

---

# Vorkonfektionierung und Optimierung der Feuerungsregelung durch bidirektionale Kopplung an ein Feuerungsmodell

---

Von:

Martin Zwiellehner, SAR GmbH, Dingolfing

Dr. Ragnar Warnecke, GKS GmbH, Schweinfurt

Volker Müller, GKS GmbH, Schweinfurt

Martin Weghaus, Weghaus GmbH, Würzburg

Anlässlich 10.VDI-Fachkonferenz

Feuerung und Kessel – Beläge und Korrosion – in Großfeuerungsanlagen

Kassel, 7. - 8. Juni 2011

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Motivation.....	4
3	Regelungstechnik und Stellglieder .....	9
4	Feuerungsmodell „Combate“ .....	11
5	Kopplung des Modells mit der Feuerungsregelung .....	13
5.1	Regelungstechnik und Kopplungsparameter .....	14
5.2	Bereich Rost – Transport + Beschickung .....	15
5.3	Bereich Verbrennungsluft.....	20
5.4	Input - Brennstoffzusammensetzung .....	20
6	Einsatzmöglichkeiten .....	22
6.1	Offline-Betrieb .....	22
6.2	Online-Betrieb mit Kopplung an Feuerungsregelung -Simulationsbetrieb.....	23
7	Betrieb der „Feuerungssimulation“ .....	23
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	31
9	Literaturverzeichnis.....	33
10	Abbildungsverzeichnis.....	34

# 1 Einleitung

Die Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen waren in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts nicht tolerabel. Nach In-Kraft-Treten der 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz werden diese Emissionen so stark reduziert, dass Entscheidungsträger, die vor dieser Zeit nachweislich Gegner dieses Verfahrens waren, zur begründeten Überzeugung kamen, dass nur die Abfallverbrennung für die Behandlung von Restabfällen verantwortlich ist.

Jahresmittelwerte für die Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen betragen nur einen kleinen Bruchteil der in der Verordnung festgelegten Halbstunden- und Tagesmittelgrenzwerte. Dies rührt daher, dass in der Vergangenheit neue Entwicklungen bei Abgasreinigungsanlagen - so genannte Sekundärmaßnahmen - im Vordergrund standen. Gegenwärtig liegt aber ein Entwicklungsschwerpunkt verstärkt bei der Entwicklung und Optimierung der Prozessführung in der Feuerung - den so genannten Primärmaßnahmen, mit dem Ziel:

- Schadstoffe und Emissionen nicht nur durch Sekundärmaßnahmen, sondern bereits im Vorfeld durch Primärmaßnahmen zu minimieren,
- die Abgasmassenströme und damit die Schadstofffrachten und damit die Rauchgasreinigungsanlagen zu verkleinern,
- die Energienutzung und somit die Effizienz zu verbessern,
- die Reststoffeigenschaften positiv zu beeinflussen.

Zu den verfahrenstechnischen Primärmaßnahmen zählen:

- Feuerraumgeometrie bezüglich Rauchgasführung und Durchmischung
- Verbrennungsroste für gleichmäßiges Müllbett mit beeinflussbarer Transport- und Schürwirkung sowie detailliert regelbarer Beschickung
- Primärluft-, Unterwindmenge sowie deren Verteilung und Temperatur
- Lagen, Mengen, Verteilungen der sonstigen Verbrennungsluft wie Sekundärluft, Tertiär- oder Seitenwandluft
- Feuerungsabhängige Regelbarkeit aller vorhandenen Stellgrößen durch Feuerungsleistungsregelung und grundsätzlicher Automatisierung der Feuerung

Die hohen technischen Forderungen an die thermische Abfallbehandlung sowie die strengen Auflagen bezüglich Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen sowie die heute praktizierbare Datenerfassung und Auswertung mittels moderner Informationstechnologie ermöglichen bzw. bedingen die Automatisierung der thermischen Abfallbehandlung [7]. Ein wesentlicher und zentraler Bestandteil in der Automatisierung einer Müllfeuerung ist somit die Feuerungsleistungsregelung (FLR), die u.a. in der Lage sein muss:

- Eine gleichmäßige und kontrollierte Wärmeentbindung - unter Einhaltung aller gesetzlichen Emissionswerte - sicherzustellen, denn diese Art der Wärmeentbindung ist Voraussetzung für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung.
- Die Feuerleistung konstant an der oberen Grenze bzw. am gewünschten Wert zu halten, denn der Mülldurchsatz - als aktivster Posten zur Kostendeckung - sowie die elektrische und thermische Ausbeute - mit einem Wort die Effizienz der Anlage - sind bei einem konstanten Betrieb am höchsten.

Ganz wesentlich ist die Tatsache, dass die FLR die einzige Primärmaßnahme ist, die nach baulicher Fertigstellung der Anlagentechnik übrig bleibt, um dynamisch entscheidenden Einfluss auf die Feuerführung nehmen zu können.

## 2 Motivation

Die grundsätzliche Problematik beim Parametrieren und Optimieren von Feuerungen, insbes. bei Feuerungen mit inhomogenen und unbekanntem Brennstoffen wie Restabfall ist, dass die einzustellenden Absolutwerte für die Stellglieder vor der Inbetriebnahme der Anlage oder nach einem Umbau nicht bekannt sind. Maximal liegen Erfahrungswerte aus vergleichbaren, baugleichen Anlagen vor bzw. können Richtwerte z.B. von Verbrennungsluftmengen grob berechnet werden.

Die genaue Anzahl ist abhängig von der Komplexität der Anlage, der Komplexität und dem Komfort der Feuerungsregelung, in welchen Leistungsbereichen sich die Feuerung bewegen soll, der „Schwierigkeit“ des Brennstoffs, speziellen Sonderzuständen (Klärschlamm etc.) u.v.m. Zusammengefasst kann aber postuliert werden, dass die Anzahl der einzustellenden Parametern deutlich über 100 liegt. In nachstehenden Abbildungen 1 und 2 sind auszugsweise (Basis-)Parametertabellen einer handelsüblichen Feuerungsregelung für eine konventionelle Hausmüllverbrennungsanlage dargestellt.

Das heißt konkret, nach Erstellung der Software für die Prozessleittechnik und vor der Inbetriebnahme einer Anlage sind diese Tabellen leer und müssen im Rahmen der Inbetriebnahme- und Optimierungstätigkeiten vor-Ort „mit Leben gefüllt“ werden. Da in obiger Tabelle eine Anlage abgebildet ist, die mit „gutem Heizwert“ (linke Tabelle) und „schlechtem Heizwert“ (rechte Tabelle) zurechtkommen muss und dies jeweils in einem Leistungsbereich von 53,0 % bis 100,0 % sind also für die vorhandenen Stellglieder schon mindestens 12 Fälle mit unterschiedlichem Brennstoff und unterschiedlichen Leistungen einzustellen und abzufahren. Leider ergibt sich oft kein linearer Zusammenhang zwischen den einzelnen Spalten (= Leistungsfälle), so dass jeder Lastfall für sich parametrieren und optimiert werden muss. Für jeden der 12 Fälle müssen also in obigem Beispiel nur für den Bereich des Brennstofftransportes (Rost und Beschickung) folgende Parameter eingestellt werden:

- Brennstoffbeschickung: minimale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Brennstoffbeschickung: Basiswert Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Brennstoffbeschickung: maximale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 1: minimale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 1: Basiswert Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 1: maximale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 2: minimale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 2: Basiswert Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 2: maximale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 3: minimale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 3: Basiswert Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]
- Rost Zone 3: maximale Hubgeschwindigkeit in [ $\text{DH}/\text{h}$ ]

Somit ergeben sich 144 Werte nur für Rost und Beschickung (Abbildung 1). Für den Bereich der Verbrennungsluft (Abbildung 2) sind es noch einmal 120.

Nach der Basisparametrierung, die ja im Wesentlichen „nur“ das Feuerleistungsdiagramm (Lastpunkte, Heizwertspektrum) einer Anlage widerspiegelt, müssen noch die der Feuerungsregelung zugrundeliegenden Regler parametrieren werden. Aus den Abbildungen 3 und 4 geht hervor, dass es für die Verbrennungsluft 3 (+8; nicht abgebildet) Regler und für den Bereich Transport 4 Regler für die jeweiligen Hauptregelgrößen (Dampfmassenstrom,  $\text{O}_2$ -Gehalt nach Feuerung, div. Feuerraumtemperaturen) gibt. Die jeweiligen Hauptregelgrößen sind natürlich für Verbrennungsluft und Brennstofftransport identisch, aus verfahrens- und regelungstechnischer ist es jedoch unabdingbar unterschiedliche Regelkreise (mit unterschiedlichen Regelparametern) aufzubauen. Hintergrund ist, dass die Prozessreaktionen im Bereich Verbrennungsluft wesentlich schneller auf Regeleinriffe reagieren als dies im Bereich des Brennstofftransports der Fall ist. Während sich eine deutliche Änderung der Verbrennungsluftzufuhr in der Hauptverbrennungszone im Idealfall bereits nach Sekunden bis wenigen Minuten bemerkbar macht, ist die Totzeit bei Änderungen in der Beschickgeschwindigkeit im Zeitbereich von 15 - 30 Minuten angesiedelt.

Zusammengefasst müssen für die Parametrierung einer Feuerungsregelung die dem heutigen Stand der Technik entspricht, deutlich über 200 Basiswerte eingestellt werden. Zusätzlich müssen noch 15 Regler eines komplexen Mehrgrößensystems sowie diverse Gewichtungsfaktoren, Sondereinflüsse, Rampen, gleitende Mittelwerte parametrieren, optimiert und aufeinander abgestimmt werden.

Systembedingt kann die den einzustellenden Parametern hinterlegte Software zwar simuliert und systematisch getestet werden, die Einstellung der einzelnen Faktoren muss aber bis dato zwangsläufig vor-Ort bei laufender Anlage erfolgen.

L2 Air base table													Active setpoint combustion air																																
Base table													67.00	t/h																															
													100.00	%																															
													67.00	t/h																															
													100.00	%																															
-50%-point = heating value "bad"   L2 FLR ALLG WE 0%   50%-point = heating value "good"																																													
Load point	%	53.0	66.0	75.0	85.0	95.0	100.0	100.0	%	Load point	%	53.0	66.0	75.0	85.0	95.0	100.0	100.0	%																										
Base value [t/h]	t/h	35.5	44.2	50.3	57.0	63.6	67.0	67.0	t/h	Base value [t/h]	t/h	35.5	44.2	50.3	57.0	63.6	67.0	67.0	t/h																										
Common air flow	kNm³/h	48.0	59.8	67.9	76.9	83.0	87.5	87.5	kNm³/h	86.4	kNm³/h	Common air flow	kNm³/h	45.1	56.2	63.9	72.5	81.0	85.3	85.3	kNm³/h																								
Primary air min	%GL	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	%GL	40.0	%GL	Primary air min	%GL	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	%GL																								
Primary air max	%GL	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	%GL	65.0	%GL	Primary air max	%GL	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	%GL																								
<table border="1"> <tr><td>55.0</td><td>%GL</td><td>48.1</td><td>kNm³/h</td></tr> <tr><td>± 10.0</td><td>%GL</td><td>± 8.8</td><td>kNm³/h</td></tr> </table>										55.0	%GL	48.1	kNm³/h	± 10.0	%GL	± 8.8	kNm³/h	<table border="1"> <tr><td>52.5</td><td>%GL</td><td>45.4</td><td>kNm³/h</td></tr> <tr><td>± 12.5</td><td>%GL</td><td>± 10.8</td><td>kNm³/h</td></tr> </table>		52.5	%GL	45.4	kNm³/h	± 12.5	%GL	± 10.8	kNm³/h	<table border="1"> <tr><td>50.0</td><td>%GL</td><td>42.6</td><td>kNm³/h</td></tr> <tr><td>± 15.0</td><td>%GL</td><td>± 12.8</td><td>kNm³/h</td></tr> </table>										50.0	%GL	42.6	kNm³/h	± 15.0	%GL	± 12.8	kNm³/h
55.0	%GL	48.1	kNm³/h																																										
± 10.0	%GL	± 8.8	kNm³/h																																										
52.5	%GL	45.4	kNm³/h																																										
± 12.5	%GL	± 10.8	kNm³/h																																										
50.0	%GL	42.6	kNm³/h																																										
± 15.0	%GL	± 12.8	kNm³/h																																										
Primary air flow zone 1	%PL	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	%PL	11.0	%PL	Primary air flow zone 1	%PL	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	%PL																									
Primary air flow zone 2	%PL	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	%PL	30.5	%PL	Primary air flow zone 2	%PL	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	%PL																									
Primary air flow zone 3	%PL	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	%PL	34.5	%PL	Primary air flow zone 3	%PL	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	%PL																									
Primary air flow zone 4	%PL	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	%PL	18.0	%PL	Primary air flow zone 4	%PL	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	%PL																									
Primary air flow zone 5	%PL	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	%PL	6.0	%PL	Primary air flow zone 5	%PL	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	%PL																									
Primary air flow sum	%PL	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	%PL			Primary air flow sum	%PL	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	%PL																									
Secondary air flow min	%GL	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	%GL	35.0	%GL	Secondary air flow min	%GL	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	%GL																									
Secondary air flow max	%GL	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	%GL	60.0	%GL	Secondary air flow max	%GL	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	%GL																									
Secondary air front wall	%	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	%	55.0	%	Secondary air front wall	%	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	%																									
Secondary air back wall	%	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	%	45.0	%	Secondary air back wall	%	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	%																									
<table border="1"> <tr><td>45.0</td><td>%GL</td><td>39.4</td><td>kNm³/h</td></tr> <tr><td>± 10.0</td><td>%GL</td><td>± 8.8</td><td>kNm³/h</td></tr> </table>										45.0	%GL	39.4	kNm³/h	± 10.0	%GL	± 8.8	kNm³/h	<table border="1"> <tr><td>47.5</td><td>%GL</td><td>41.0</td><td>kNm³/h</td></tr> <tr><td>± 12.5</td><td>%GL</td><td>± 10.8</td><td>kNm³/h</td></tr> </table>		47.5	%GL	41.0	kNm³/h	± 12.5	%GL	± 10.8	kNm³/h	<table border="1"> <tr><td>50.0</td><td>%GL</td><td>42.6</td><td>kNm³/h</td></tr> <tr><td>± 15.0</td><td>%GL</td><td>± 12.8</td><td>kNm³/h</td></tr> </table>										50.0	%GL	42.6	kNm³/h	± 15.0	%GL	± 12.8	kNm³/h
45.0	%GL	39.4	kNm³/h																																										
± 10.0	%GL	± 8.8	kNm³/h																																										
47.5	%GL	41.0	kNm³/h																																										
± 12.5	%GL	± 10.8	kNm³/h																																										
50.0	%GL	42.6	kNm³/h																																										
± 15.0	%GL	± 12.8	kNm³/h																																										
Recirculation gas mass flow	kNm³/h	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	8.0	8.0	kNm³/h	12.0	kNm³/h	Recirculation gas mass flow	kNm³/h	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.0	16.0	kNm³/h																								
Recirculation gas front wall	%	45.0	45.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	%	50.0	%	Recirculation gas front wall	%	45.0	45.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	%																								
Recirculation gas back wall	%	55.0	55.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	%	50.0	%	Recirculation gas back wall	%	55.0	55.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	%																								

