume zeigt sich, dass die Verteilung der CO-Werte für die neue Feuerungsregelung deutlich besser gelagert ist. Der Mittelwert der CO-Konzentrationen ($7,7 \text{ mg/m}^3$) liegt nahe am Maximum der Verteilungskurve. Bei der alten Feuerungsregelung (Mittelwert CO $9,0 \text{ mg/m}^3$) ist aufgrund der breiteren Streuung der Werte dieses nicht zu erkennen.

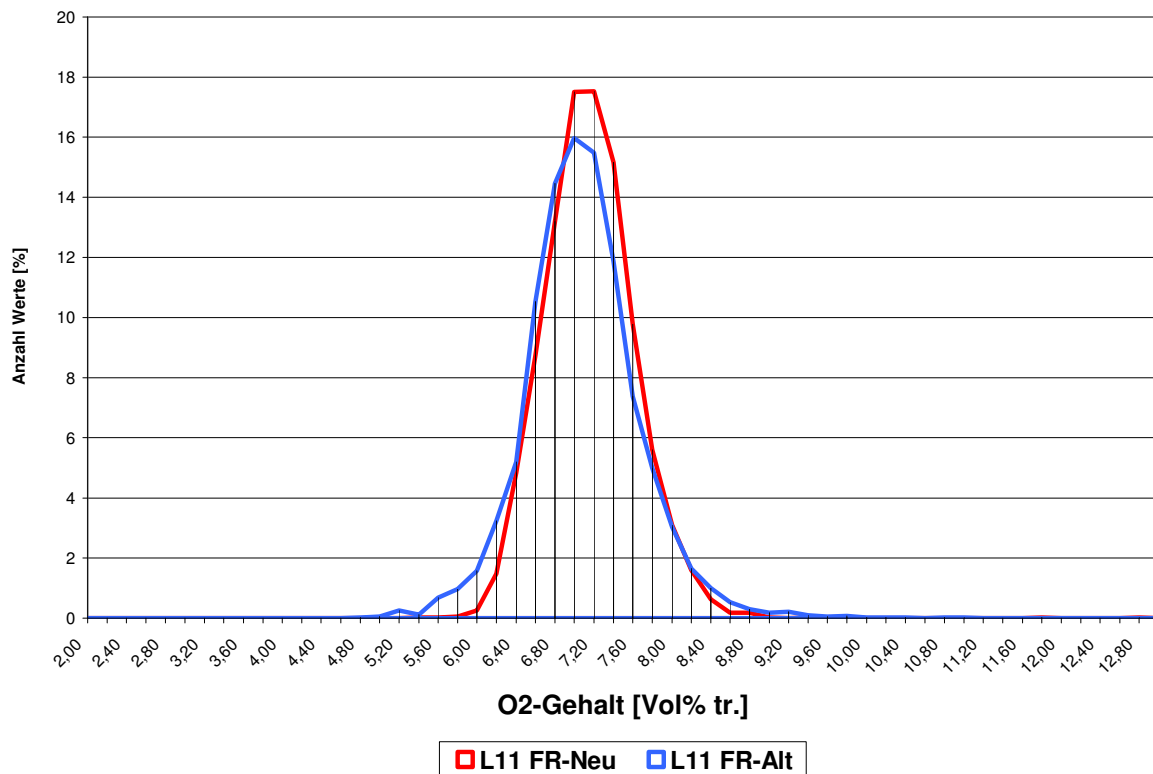


Abbildung 23: Sauerstoffgehalt Kesselende [Vol%, tr.]

Der Sauerstoffanteil im Abgas hat sich gegenüber der bisherigen Regelung unwesentlich verändert (Abb. 23). Die Zielvorgabe von 7,2 Vol % ist mit einem mittleren O₂-Gehalt von 7,06 Vol% gut eingehalten. Die Standardabweichung beträgt $\sigma = 0,63$ Vol%; somit liegen 95% aller O₂-Werte innerhalb einer Schwankungsbreite von $\pm 1,26$ Vol%.

6.2.3 Ausbrand- und Schlackequalität

Die Anlage wurde während des Probetriebes und im Mai diesen Jahres umfangreich beprobt. Die Glühverluste (ermittelt über das eigene Labor) liegen im üblichen Schwankungsbereich zwischen < 1 Gew. % bis zu 2,5 Gew. %. Die Ergebnisse des externen Labors stehen noch aus.

6.2.4 Konstruktionstemperaturen

		KONSTR SL BALK 1	MUE AUFG STRZ 1	KONSTR 1	KONSTR 2	KONSTR 3	KONSTR 4
		°C	°C	°C	°C	°C	°C
FR Neu	Maximal	454,94	337,56	396,63	252,19	290,63	308,69
	Minimal	149,69	61,06	106,44	34,25	67,69	145,88
	Mittelwert	261,85	157,15	194,56	91,37	160,80	246,21
	Standardabweichung	27,63	35,31	41,79	40,75	39,05	27,62
FR Alt	Maximal	354,80	347,90	338,00	301,81	423,13	339,20
	Minimal	129,90	40,56	74,25	27,38	51,38	131,00
	Mittelwert	226,35	123,61	169,62	104,33	157,63	228,77
	Standardabweichung	33,83	49,37	44,84	47,11	64,89	29,71

Abbildung 24: Auswertung Konstruktionstemperaturen

Als maximal zulässige Temperatur für die Konstruktionselemente sind aufgrund der eingesetzten Werkstoffe ca. 420 °C anzusetzen (Abb. 24). Der Schwellenwert, ab dem die Regelung zum Schutz der Konstruktion aktiv wird, liegt bei 380 °C.

Für das Plattenluftfeld 1 gilt die Besonderheit, dass sowohl SLB 1 und Sturz 1 auf diesem System aufgeschaltet sind und die Mengenverteilung nur über Steckschiebereinstellungen darzustellen ist.

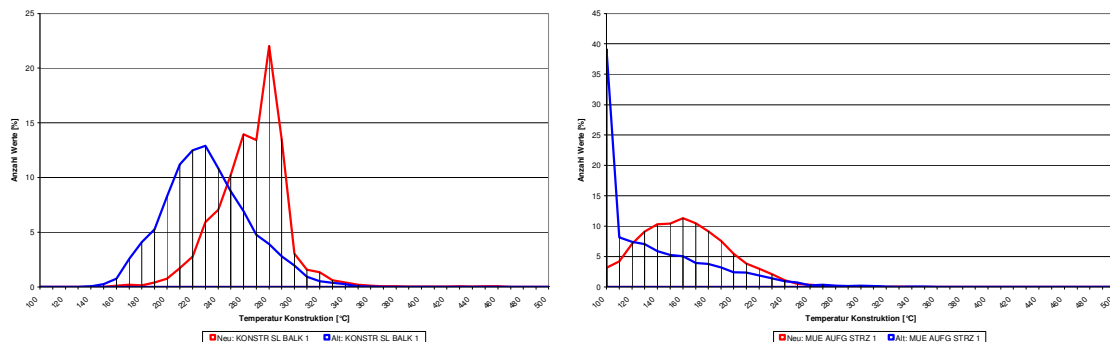


Abbildung 25: Konstruktionstemperaturen SLB 1 und Sturz 1

Die Verteilungskurven (Abb. 25) zeigen, dass die Konstruktionstemperaturen am Sekundärluftbalken 1 (SLB 1) auf einem ca. 40 °C höherem Niveau liegen.

An Sturz 1 hat sich ebenfalls eine leichte Erhöhung (ca. 25 °C) der mittleren Temperatur eingestellt.