Abbildung 1: FLR-Basistabelle Verbrennungsluft

T2 Ram and grate - base table											Active setpoint transport									
Base table											67.00	t/h								
											100.00	%								
											67.00	t/h								
											100.00	%								
<div style="text-align: center;"> </div>																				
-50%-point = heating value "bad"											50%-point = heating value "good"									
Load point	%	53.0	66.0	75.0	85.0	95.0	100.0	100.0	%		Load point	%	53.0	66.0	75.0	85.0	95.0	100.0	100.0	%
Base value [t/h]	t/h	35.5	44.2	50.3	57.0	63.6	67.0	67.0	t/h		Base value [t/h]	t/h	35.5	44.2	50.3	57.0	63.6	67.0	67.0	t/h
Ram feeder																				
Velocity ram feeder max	dH/h	11.0	13.5	15.0	17.0	19.0	20.0	20.0	dH/h		Velocity ram feeder max	dH/h	12.0	12.0	13.0	14.0	15.5	16.0	16.0	dH/h
Velocity ram feeder bas	dH/h	10.0	10.0	11.0	13.0	15.0	16.0	16.0	dH/h		Velocity ram feeder bas	dH/h	7.0	7.0	8.0	9.0	10.5	12.0	12.0	dH/h
Velocity ram feeder min	dH/h	9.0	9.0	9.0	11.0	12.0	12.0	12.0	dH/h		Velocity ram feeder min	dH/h	5.0	6.0	7.0	7.0	8.0	8.0	8.0	dH/h
Grate 1																				
Velocity grate 1 max	dH/h	77.0	79.0	82.0	85.0	89.0	93.0	93.0	dH/h		Velocity grate 1 max	dH/h	69.0	71.0	74.0	77.0	81.0	85.0	85.0	dH/h
Velocity grate 1 base	dH/h	70.0	70.0	72.0	72.0	75.0	80.0	80.0	dH/h		Velocity grate 1 base	dH/h	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	75.0	dH/h
Velocity grate 1 min	dH/h	16.0	17.0	19.0	21.0	23.0	25.0	25.0	dH/h		Velocity grate 1 min	dH/h	12.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	20.0	dH/h
Grate 2																				
Velocity grate 2 max	dH/h	115.0	118.0	120.0	122.0	126.0	130.0	130.0	dH/h		Velocity grate 2 max	dH/h	75.0	76.0	79.0	82.0	86.0	90.0	90.0	dH/h
Velocity grate 2 base	dH/h	62.0	64.0	66.0	69.0	72.0	75.0	75.0	dH/h		Velocity grate 2 base	dH/h	45.0	45.0	50.0	50.0	55.0	60.0	60.0	dH/h
Velocity grate 2 min	dH/h	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	30.0	dH/h		Velocity grate 2 min	dH/h	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	15.0	dH/h
Grate 3																				
Velocity grate 3 max	dH/h	45.0	47.0	49.0	51.0	53.0	55.0	55.0	dH/h		Velocity grate 3 max	dH/h	36.0	37.0	39.0	41.0	43.0	45.0	45.0	dH/h
Velocity grate 3 bas	dH/h	32.0	34.0	36.0	38.0	40.0	42.0	42.0	dH/h		Velocity grate 3 bas	dH/h	26.0	27.0	29.0	31.0	33.0	35.0	35.0	dH/h
Velocity grate 3 min	dH/h	20.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	26.0	dH/h		Velocity grate 3 min	dH/h	12.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	20.0	dH/h

Abbildung 2: FLR-Basistabelle Transport

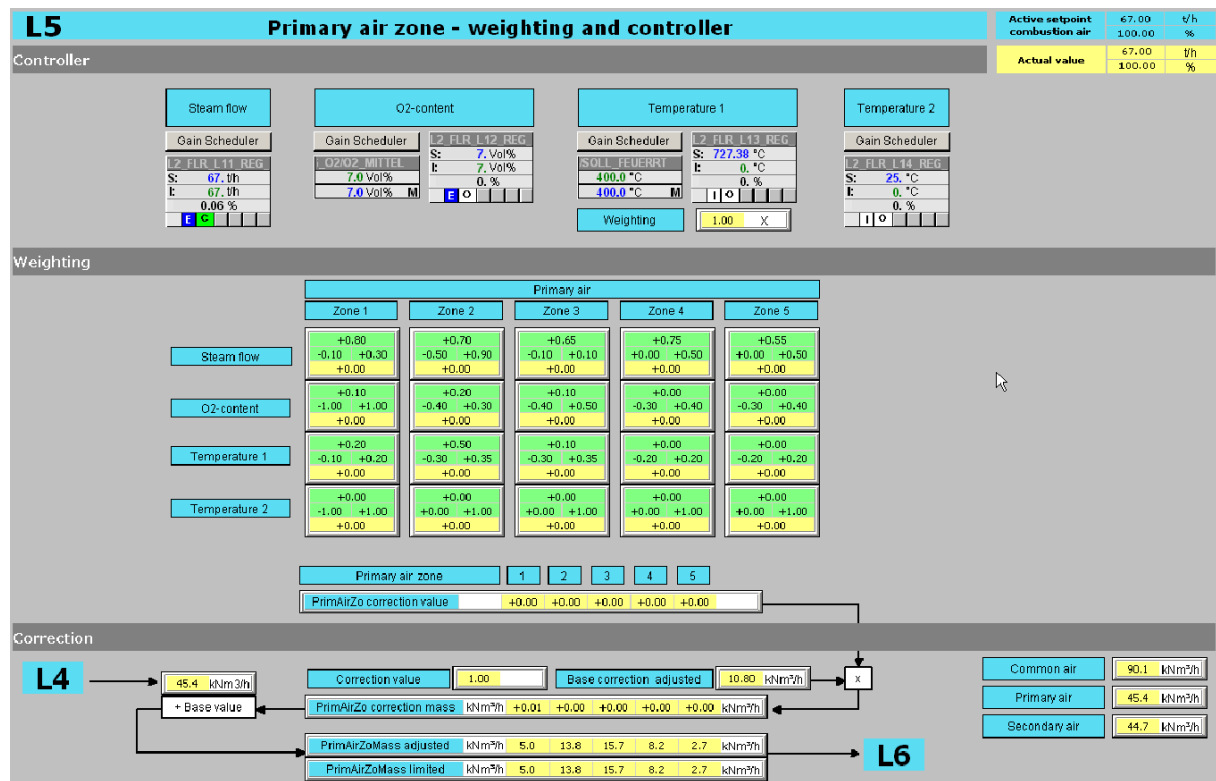


Abbildung 3: FLR-Regler und -Gewichtungstabelle Verbrennungsluft

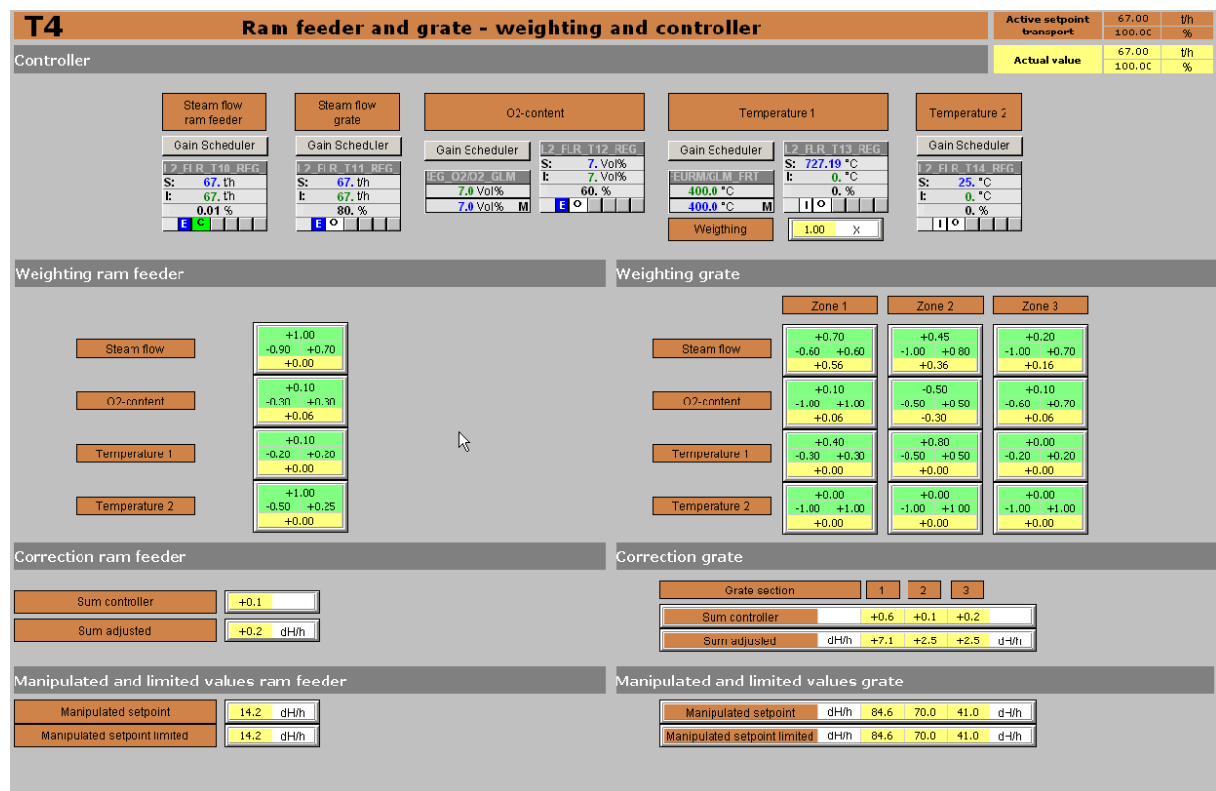


Abbildung 4: FLR-Regler und -Gewichtungstabelle Transport



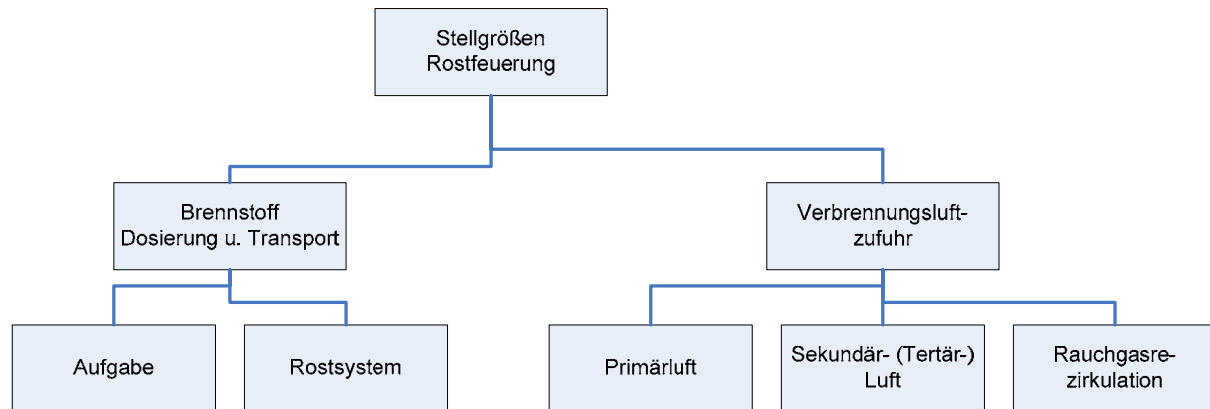
Jeder Betreiber und jeder Anlagenbauer ist natürlich bemüht, diese Inbetriebnahme- und Optimierungszeiträume so effizient wie möglich, d.h. so kurz wie möglich zu gestalten. Nichtsdestotrotz ist bei einem Neubau einer Anlage eine Optimierungsdauer in der Größenordnung von mind. 4 - 6 Wochen (24 h, 7 Tage die Woche) anzusetzen. Und: Eine Optimierung der Feuerung kann erst dann stattfinden, wenn alle anderen Anlagenkomponenten (Dampferzeuger, Turbine, Fördersysteme, Rauchgasreinigung, Prozessleittechnik etc.) bereits vollumfänglich funktionieren und ein mehr oder weniger stabiler Betriebszustand vorherrscht.

Die dem vorliegenden Bericht zugrundeliegende Idee soll sein, dass die Parameter einer Feuerungsregelung durch Modellierung der Anlage, bereits in-house und vor baulicher Fertigstellung einer Anlage vorbelegt werden können. Diese Werte können nicht nur vorbelegt werden, sondern insbesondere die Reglerparameter sollen auch voreingestellt und vor allem bereits grob optimiert werden. Ziel soll sein, mit einem bereits grundsätzlich funktionierenden Parametersatz für die Feuerung und die Feuerungsregelung in die Inbetriebnahme zu starten. Es soll die Zeit des „Ausprobierens“ so kurz wie möglich gehalten werden und das Risiko von falschen Einstellungen so gering wie möglich.

In weiterer Folge sollen dadurch natürlich die Inbetriebnahme- und Optimierungszeiten verkürzt werden. Auch in Bezug auf die Qualität der eingestellten Werte soll sich das Vorhaben positiv auswirken, weil in gewisser Weise mit sensiblen Parametern (Proportional-, Integral- und Differential-Anteilen von Regler) „experimentiert“ werden kann - was bei laufender Anlage nicht oder nur in sehr engen Grenzen möglich ist. Jede falsch gewählte Reglereinstellung kann u.U. zu äußerst ungünstigen Betriebssituationen wie z.B. Überschüttung des Rostes, Emissionswertüberschreitungen, Einsatz von Stützbrennstoffen u. dgl. mehr führen. Aus diesem Grund muss bei der Regleroptimierung Schritt für Schritt u.v.a. sehr konservativ vorgegangen werden - was den hohen Zeitaufwand erklärt. Ob ein neuer bzw. geänderter Parameter eines Reglers der auf Rost oder Beschickung wirkt, tatsächlich den gewünschten Effekt erwirkt, zeigt sich oft erst nach Tagen.