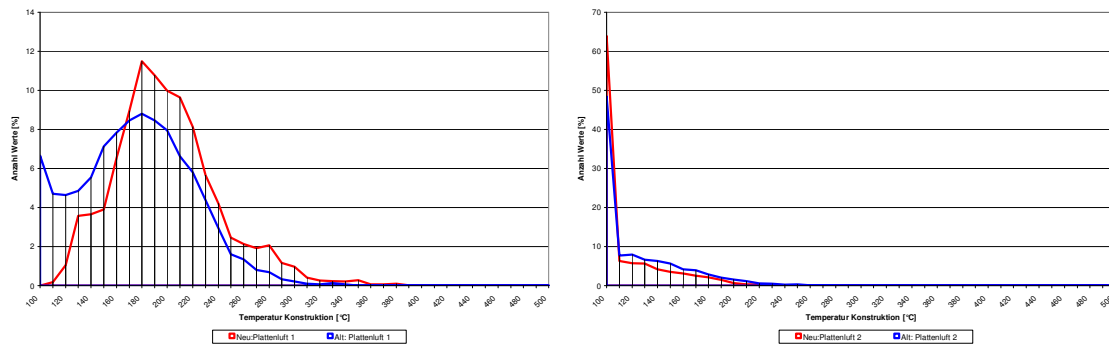


Abbildung 26: Plattenluftfeld 1 und 2

Das Temperaturprofil an Plattenluftfeld 1 und 2 ist nahezu unverändert (Abb. 26).

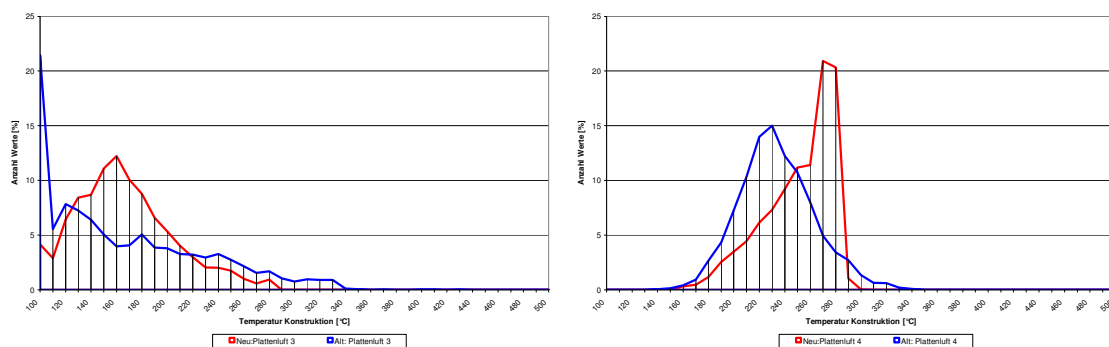


Abbildung 27: Plattenluftfeld 3 und 4

Plattenluftfeld 3 zeigt eine leichte Verschiebung des Mittelwertes und eine Halbierung der Standardabweichung.

An Plattenluftfeld 4 zeigt sich nahezu keine Veränderung.

An den Plattenluftfeld 2,3 und 4 stehen noch Luftmengenressourcen zur Verfügung um z.B. diese bei künftigen Umbaumaßnahmen in die Sekundärluft zu verschieben.

6.3 Handeingriffe Fahrpersonal

Ein weiteres Indiz für die Qualität eines Regelungssystems ist die Anzahl der Handeingriffe durch das Fahrpersonal. Wenn die Regelung optimal auf die Anlage abgestimmt ist und alles geradeaus läuft sollten keine Vertrimmungen erforderlich sein. Kommen jedoch „besondere“ Betriebsbedingungen – wie zum Beispiel „Blumenerde“ auf dem Rost oder Monochargen zu

Bericht Erstellt von: V. Müller, R. Warnecke
 Titel: Optimierung Feuerungs-Regelung

Stände, dann sind Vertrimmungen oder ggf. sogar Handbetrieb einzelner Systeme notwendig. Bereits bei der ursprünglichen Feuerungsregelung war die Häufigkeit dieser Maßnahmen selten notwendig.