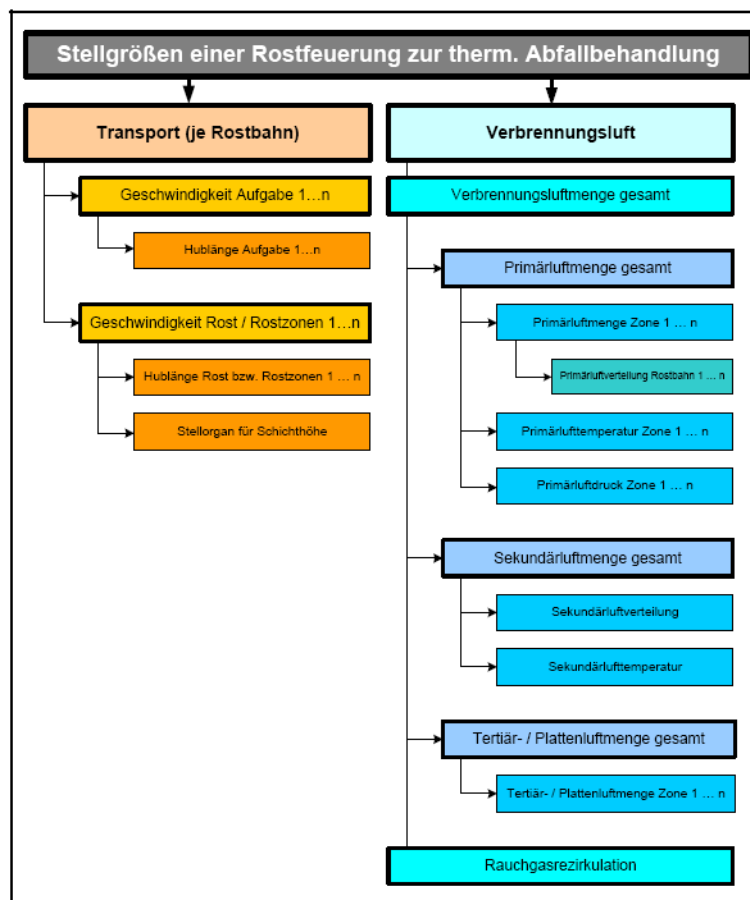
### **3 Regelungstechnik und Stellglieder**

Im Wesentlichen beschränken sich die Stellglieder an einer typischen Rostfeuerungs – wie sie in beinahe allen thermischen Abfallbehandlungsanlagen vorhanden ist – auf den Bereich der Verbrennungsluft und den Bereich des Brennstofftransports. An einer „durchschnittlichen“ MVA können die vorhandenen Stellglieder wie in Abbildung 5 dargestellt, unterteilt werden.



**Abbildung 5: Übersicht Stellgrößen Rostfeuerung [4]**

Diese Stellgrößen werden aber durch weitere Untergliederung noch erweitert, z.B. durch mehrere voneinander unabhängig bewegbare Rostzonen oder durch verschiedene Primärluftzonen - für beide gilt, dass die Anordnung sowohl in der Länge, als auch durch mehrbahnige Anordnung in der Breite erfolgen kann. Die Abbildung 6 zeigt alle möglichen Stellgrößen einer Rostfeuerung, wobei „Geschwindigkeit Rost“ ist für den Walzenrost zu ersetzen durch „Drehzahl Rostwalze“; „Hublänge Rost“ entfällt für Walzenrost; „Hublänge Beschickung“ entfällt z.B. bei einem Aufgabewanderrost. Welche und wie viele Stellgrößen im Detail zur Verfügung stehen, ist jedoch anlagenspezifisch.



**Abbildung 6: Mögliche Stellgrößen Rostfeuerung**

## 4 Feuerungsmodell „Combate“

Das Feuerungsmodell „Combate“ ist hinreichend bekannt z.B. aus [2] und [6]. Des Weiteren kann es eingesehen, bedient und beobachtet werden unter <http://www.gks-sw.de/1-gks/combate/starter.html>

Somit wird an dieser Stelle auf eine allzu detaillierte Beschreibung des Modellaufbaus verzichtet. Hervorgehoben werden sollen die für die Kopplung an die Feuerungsregelung relevanten Parameter. Eine kurze Einführung in die Modelltheorie besagt, dass ein Modell Teilstücke der Realität beschreibt, 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.

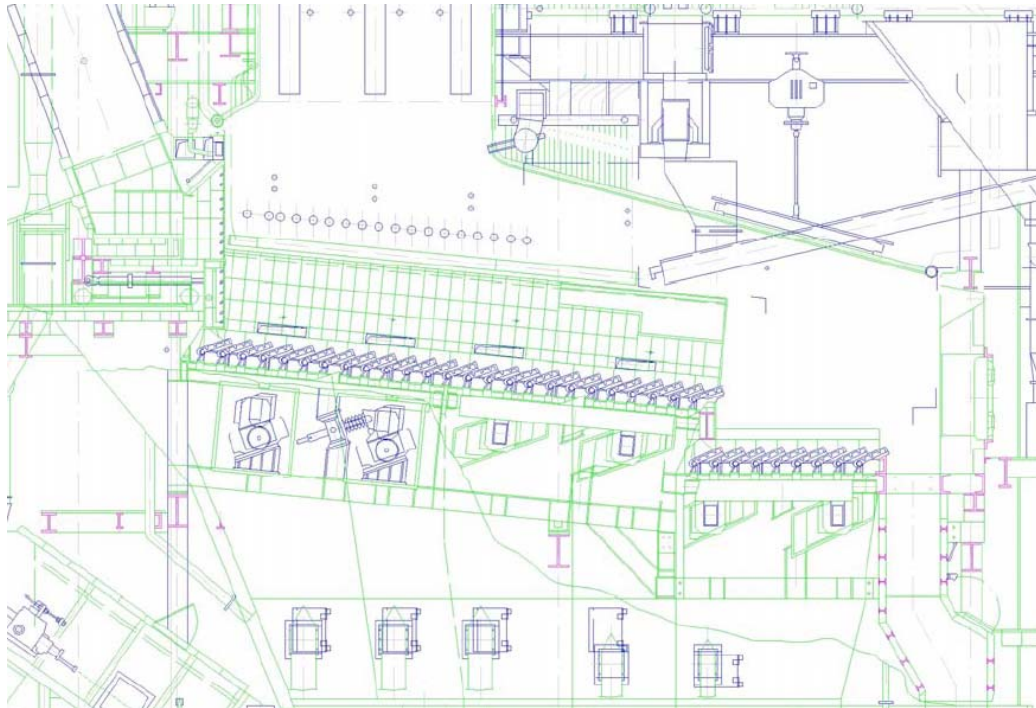


Abbildung 7: Querschnitt Feuerung GKS Schweinfurt [4]

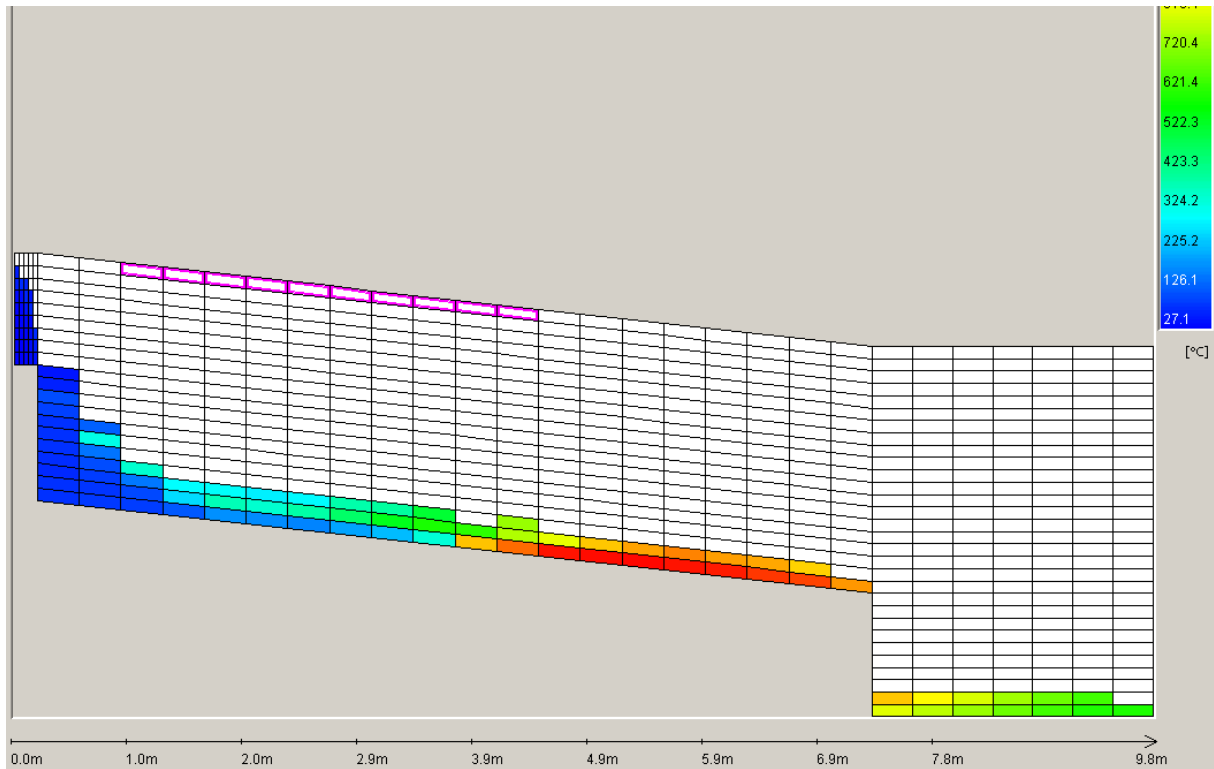


Abbildung 8: Umgesetzte Diskretisierung der Modellvorstellung in die Berechnungszellen des Modells

## 5 Kopplung des Modells mit der Feuerungsregelung

Eine Anforderung bei der Entwicklung und Untersuchung des Vorhabens „Modell-FLR“ ist, dass es möglich sein soll, Modell und Feuerleistungsregelung möglichst auf ein und demselben PC ablaufen zu lassen - als reine Software-Lösung ohne zusätzliche Hardware. Somit entsteht ein „Feuerungssimulator“ der dem Bediener die Illusion einer „echten Anlage“ mit allen reellen Eingriffsmöglichkeiten zur Verfügung stellt. Prozessleitsysteme in Kraftwerken arbeiten in der Regel nicht mit PC-basierten Automatisierungslösungen sondern mit speicherprogrammierbaren Steuerungen, so genannten Automatisierungsstationen (AS). In der Automatisierungsstation ist die Logik der gesamten Anlage und somit auch der Feuerungsregelung hinterlegt und wird dort zyklisch abgearbeitet. Da diese AS eine zusätzliche Hardwarekomponente bedeuten würde, wurde der Weg beschritten die Programmlogik in einer so genannten Soft-SPS ablaufen zu lassen. Diese Soft-SPS ist – wieder Name schon sagt – Software und emuliert den Zentralprozessor (CPU) und den Kommunikationsprozessor (CP) einer Automatisierungsstation. Die Kopplung zwischen dem Feuerungsmodell „Combate“ und dem Prozessleitsystem bzw. der zugehörigen Visualisierungsoberfläche als Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgt über den Industriestandard OPC.

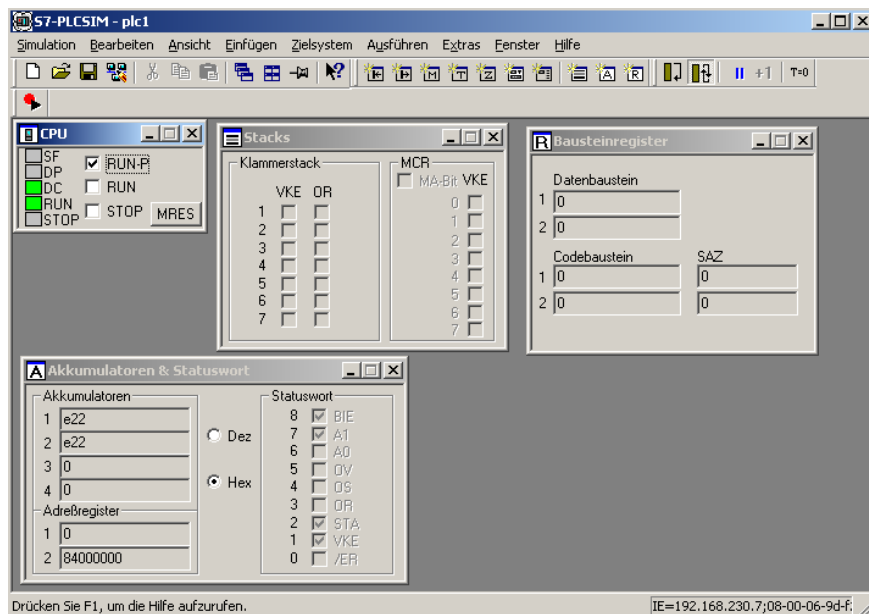


Abbildung 9: „Soft-SPS“

## 5.1 Regelungstechnik und Kopplungsparameter

Um die Kopplung zwischen dem Modell und der Feuerungsregelung lückenlos nachvollziehen zu können, ist ein kurzer Exkurs in die Regelungstechnik unabdingbar. Grundsätzlich lässt sich eine Feuerungsregelung schulbuchmäßig beschreiben als ein geschlossener Regelkreis mit Sollwertvorgabe, Soll-/Istwertvergleich, Regeleinrichtung (= „Intelligenz“) mit Stellgrößenbildung, Störgrößenaufschaltung und Istwerterfassung mit Rückführung darstellen [8]. Je nach Komplexität der aufgebauten Regelung und je nach vorhandener Anlagentechnik kann die Anzahl von Regelkreisen natürlich variieren.