Wenn es die Lagerkapazitäten im Müllbunker zulassen: Mischen, Mischen und nochmals Mischen. Die Aussage, dass der wichtigste Mann der Anlage in der Krankenzelle sitzt hat auch bei modernen Feuerungsregelungen Bestand.

Über einen Zeitraum von 57 Tagen stellen sich die durchgeführten Handeingriffe wie in der nachstehenden Abbildung dar.

Zeitraum 01.04.2007 bis 27.05.2007

Anzahl Handeingriffe	System								Ursache
	Transport				Verbrennungsluft				
	Aufgabe	Rost 1	Rost 2	Rost 3	Primärluft	Unterwind Zonen	Plattenluft Zonen	Sekundärluft	
6	Hand								Blockade Aufgabe (Brennstoffbedingt)
3		Handsollwert							Feuerlage
2		Vertrimmt							Feuerlage
5			Vertrimmt						Feuerlage
1								Vertrimmt (+)	CO-Konzentration
22					Vertrimmt (+)				Feuerlage
34						Vertrimmt (+)			Feuerlage
6						Profil (-)			Feuerlage
6						Profil (+)			Feuerlage
16						Handsollwert Z1			Feuerlage
4						Handsollwert Z2			Feuerlage

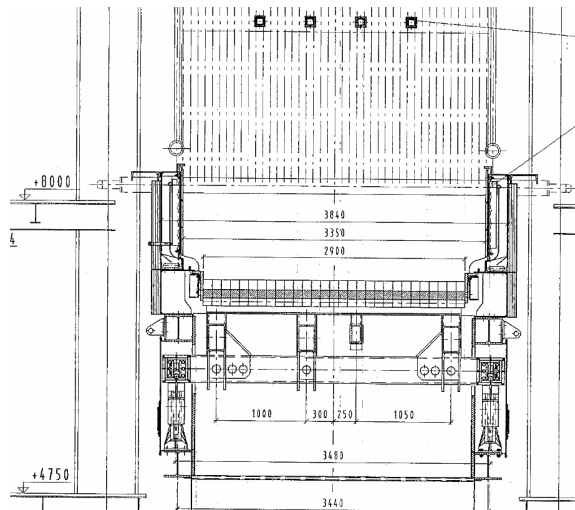
Summe: **105 Handeingriffe innerhalb 57 Tagen**
Durchschnitt: **1,84 Handeingriffe pro Tag**

Abbildung 28: Aufstellung der Handeingriffe über 57 Tage

Die als Durchschnittswerte angegebenen Handeingriffe sind nur als Richtwert zu sehen, da sich die Erfordernisse der Maßnahmen nicht gleichmäßig über die Zeitsachse verteilt, sondern frei nach „Murphys Law“ gebündelt auftreten. Es zeigt sich jedoch, dass das System in weiten Zeitbereichen das tut, was wir von ihm erwarten. Die Anlage wird derart ausgegeregelt, dass zum einen die Betriebsparameter und die erforderlichen Grenzwerte eingehalten werden. Das Fahrpersonal erreicht durch die geringe Anzahl von Handeingriffen zusätzliche Ressourcen, die für weitere Tätigkeiten genutzt werden können.

6.4 Weitere Ansätze für Optimierung

Die MVA-Linien bei GKS sind einbahnige Rostsysteme mit 2,9 m wirksame Rostbreite (Abb. 29).



Auf zusätzliche Messgrößen z.B. akustische Temperaturmessungen im ersten Kesselzug (AGAM) oder Auswertungen von Video- und IR-Kamera-Technologie kann daher verzichtet werden. Es ist bei Einbahnern unter Umständen zwar auch interessant zu wissen ob auf der linken oder rechten Rosthälfte mehr oder weniger starke Energiefreisetzung erfolgt, jedoch kann mit dieser Information kein Einfluss genommen werden, da die Freiheitsgrade bzw. Stellorgane nicht vorhanden sind.

Abbildung 29: Feuerungsquerschnitt

Interessanter ist es, zu einem späteren Zeitpunkt – nach entsprechender Anpassung der Feuerraumgeometrie, Luftführung (insbesondere Sekundärluft) - im Bereich des Kesseleintrittes zusätzliche Temperaturmessungen auf IR-Basis zu installieren, um z.B. die Lageregelung des Sekundärluftstromes innerhalb der effektiven Grenzen zu ermöglichen.

Die bestehenden IR-Messungen entlang des Rostverlaufes (Zone 1 bis 3) werden modifiziert, um ein Zusetzen der Messöffnungen mit Schlackeschmelzfluss zu vermeiden. Somit soll eine höhere Verfügbarkeit der Messungen erzielt werden, um sie gesichert einsetzen zu können.

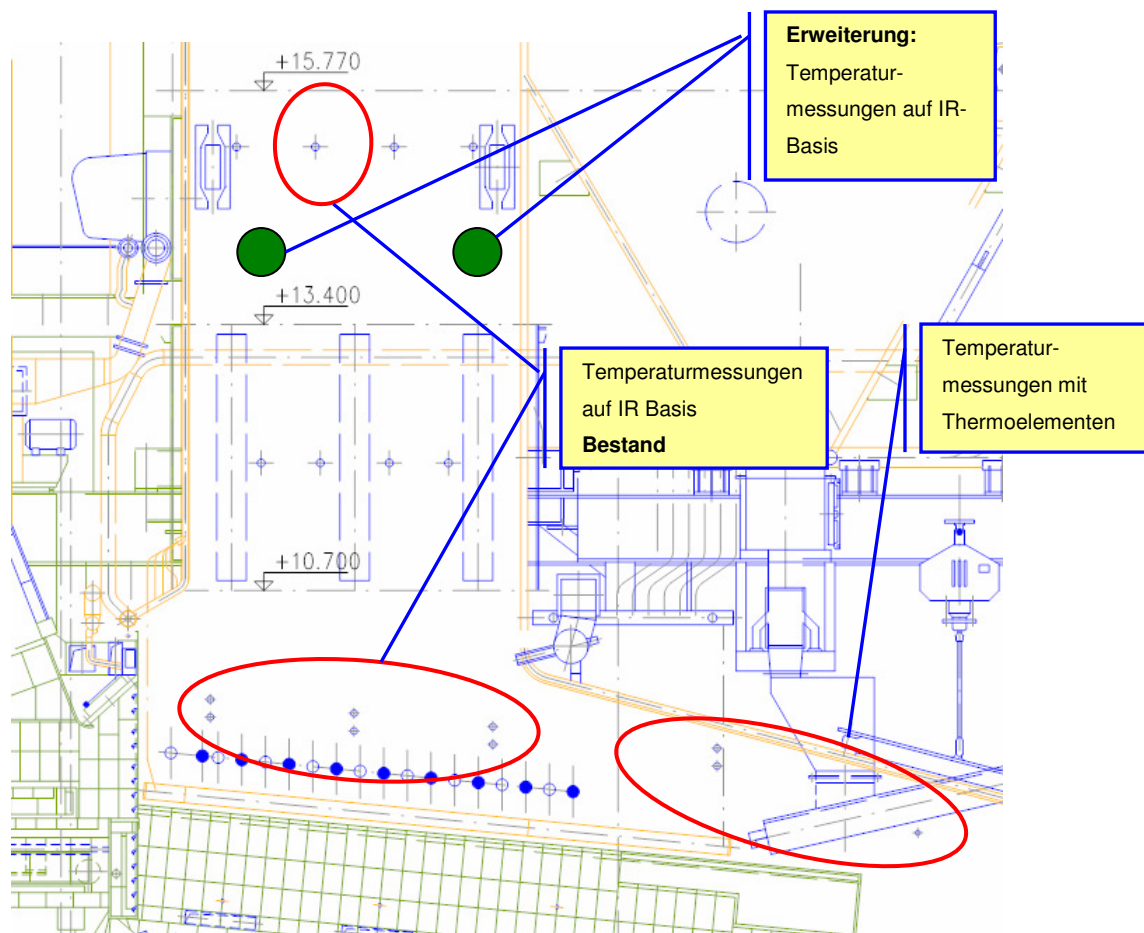


Abbildung 30: Temperaturmessungen Feuerung und Eintritt 1. Zug

Andere Messprinzipien bei der Sauerstoffmessung z.B. Zirkonoxid-Sonden erzeugen bei richtiger Anordnung im Kessel ein deutlich schnelleres O_2 -Signal als die bisher installierte Messung. Die Totzeit über die Kesselzüge liegt bei ca. 