Für eine Regelung sind - ganz allgemein - folgende Funktionen auszuführen:

- Messen der zu regelnden Größe
- Vergleichen der Regelgröße mit dem Sollwert
- Erzeugen eines geeigneten Stellbefehls
- Verstellen des Stellorgans

Verfolgt man nun die einzelnen Stufen des Regelvorganges (siehe Abbildung 10), so stellt man fest, dass es sich um einen geschlossenen Kreis handelt, den so genannten Regelkreis mit Rückkopplungsweig, der das wesentliche Merkmal einer Regelung ist. Die Regeleinrichtung besteht aus einem Verstärker und einer Einrichtung zur Erzeugung des gewünschten Zeitverhaltens. Die Energie der Regeldifferenz am Eingang des Reglers muss so verstärkt werden, dass am Ausgang genügend Energie zum Betätigen des Stellgliedes zur Verfügung steht. Unter dem Zeitverhalten eines Reglers versteht man die Reaktion des Reglers beim plötzlichen Auftreten einer Regeldifferenz, d.h. ob die Stellgröße sofort erzeugt wird oder erst nach einer gewissen Verzögerungszeit.

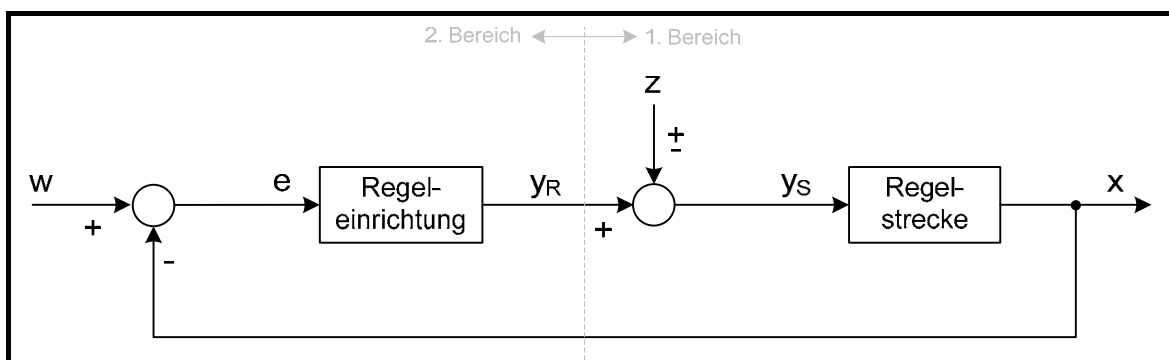
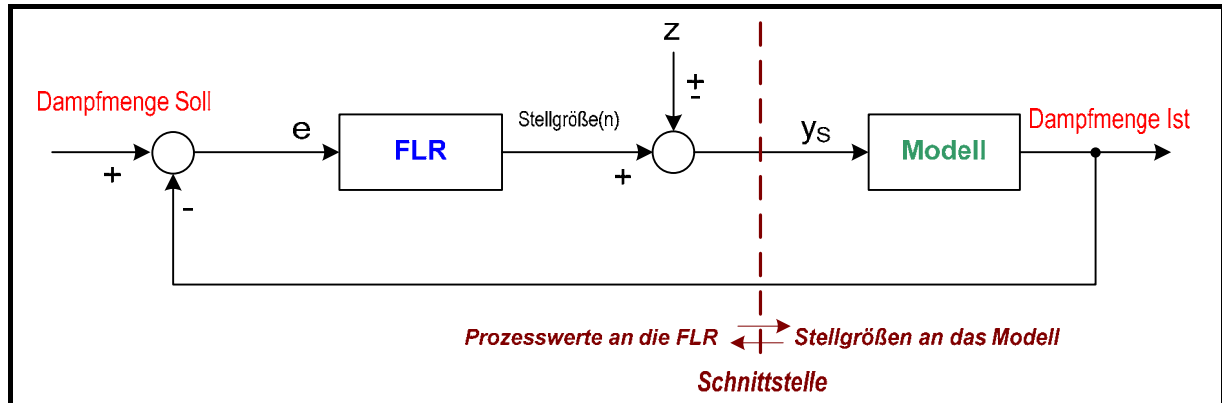


Abbildung 10: Einfacher Regelkreis mit Rückkopplung

Wendet man nun also obige Abbildung welche die Theorie eines geschlossenen Regelkreises darstellt auf das konkrete Problem „Kopplung Modell und Feuerungsregelung“ an, so ergibt sich unmittelbar die Anforderung an eine bidirektionale Schnittstelle, d.h. Modell und FLR tauschen Daten in beide Richtungen aus; diese Rückkopplung ist essentiell für einen funktionierenden Regelkreis.



**Abbildung 11: Beispielhafter Regelkreis adaptiert auf Feuerungsregelung**

Wie auf den Abbildungen 5 und 6 dargestellt, sind die tatsächlich vorhandenen Stellgrößen bzw. Stellglieder in der Regel überschaubar. Im konkreten Anwendungsfall des GKS Schweinfurt sind dies:

- 1 Ansteuerung für die Brennstoffdosierung; variabel sind die Hublänge und die Geschwindigkeit des Vorhubs; der Rückhub erfolgt konstant mit voller Geschwindigkeit um dem Ideal einer kontinuierlichen Beschickung möglichst nahe zu kommen.
- 3 Ansteuerungen für die 3 Zonen des Verbrennungsrostes; variabel sind die Hublänge, die Vorhub- und die Rückhubgeschwindigkeit.
- 5 Ansteuerungen für die 5 Primärluftzonen; variabel sind die eingebrachten Luftmengen und die Temperatur der Primärluft nach Luftvorwärmer.
- 4 Ansteuerungen für 4 Plattenluft- bzw. Seitenwandluftzonen; variabel sind die eingebrachten Luftmengen.

## 5.2 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 um Momentanwerte, die „jetzt“ durch die Feuerleistungsregelung berechnet werden.



Abbildung 12: Visualisierung aus dem Bereich Rost + Beschickung – markierte Istwerte

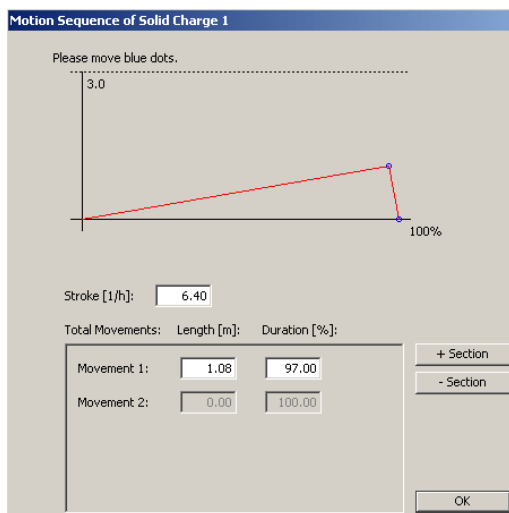


Abbildung 13: Parametrierung Beschickhub

Die Müllaufgabe erfolgt im Modell in einer festgelegten Zelle am oberen linken Rand als Massenquelle, d.h. als quasikontinuierliche Beschickung wie in der realen Anlage. Die Totzeit während dem Rückhub der Beschickung wird also berücksichtigt, wie auf Abbildung 13 dargestellt.

Da die Aufgabe mathematisch also als Massenstrom in  $[\frac{t}{h}]$  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 absolut zentralen Wert handelt (der sich je nach Vorgabe der Feuerungsregelung



permanent ändert), muss dieser in Ermangelung besserer Alternativen anders ermittelt werden und ggf. empirisch überprüft werden.

Im vorliegenden Fall wurde der Zusammenhang zwischen der beschickten Müllmenge (in  $[\frac{t}{h}]$ ) und der jeweils vorherrschenden Geschwindigkeit der Beschickeeinrichtung (in  $[\frac{DH}{h}]$ ) hergestellt, unter der Annahme, dass diese Aufgabegeschwindigkeit direkt proportional zum eingebrachten Müllmassenstrom ist.

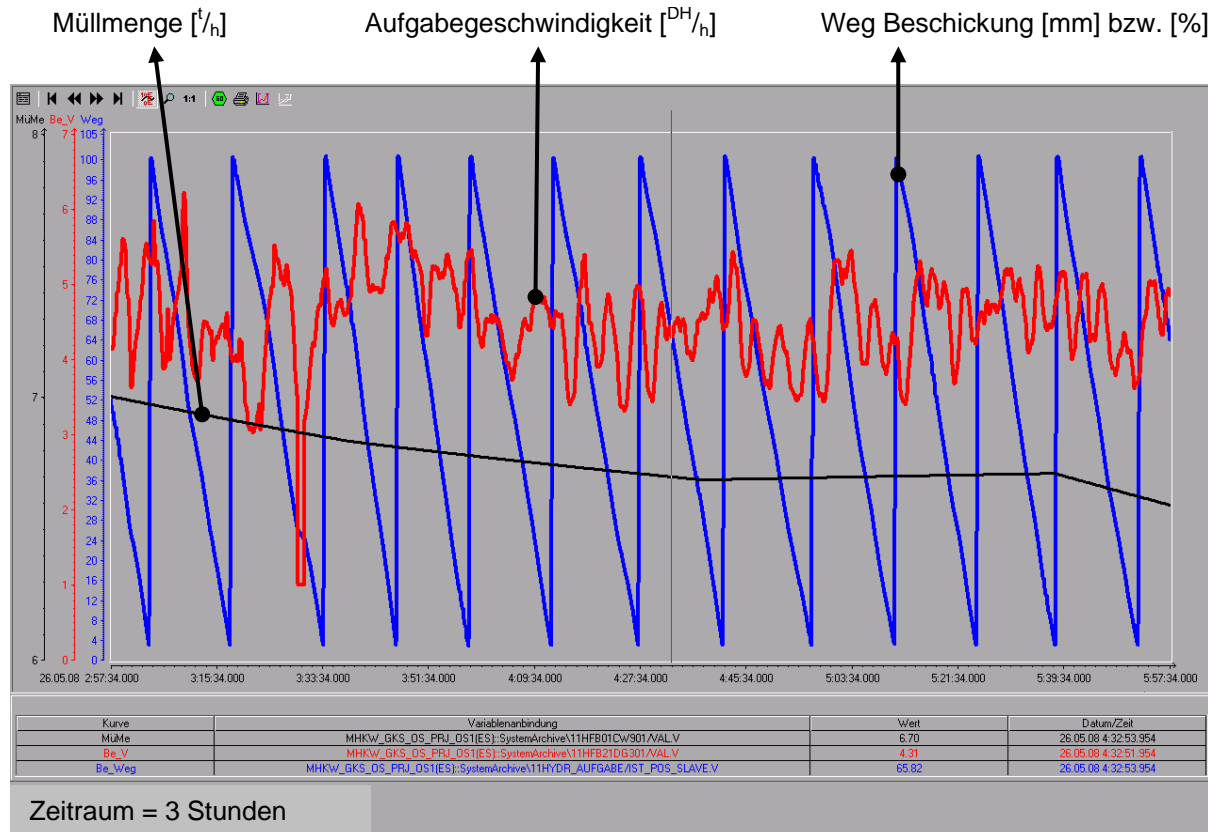


Abbildung 14: Trendanzeige Müllmenge – Aufgabegeschwindigkeit - Beschickhöhe

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):

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

### Abbildung 15: Ermittlung der Müllmenge pro Beschickhub

Der oben errechnete Wert von  $1,359 t_{DH}$  erscheint plausibel und wird als konstant angenommen und mit der jeweils gefahrenen Aufgabegeschwindigkeit [ $^{DH}/h$ ] kann ein aktuell vorherrschender Müllmassenstrom in [ $t/h$ ] berechnet und dem Modell als Eingangsgröße zur Verfügung gestellt werden. Eine Betrachtung über die verbrannte Müllmenge eines Jahres gemessen über die Brückenwaage an der Anlieferung und den durchschnittlich gefahrenen Hübten der Beschickung ergab ein quasi identisches Ergebnis, sodass davon ausgegangen werden kann, dass pro Beschickhub (vor + zurück) ca. 1,36 t Abfall auf den Rost gefördert wird.

Leider lassen sich dadurch noch keine Aussagen darüber treffen, wie viel von dieser Menge (definiert durch den Vorhub gefördert wird und wie viel (unkontrolliert) während des Rückhubs „durchrutscht“.

Dem interessierten Leser wird sofort auffallen, dass sich diese vorgestellte Methode der Berechnung einer  $\frac{\text{Müllmenge}}{\text{Beschickhub}}$  nur bei bestehenden Anlagen anwenden lässt, wenn bereits Betriebsdaten in ausreichender Form vorhanden sind. Beim Neubau von Anlagen ist maximal die theoretisch benötigte Müllmasse in [ $t/h$ ] aus dem Feuerleistungsdiagramm bekannt. Der Bezug zu den zu fahrenden Beschickhübten kann also (noch) nicht hergestellt werden. Zur Zeit laufen jedoch Forschungsaktivitäten um diesem noch ungelösten Problem beizukommen. Solange dieses Problem noch nicht gelöst ist, muss mit Erfahrungswerten aus vergleichbaren Anlagen hantiert werden.

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

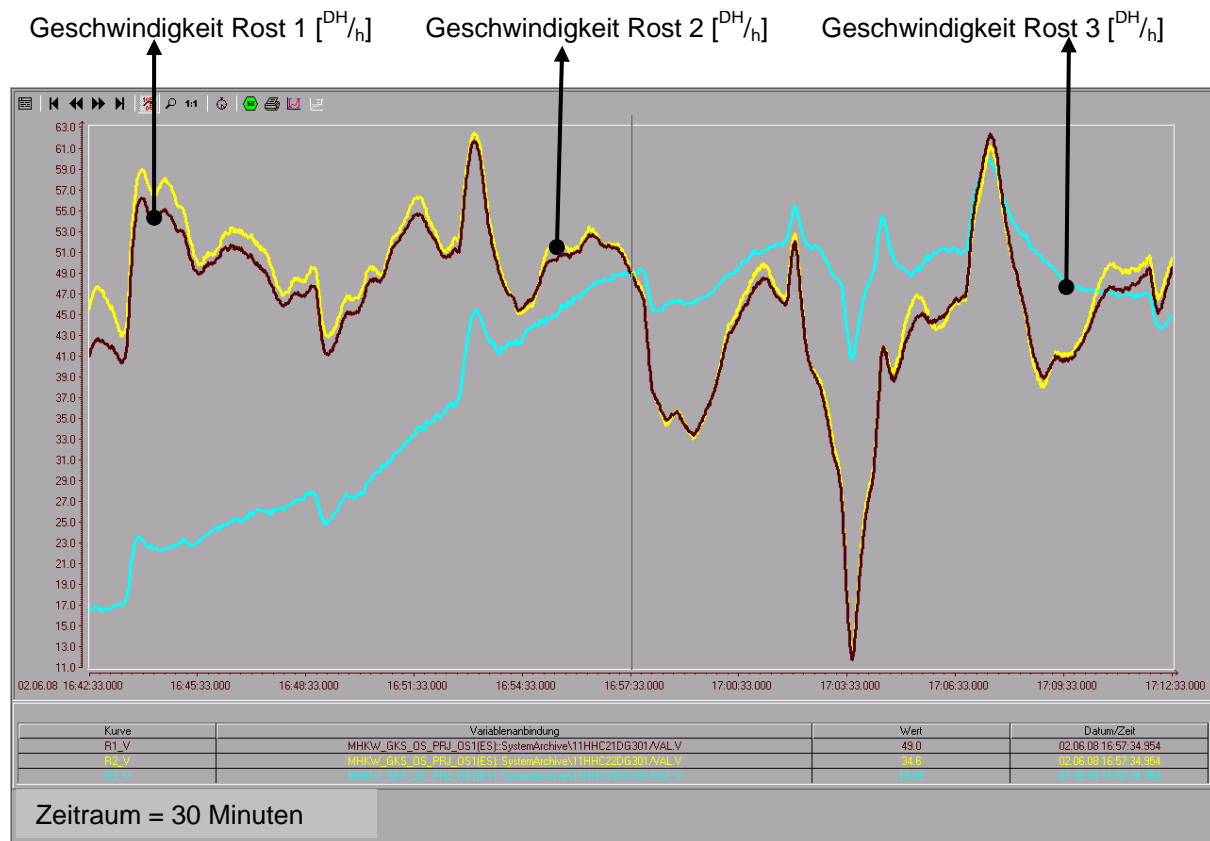
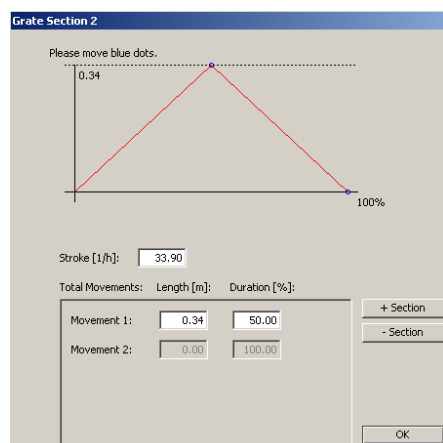


Abbildung 16: Trendanzeige - Rostgeschwindigkeiten

Diese Rostgeschwindigkeiten werden zur Ansteuerung des Hydraulik-Lageregelkreises immer in



aktuelle Hubfrequenzen umgerechnet und manifestieren sich in unterschiedlichen Steilheiten des zurückgelegten Weges pro Zeiteinheit, also der Geschwindigkeit; 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: Parametrierung Hub Rost

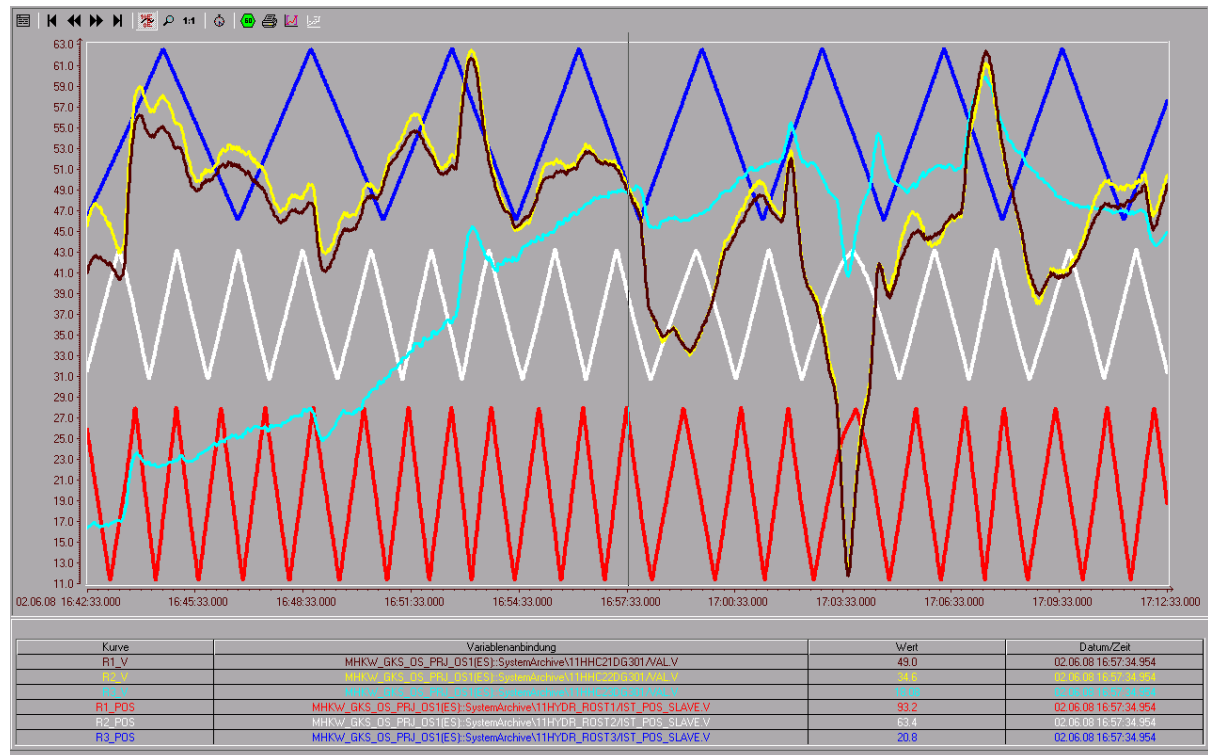


Abbildung 18: Trendanzeige – Rostgeschwindigkeiten – Rosthübe

Im Gegensatz zur Beschickung erfolgt der Rückhub des Rostwagens nicht mit konstanter Geschwindigkeit, sondern wird genauso geregelt wie der Vorhub.

### 5.3 Bereich Verbrennungsluft

Analog gilt es zu verfahren für die Verbrennungsluftmengen. Wiederum sind die relevanten Werte in Abbildung 20 markiert.

### 5.4 Input - Brennstoffzusammensetzung

Eine weitere wichtige 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. parametrisiert auf  $8 \text{ MJ/kg}$ ) und eine heizwertreiche (z.Z. parametrisiert auf  $15 \text{ MJ/kg}$ ). 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 parametrisiert werden.

Aus den beiden Fraktionen (heizwertarm und heizwertreich) kann nun ein bestimmter Heizwert zusammengestellt werden. Zum Beispiel ergeben 50% heizwertarme und 50% heizwertreiche Fraktion einen Heizwert von  $11,5 \text{ MJ/kg}$ . Somit kann die Reaktion der Feuerung und der Feuerungsregelung auf Heizwertschwankungen untersucht werden, die manuell „provoziert“ wurden (siehe dazu Abschnitt 6.2).

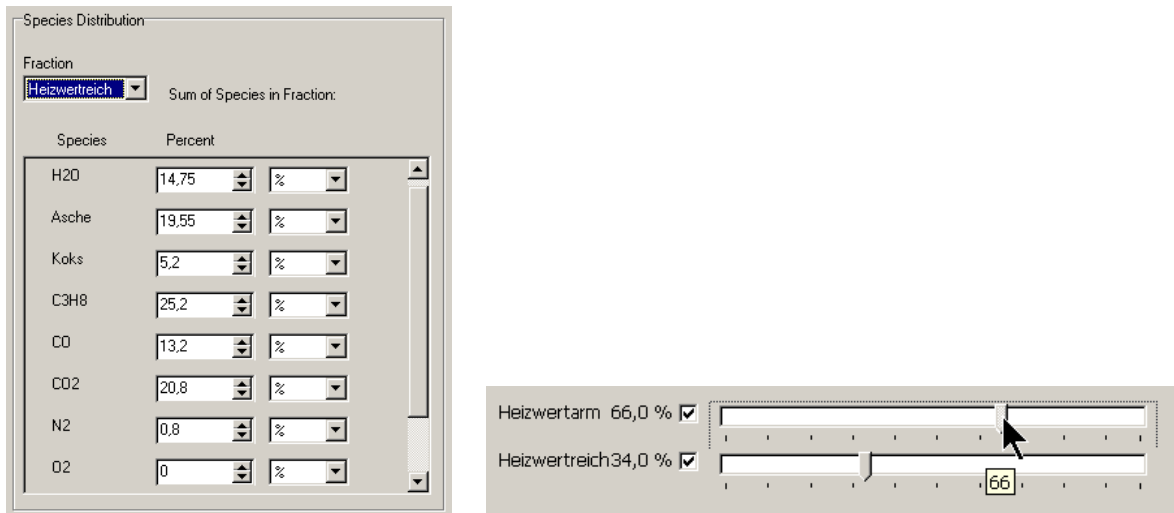


Abbildung 19: Zusammensetzung Fraktionen und einstellbare Mischung der Fraktionen

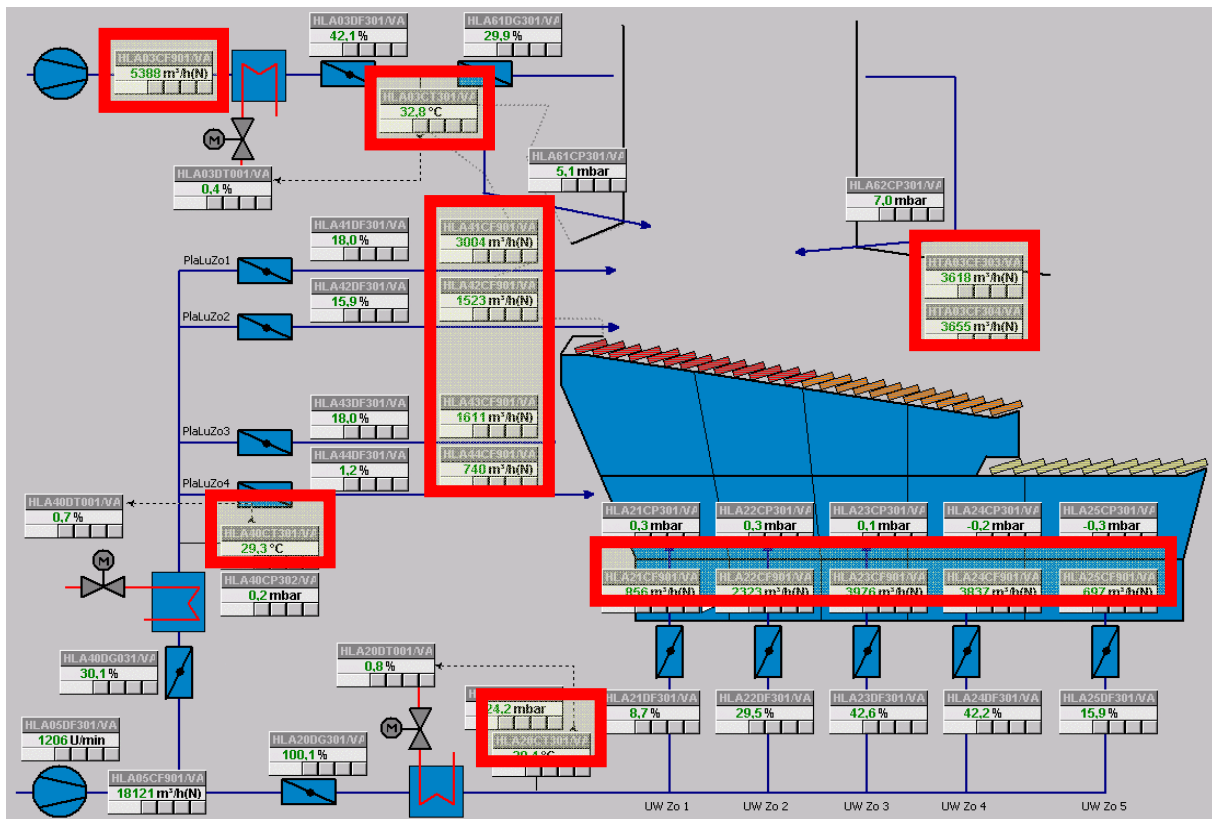


Abbildung 20: Visualisierung aus dem Bereich Verbrennungsluft – markierte Istwerte

Die Vorgabe des Heizwerts erfolgt über die Bedienoberfläche des Prozessleitsystems:

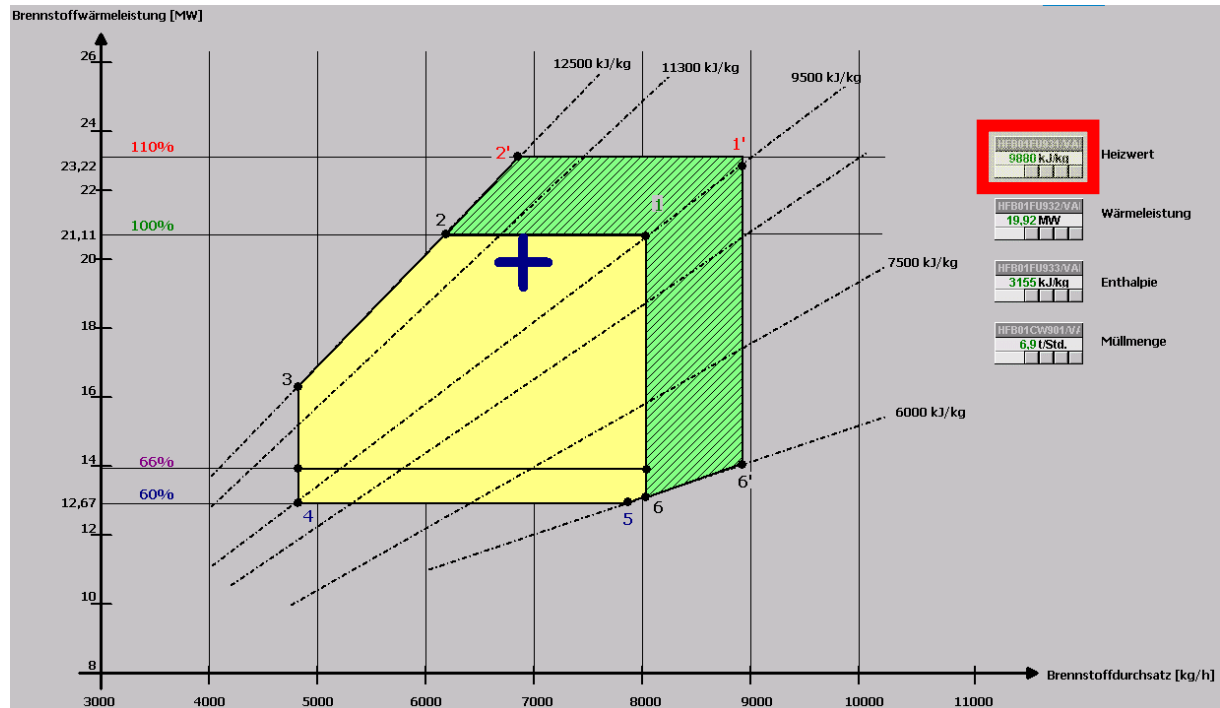


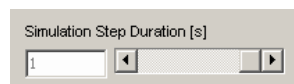
Abbildung 21: Feuerleistungsdiagramm mit berechnetem Heizwert (markiert)

## 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. Für den hier näher zu untersuchenden Fall, dass das Modell für die FLR ein Abbild zur Realität schaffen soll, ist diese Möglichkeit ungeeignet. Denn die Zeitbasis muss sowohl im Modell als auch bei den in der FLR enthaltenen Reglern identisch sein, sonst könnten die Regelparameter nicht auf die Praxis übertragen werden.