15 sec. Zuzüglich der Totzeit der Gasentnahmestrecke und Aufbereitung (20 sec.) sind über 30 Sekunden vergangen bis das Signal als Störgröße auf die Regelung aufgeschaltet werden kann. Die Frage ist, ob eine deutliche Verkürzung dieser Totzeit durch den Einsatz einer schnelleren O_2 -Messung deutliche Verbesserungen bei der Regelgüte bietet. Die Zirkonoxid-Sonden halten einer Dauertemperatur von ca. 600°C stand. Die Anordnung würde am Ende des 3. Kesselzuges sinnvoll erscheinen, da hier auf Grund des Konvektionsteils bereits eine Vergleichmäßigung des O_2 -Profils statt gefunden hat (Abb. 31).

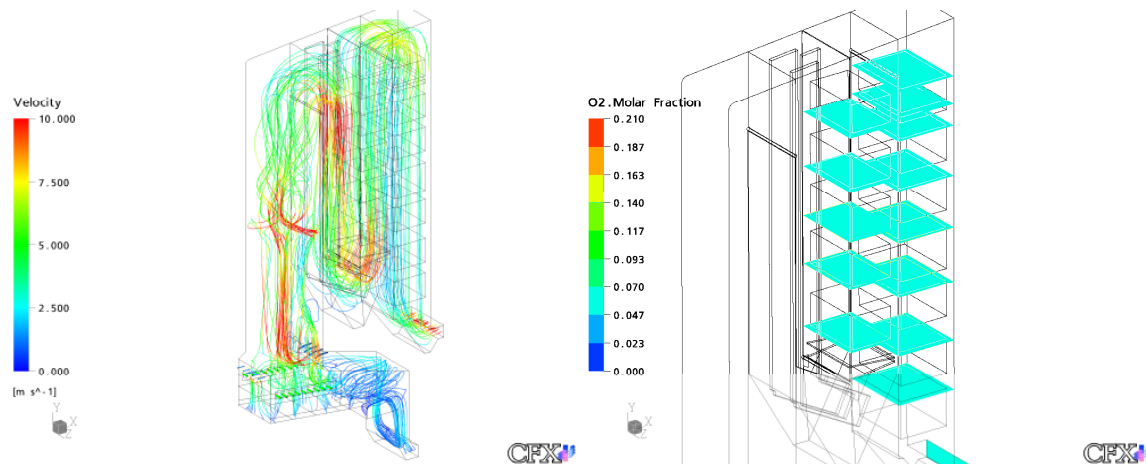


Abbildung 31: CFD-Simulation der Partikelströmung (mit SNCR) und der O₂-Verteilung im 3./4. Zug

Grundsätzlich bietet die Zirkonoxid-Sonde den Vorteil, dass bei Beibehaltung der bestehenden O₂ Messung und Korrektur der Totzeit durch Differenzbildung zwischen O₂-feucht und O₂-trocken der Feuchteanteil des Rauchgases ermittelt werden kann.