## **6.2 Online-Betrieb mit Kopplung an Feuerungsregelung - Simulationsbetrieb**

Mit der Online-Kopplung des Modells im Simulationsbetrieb wird der Feuerungsbetrieb simuliert und an die Feuerungsregelung gekoppelt. Das dazu notwendige Automatisierungssystem wird mittels dem bereits in Kapitel 5 erwähnten 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 derselben Rechnerhardware 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 eben hier die Möglichkeit mit verschiedenen Parametern - 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“.

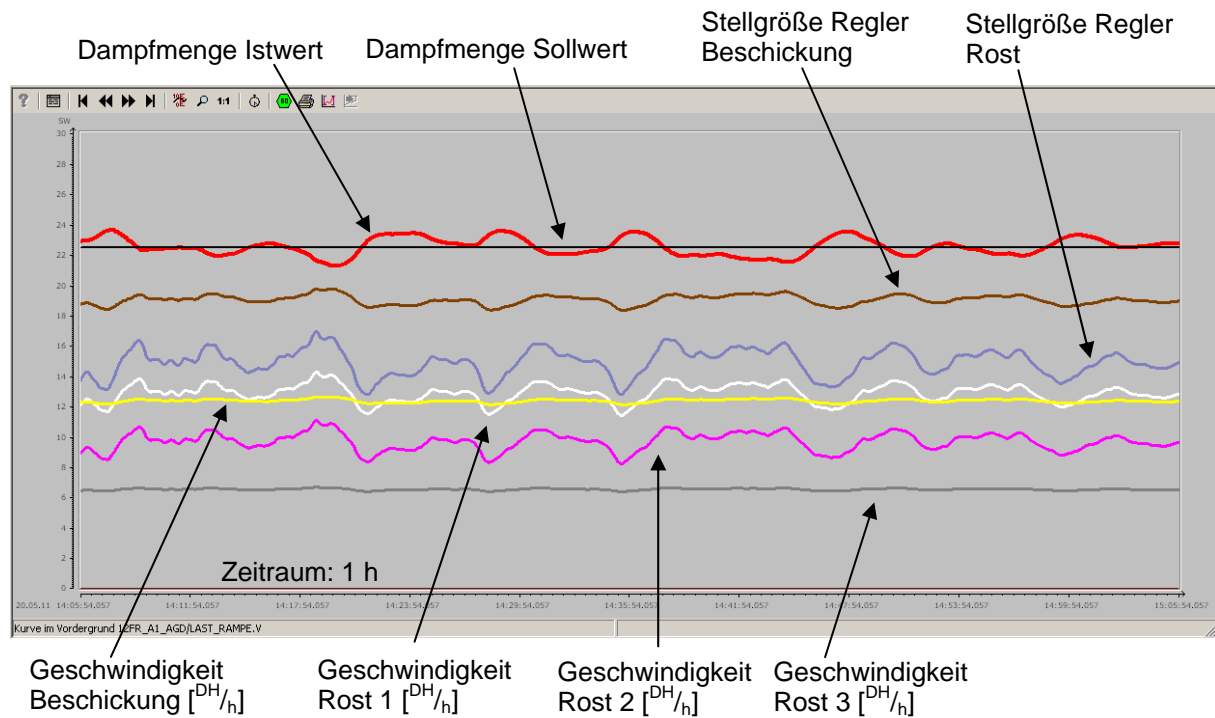
Auch der Schulungs- und Lerneffekt der dadurch entsteht sei hervorgehoben.

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, Neigung des Rostes etc. in kurzem tatsächlichen Zeitaufwand simuliert und bewertet werden können.

## **7 Betrieb der „Feuerungssimulation“**

Der Vorteil der sich durch die Kopplung des Modells an eine in einem Prozessleitsystem realisierte Feuerungsregelung ergibt, sind die standardmäßig an Bord befindlichen Werkzeuge zur Datenanalyse und Datenauswertung wie z.B. eine Trendkurvendarstellung. Nur durch die Darstellung von Werten über einen Zeitverlauf hinweg können Zusammenhänge erkannt und unterschiedliche Parameter miteinander aufwandsarm verglichen werden. Nachfolgende Darstellungen sollen einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten geben, die sich durch die Modell-FLR ergeben.

Normaler Betrieb: Nachfolgende Abbildung zeigt einen normalen, modellierten(!) Betriebszustand der Feuerung bzw. der Feuerungsregelung mit einem eingestellten Heizwert von  $9,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ .



**Abbildung 22: Betrieb der Feuerungssimulation, 1h bei 9,5 MJ/kg**

Man erkennt auf Abbildung 22 einen eingestellten Dampfleistungssollwert von  $22,5 \frac{t}{h}$  was dem 100%-Lastfall der modellierten Verbrennungslinie 12 des GKS Schweinfurt entspricht. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es sich bei den o.e. erwähnten Reglern jeweils nur um jene Regler bzw. Stellgrößen handelt, die ausschließlich auf das Dampfmengensignal reagieren. Würde man die Modell-FLR weiter optimieren wollen, so ist es natürlich unabdingbar weitere Regelgrößen wie z.B.  $O_2$ -Gehalt am Kesselende, div. Feuerraumtemperaturen etc. mit aufzunehmen. Dies ist grundsätzlich problemlos möglich, wird aber aus Gründen der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit hier nicht durchgeführt.

Es fällt auf, dass die Stellgröße des Rost-Reglers wesentlich „aggressiver“ auf Dampfmengenschwankungen reagiert, als der Beschickungs-Regler. Dieses Verhalten ist grundsätzlich richtig und gewünscht, da die Aufgabe der Beschickung darin liegt, längerfristige Heizwertschwankungen auszugleichen, braucht dieser Regler auf „kleinere“ Dampfmengenschwankungen nicht so stark zu reagieren. Diese Schwankungen auszugleichen ist Aufgabe des Rostes aber vor allem der Verbrennungsluft (Primärluft).

Ein interessantes Szenario lässt sich anhand eines provozierten Heizwertwechsels analysieren. Durchgeführt wurde ein Heizwertwechsel von  $9,5 \frac{MJ}{kg}$  auf  $7,8 \frac{MJ}{kg}$ . Der Sollwert der Dampfleistung blieb dabei auf dem 100%-Lastpunkt von  $22,5 \frac{t}{h}$  bestehen.



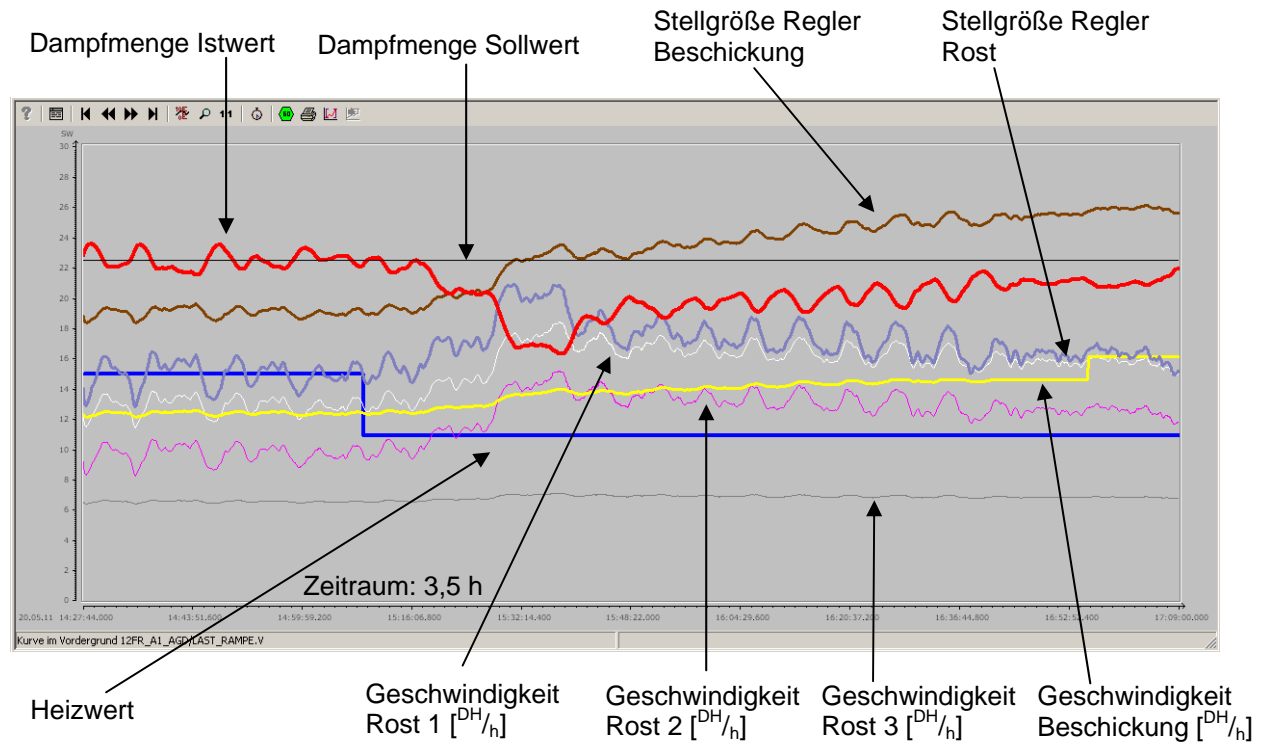


Abbildung 23: Betrieb der Feuerungssimulation, Heizwertsprung von 9,5 auf 7,8  $\text{MJ}/\text{kg}$

Folgender Ablauf wurde in dem Szenario beobachtet bzw. durchgeführt:

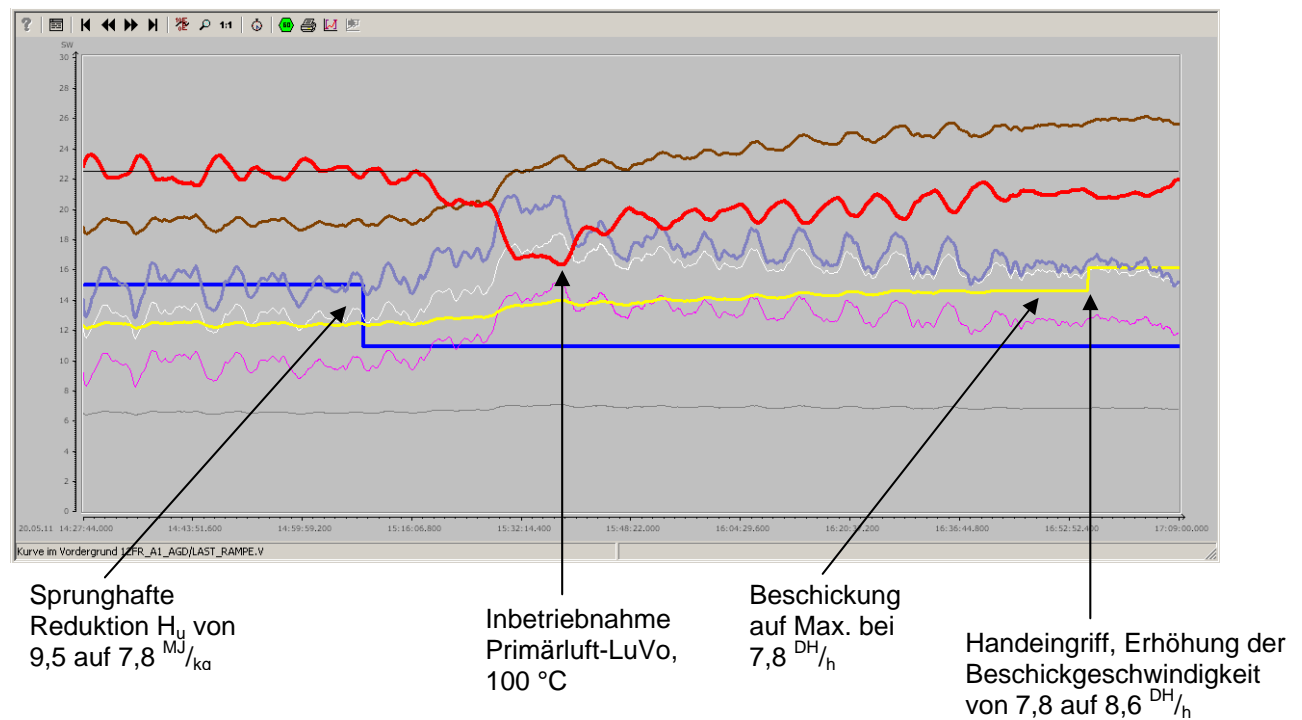


Abbildung 24: Betrieb der Feuerungssimulation, Heizwertsprung von 9,5 auf 7,8  $\text{MJ}/\text{kg}$ , Reaktion der Regelung

Auf Abbildung 24 zeigt sich, dass der (Dampf-)Regler der Beschickung viel zu träge parametrisiert ist und es in über 2 Stunden nicht schafft, ausreichend Müllmenge zu fördern um damit den niedrigeren Heizwert auszugleichen. Der Beschickungsregler fährt also annähernd ausschließlich über seinen (zu lang parametrisierten) Integralanteil und zu wenig über den Proportional- und Differentialanteil. Des Weiteren zeigt sich, dass die Beschickgeschwindigkeit bei 7,8 Doppelhüben pro Stunde ( $^{DH}/h$ ) bereits „auf Anschlag“ ist, obwohl die Stellgröße des Beschickungsreglers erst zu ca. 70 % angesteuert ist, d.h. die restlichen 30 % Stellgröße des Beschickungsreglers kosten nur Zeit, bringen aber de facto nichts mehr. Aus diesem Grunde wurde dann auch per Handeingriff die Beschickgeschwindigkeit erhöht auf 8,6  $^{DH}/h$ . Somit konnte dann die angestrebte Soll-Dampfleistung wieder erreicht werden. Auch die Regelparameter des Rost-Reglers weisen einen zu hohen Proportionalanteil auf, da eindeutig zu erkennen ist, wie die zu starke Variation der Rostgeschwindigkeiten die Dampfmenge zum Schwingen bringt.

Wendet man die ermittelte Müllmasse pro Beschickhub bei dem vorliegenden Szenario an, so zeigt sich, dass bei einem Heizwert von  $9,5 \text{ MJ}/\text{kg}$  im Schnitt  $6,6 \text{ }^{DH}/h$  notwendig waren um die Dampfleistung von  $22,5 \text{ }^t/h$  zu halten; dies entspräche einem Müllmassenstrom von  $8,97 \text{ }^t/h$ . Die tatsächlich notwendigen  $8,6 \text{ }^{DH}/h$  würden einem Müllmassenstrom von über  $11 \text{ }^t/h$  entsprechen. Betrachtet man das Feuerleistungsdiagramm, so wird ersichtlich dass diese Anlage gar nicht dazu ausgelegt ist, um mit Heizwerten von  $< 8,5 \text{ MJ}/\text{kg}$  den 100%-Lastpunkt dauerhaft zu fahren.

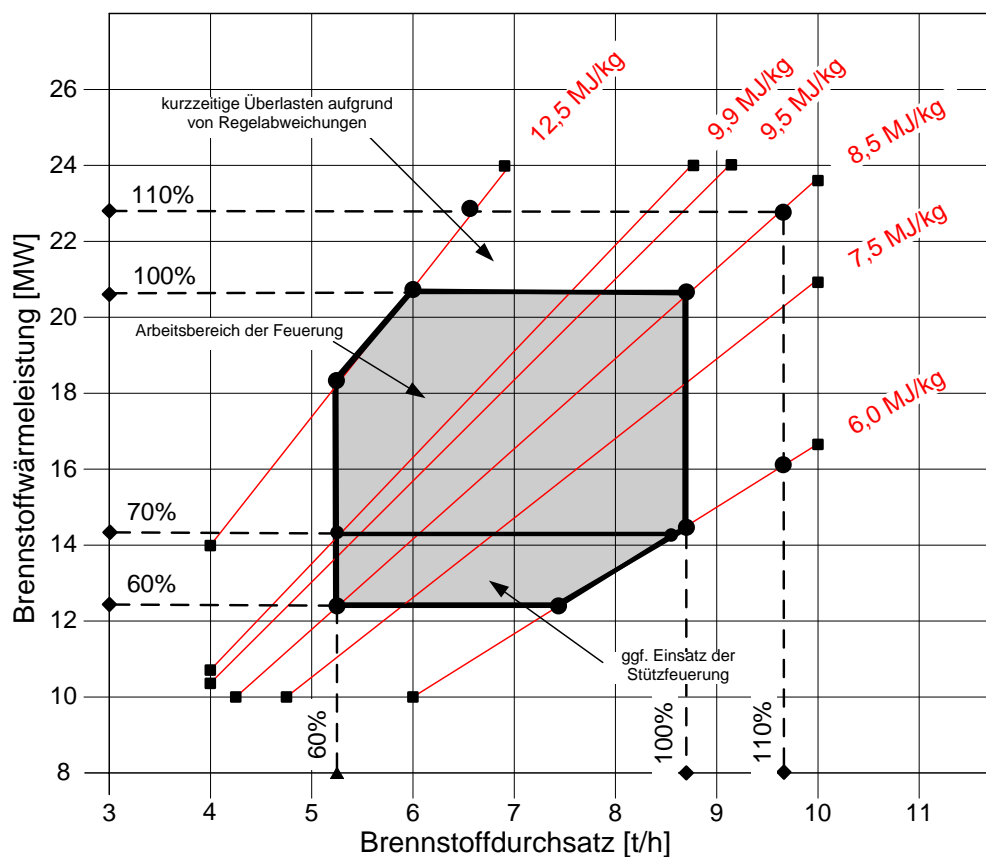
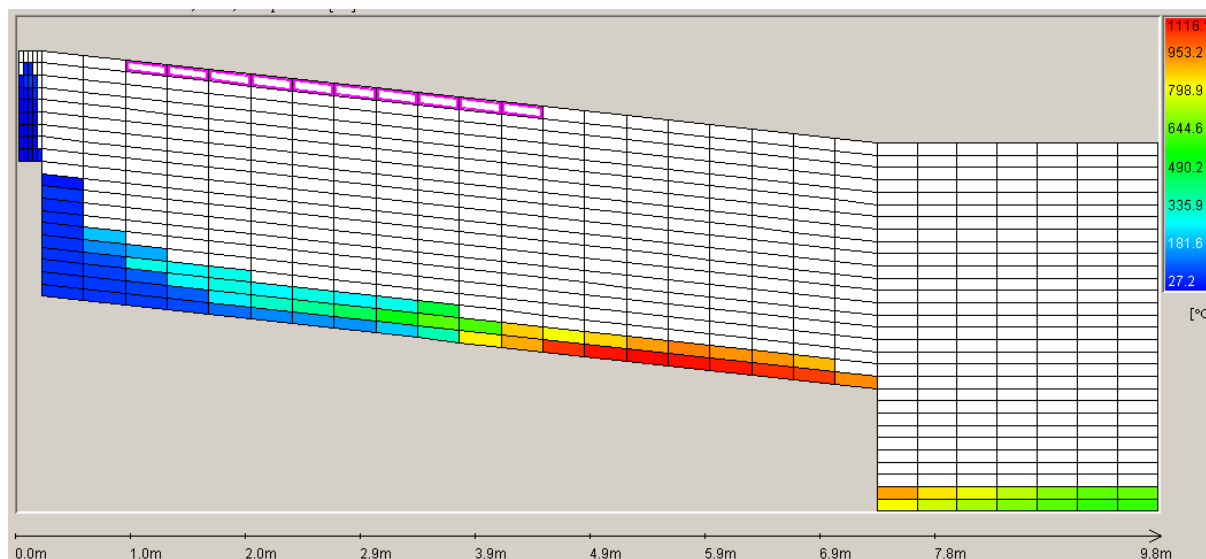
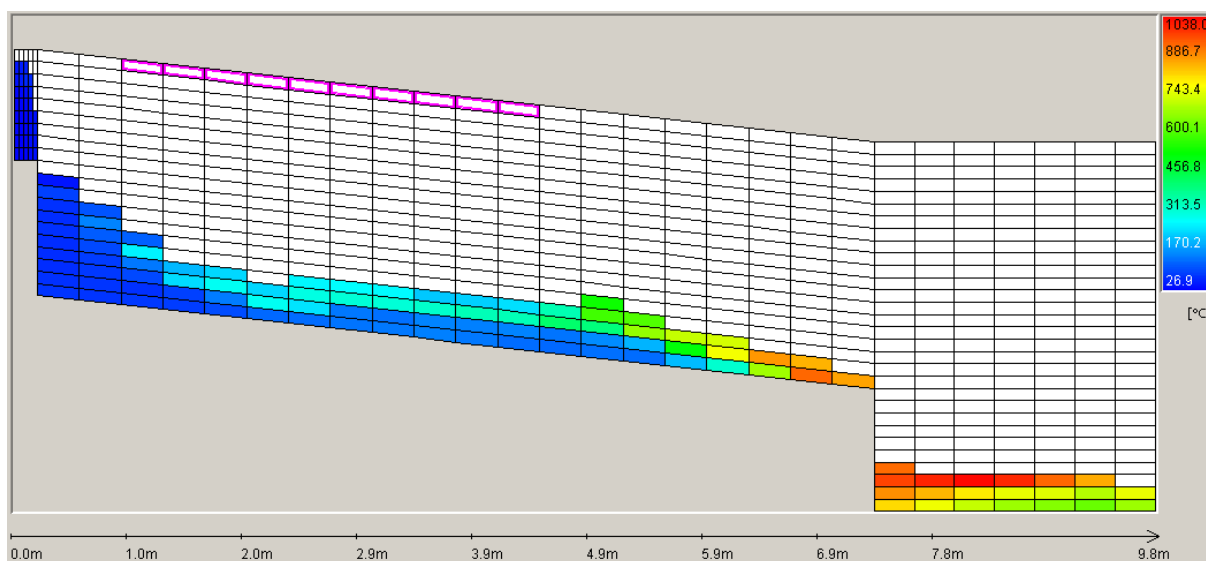


Abbildung 25: Der Simulation zugrundeliegendes Feuerleistungsdiagramm

Vergleicht man die Schichtdicken auf dem Rost, so erkennt man deutlich die Unterschiede zwischen den gefahrenen Heizwerten von  $9,5 \text{ MJ/kg}$  und  $7,8 \text{ MJ/kg}$ :



**Abbildung 26: Schichthöhe auf dem Rost bei  $9,5 \text{ MJ/kg}$**



**Abbildung 27: Schichthöhe auf dem Rost bei  $7,8 \text{ MJ/kg}$**

Diese Beobachtung deckt sich auch mit der vorherrschenden Feuerlage, die im Modell bei dem vorgegebenen Heizwert von  $7,8 \text{ MJ/kg}$  berechnet wurde; siehe Abbildung 28.

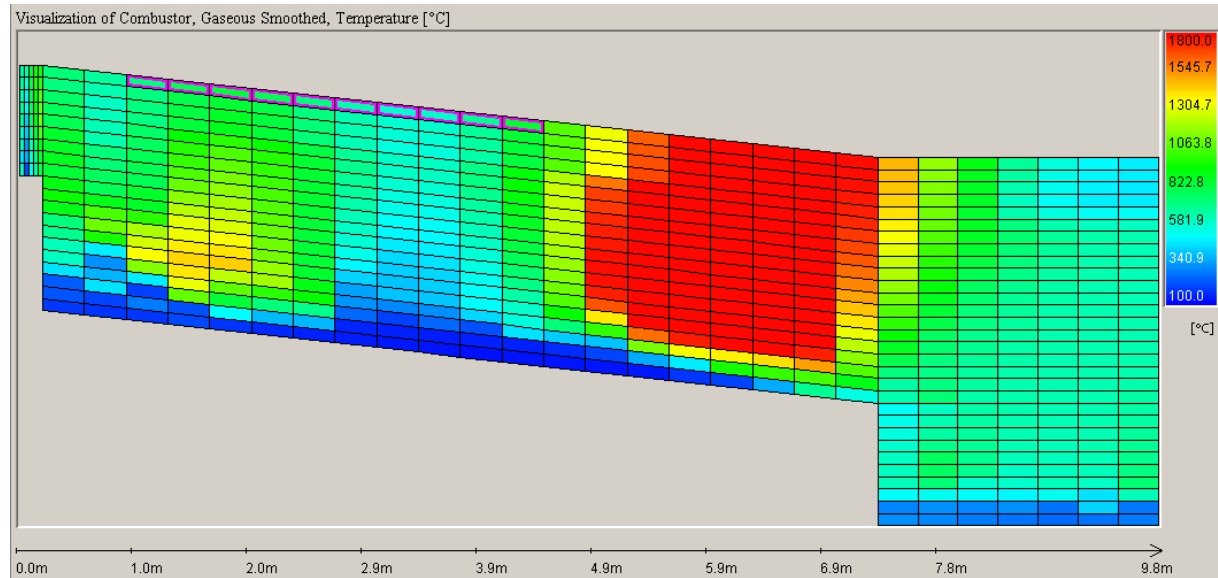
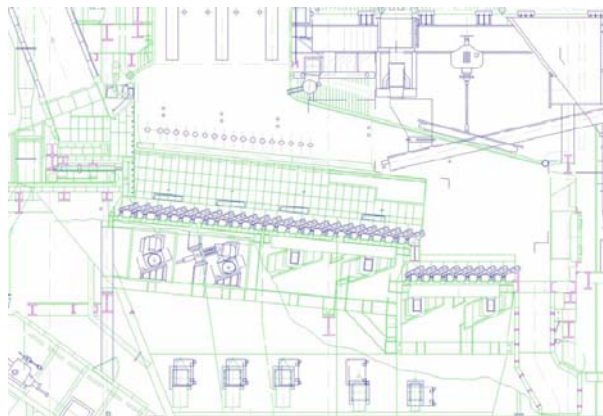


Abbildung 28: Feuerlage bei  $7,8 \text{ MJ/kg}$

Es zeigt sich eine Feuerlage die aufgrund des relativ niedrigen Heizwertes und der hohen



Schichtdicke viel zu weit hinten liegt, also auf der Primärluftzone 4 direkt unterhalb Ausbranddecke - wenn man sich den Querschnitt der Feuerung in Erinnerung ruft wird klar, dass diese Feuerlage mit Sicherheit binnen kürzester Zeit Schäden an der Feuerfestzustellung der Ausbranddecke zur Folge hätte.

Eine optimale Feuerlage konnte hingegen im 100%-Lastfall bei den eingestellten  $9,5 \text{ MJ/kg}$

realisiert werden (Abbildung 29).