7 Zusammenfassung

Regelungssysteme für thermische Abfallbehandlungsanlagen sind auf die anlagentechnischen Belange und die weiteren Randbedingungen zu projektieren und umzusetzen. Maximierung des Informationsgehaltes durch zusätzliche Messtechnik ist nur da sinnvoll, wo damit ein regelungstechnisches Optimum erreicht wird. Funktionen die den Status „nice to have“ haben sind entbehrlich, da nicht mit jeder zusätzlichen Messgröße die Regelgüte deutlich verbessert werden kann. Vielmehr ist zu prüfen, in wie weit sich die Regelgüte überhaupt noch verbessern lässt - und mit welchem wirtschaftlichen Aufwand. Der Erfolg eines Feuerungsregelungssystems sollte nicht am „vorher-nachher“ verglichen werden, wenn das „vorher-System“ kein zufrieden stellendes Ergebnis geliefert hat. Es sollte eine Orientierung am technisch und wirtschaftlich vernünftig machbaren erfolgen. Ein Vergleich von „Dampfschrieben“ mit dem bloßen Auge ist nicht sinnvoll. Es sollte vielmehr eine statistisch aussagekräftige Kurve (z.B. „Glockenkurven“) zum Vergleich herangezogen werden. Diese sind mit gleichartigen Auswertungen von Anlagen bzw. Regelungen die eine hohe Regelgüte (dem „Machbaren“) darstellen zu vergleichen.

Die Forderung nach einer Regelgüte von $< 3 \%$ ist bei einem heterogenen Brennstoff wie Müll von Seiten des Betreibers keine sinnvolle Forderung und wird ihm keinen Spaß bringen. Und für den Anbieter schon gar nicht, da unseriös.

Ein Regelungssystem – egal welcher Art – ist nur so gut wie die Betreuung desselben. Feuerungsregelungen müssen in regelmäßigen Abständen auf ihre Regelgüte hin bewertet werden und ggf. an die zwischenzeitlichen geänderten Randbedingungen angepasst werden. Bei einem PID-Regler stellt sich nach unserer Einschätzung diese Anpassung deutlich einfacher dar als bei anderen Systemen.

Für welches von den vier angesprochenen Regelungssystem sich ein Betreiber entscheidet hat schon einen philosophischen Touch.

Grundvoraussetzung ist in jedem Falle, dass man einen Partner findet, der das jeweilige Konzept auch wirklich im Detail hervorragend umsetzen kann. Dazu muss das Konzept der Verknüpfung und Verarbeitung der Eingangssignale ausgereift und trotzdem ausbaufähig sein; hier genügt beispielsweise nicht allein die Kenntnis der Funktionsweise eines allgemeinen PID-Reglers. Schon zwischen den PID-Regelsystemen gibt es erhebliche Unterschiede. Außerdem sollte ein gerüttelt Maß an spezifischem verfahrenstechnischen Know-how vorhanden sein.

Für GKS war nach heutigem Stand die Entscheidung wieder einen konventionellen PID Regler einzusetzen richtig. Mit anderen Feuerungsregel-Systemen die bei GKS erreichte Regelgüte zu erzielen ist nicht unspannend. Nicht alles was „neu“, „unkonventionell“ oder „high-sophisticated“ ist, ist auch zwangsläufig besser.

In wieweit sich weitere Entwicklungen in den Bereichen Modellprädiktiver- oder Modellbasierender-Regler für MVA's einen Vorteil für den sicheren Betrieb ergeben bleibt abzuwarten. Vorstellbar ist es in der Tat, zusätzliche Informationen über diese Systeme zu erhalten und in die schon sehr guten „konventionellen“ PID-Regler zu integrieren. Ziel dabei ist weniger die Verbesserung der Regelgüte, als vielmehr das erweiterte Verständnis in die Feuerungsregelung zu integrieren und hieraus weiteres Know-how zu erhalten.