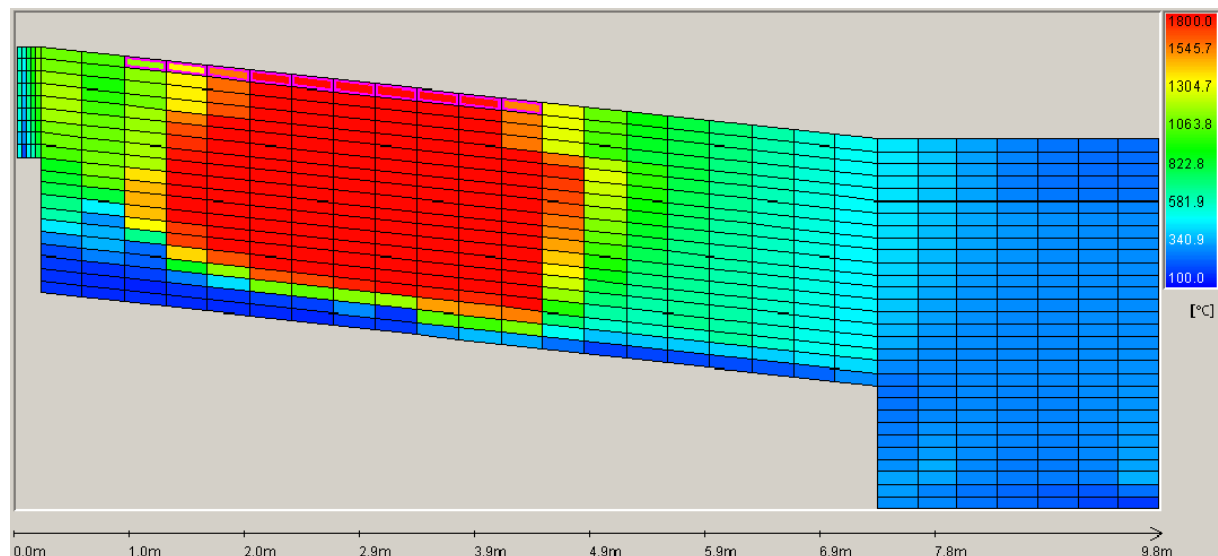
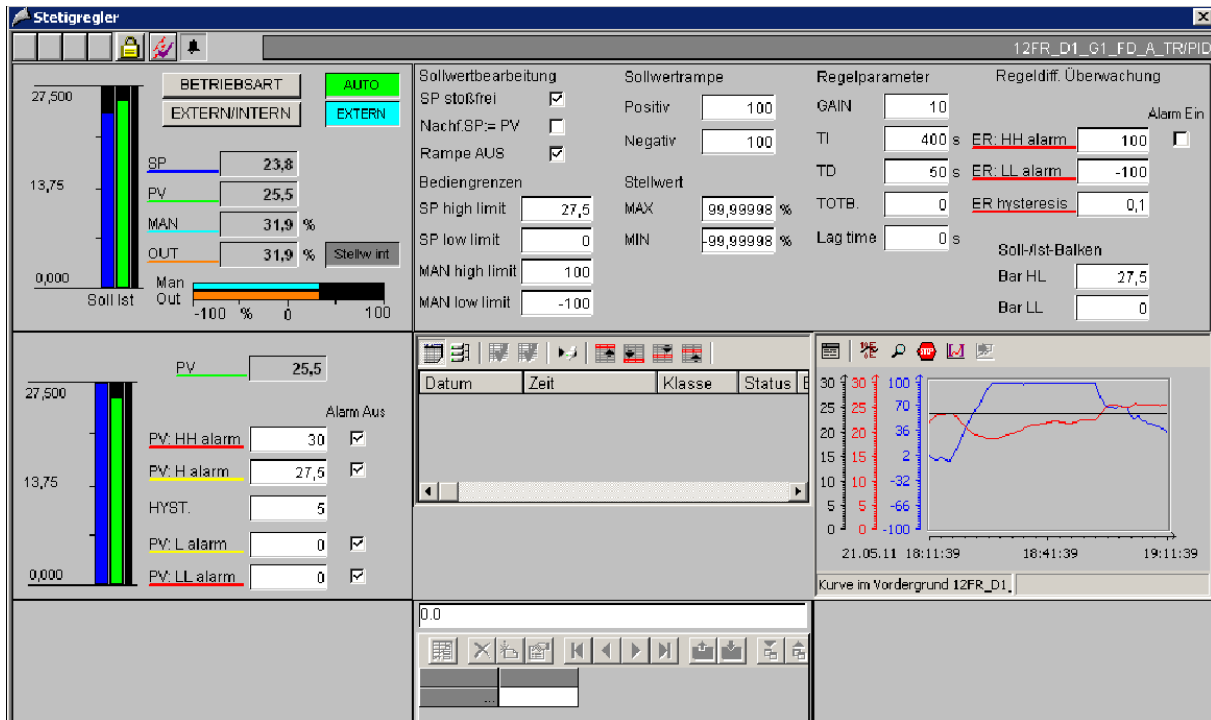


Abbildung 29: Feuerlage bei  $9,5 \text{ MJ/kg}$

Einen weiteren Anwendungsfall zeigt - wie bereits erwähnt - das „Experimentieren“ mit verschiedenen Reglerparametern. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei optimal parametrisierten Regler nicht nur um „Spielerei“ handelt, sondern diese Reglereinstellungen haben wesentlichen Einfluss auf die Feuerung und die dadurch entstehenden Emissionen etc. Eine mögliche Reglerparametrierung konnte im Bereich der Regelung der Beschickungsgeschwindigkeit bereits in den Abbildung 23 und 24 beobachtet werden.



**Abbildung 30: Reglerparametrierung**

Wie in nachfolgender Abbildung 31 dargestellt, sollte i.A. das als „zu träge“ diagnostizierte Verhalten dieses Reglers optimiert werden. Ein erster - in der Praxis durchaus üblicher - Ansatz hierzu ist eine Erhöhung des Proportionalfaktors  $k_p$  und eine Verminderung der Integrationszeitkonstante  $T_i$ . Unmittelbar nach Umstellung der Reglerparameter zeigt sich unmittelbar eine Verbesserung der Dampfmengekonstanz. Die Qualität (und Stabilität) eines Regelkreises zeigt sich jedoch erst bei dynamischen Vorgängen wie z.B. einer Änderung der Störgröße. Aus diesem Grund wurde der Regelkreis mit einer Heizwertänderung von hohem hin zu niedrigem Heizwert beaufschlagt.

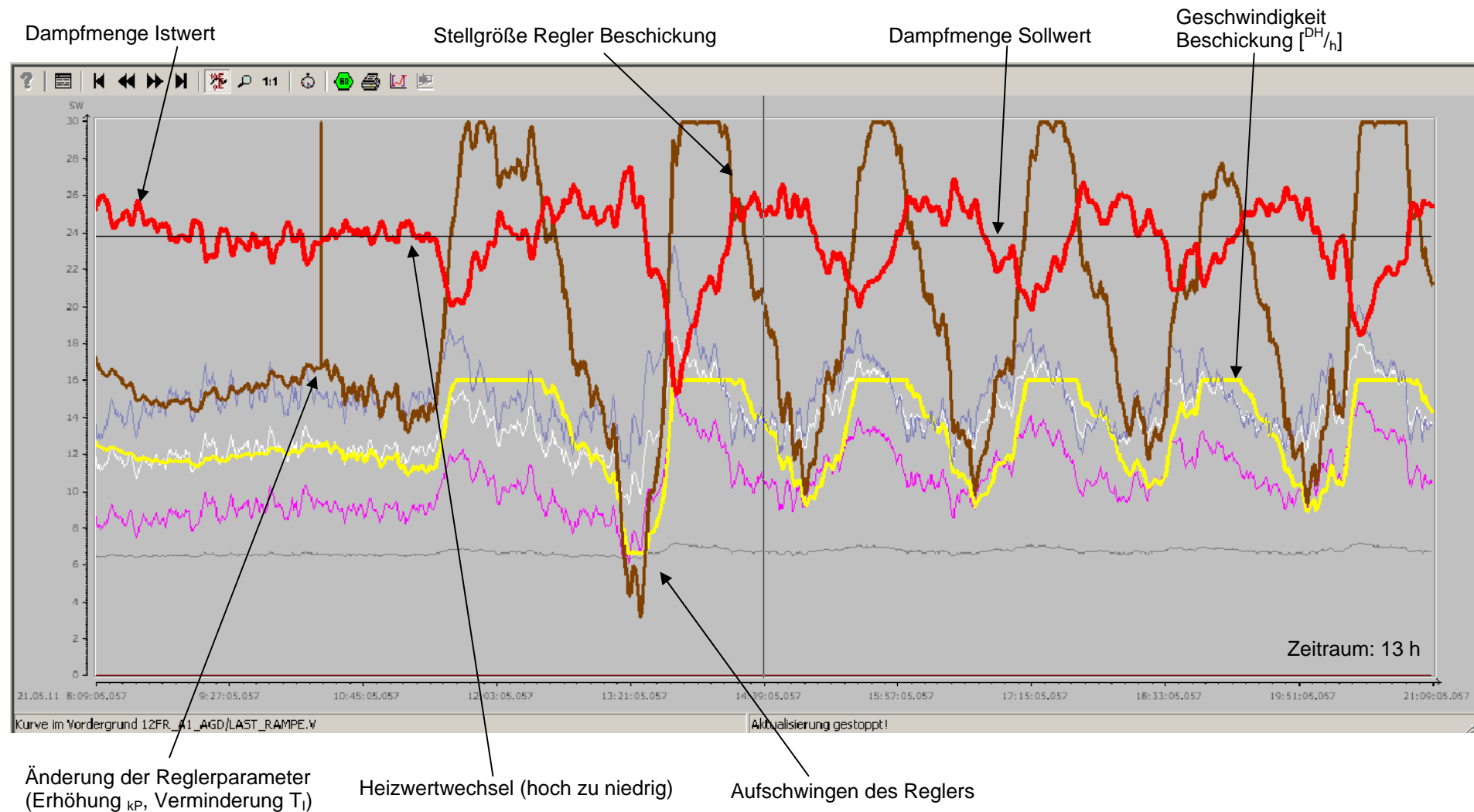


Abbildung 31: Betrieb des Feuerungsmodells, 13 h mit Aufschwingen des Regelkreises

Auf Abbildung 31 zeigt sich, dass die Absenkung des Heizwerts (erwartungsgemäß) erst einmal zu einem Absinken der produzierten Dampfmenge führt. Die Aufgabe des Beschickungsreglers ist es nun, diesen Einbruch durch mehr Brennstoff auszugleichen. Der Regler schafft zwar den Leistungseinbruch zu kompensieren, jedoch führt dies anhand der ungünstig gewählten Reglerparameter zu einem Aufschwingen des Regelkreises. Dies führt in weiterer Folge zum permanenten Schwingung der ganzen Feuerung, was erst dann offensichtlich wird, wenn man dies über einen längeren Zeitraum beobachten kann.

Relativ leicht kann man sich die Auswirkungen dieses falsch eingestellten Reglers auf die komplette Anlage vorstellen. Neben der im vorliegenden Fall sicher stattgefundenen Überschüttung des Rostes, wirkt sich eine unruhige Feuerung sich auch auf alle nachgeschalteten Anlagenteile wie Saugzuggebläse, Rauchgasreinigung etc. aus und kann auch dort zu ineffizienten Betriebszuständen führen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist eine Feuerungssimulation durch die Kopplung von Feuerleistungsregelung (FLR) und Feuerungsmodell aufzubauen. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass diese Feuerungssimulation tauglich ist, um für die Rostfeuerung relevante Parameter wie Beschickungs- und Rostgeschwindigkeiten sowie Verbrennungsluftmengen auszutesten. Die Regler der FLR können also parametrisiert und optimiert werden, während das Modell im Hintergrund läuft.

Wie an den Beispielen der (Abbildungen 31 und 24) durchgeführten Heizwertschwankung gezeigt werden konnte, ist es durch die vorliegende Simulation auch möglich, die Abstimmung der einzelnen Reglerstellgrößen auf den Spielraum der Stellglieder abzustimmen. Dies mag bei dem einen im Beispiel in Betrieb befindlichen Dampfregler noch recht einfach sein. Wenn aber 3 oder mehr Regler auf ein und dasselbe Stellglied einwirken ist es sehr wichtig, dass die einzelnen Reglerstellgrößen aufeinander und auf das Regelband des Stellgliedes abgestimmt sind. Ansonsten kann es passieren, dass ein Stellglied bereits durch einen Regler voll angesteuert ist, obwohl ein weiterer Regler - dessen Messgröße unter Umständen sogar eine höhere Qualität besitzt - auch auf das Stellglied einwirken möchte.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass die sich die durchgeführten Untersuchungen auf die (Dampfmengen-)Regelkreise für Rost und Beschickung beschränkt haben. In weiterer Folge müssen natürlich auch noch die (Dampfmengen-)Regelkreise für die Verbrennungsluft betrachtet werden sowie die Regelkreise für weitere Mess- bzw. Regelgrößen wie z.B. O<sub>2</sub>-Gehalt, Feuerraumtemperaturen, Schichtdicken etc.

Damit die hier vorgestellte Kopplung auch für Neuanlagen tauglich wird, d.h. um das Verhalten einer Anlage die lediglich auf dem Papier existiert, vollumfänglich simulieren zu können ist sicher noch jede Menge an Entwicklungsarbeit notwendig. Zum einen muss das Feuerungsmodell im Detail noch etwas optimiert werden und zum anderen müssen Wege gefunden, um die Brennstoffdosierung etwas genauer spezifizieren und prognostizieren zu können.

Die Arbeiten zum Validieren des Modells laufen permanent und sind auch schon soweit fortgeschritten, dass man den Daten die das Modell liefert trauen kann. Die beobachteten Zeitverläufe weisen definitiv ein zur realen Anlage identisches Verhalten hinsichtlich Reaktions- und Totzeiten auf.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Pfeiffer B.-M.: Standardisierung gehobener Regelungsfunktionen als Messstellen-Typen. VDI-Berichte Nr. 1980, 2007.
- [2] Warnecke R., Wirtz S., Marzi Th., Weghaus M.: 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.
- [6] Weghaus M., Warnecke R.: Beschreibung der Verbrennungsprozesse auf dem Rost. Internes Papier der GKS Schweinfurt GmbH, [www.gks-sw.de](http://www.gks-sw.de), Zugriff am 17.5.2011
- [7] Reimann, D. O.: Rostfeuerungs-systeme und Möglichkeiten der Emissionsminderungen durch Feuerleistungsregelungen. In: Müllverbrennung und Umwelt 5 (ISBN 3-924511-56-X), K. J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik, Berlin, 1991, S.40 - 44
- [8] Albert, F. W.: Ziel und Möglichkeiten der Regelungstechnik an Müllverbrennungskesseln. In: VDI Berichte 895, Prozessführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: FLR-Basistabelle Verbrennungsluft .....	6
Abbildung 2: FLR-Basistabelle Transport.....	7
Abbildung 3: FLR-Regler und -Gewichtungstabelle Verbrennungsluft .....	8
Abbildung 4: FLR-Regler und -Gewichtungstabelle Transport.....	8
Abbildung 5: Übersicht Stellgrößen Rostfeuerung [4] .....	10
Abbildung 6: Mögliche Stellgrößen Rostfeuerung .....	10
Abbildung 7: Querschnitt Feuerung GKS Schweinfurt [4] .....	12
Abbildung 8: Umgesetzte Diskretisierung der Modellvorstellung in die Berechnungszellen des Modells .....	12
Abbildung 9: „Soft-SPS“ .....	13
Abbildung 10: Einfacher Regelkreis mit Rückkopplung .....	14
Abbildung 11: Beispielhaftwer Regelkreis adaptiert auf Feuerungsregelung .....	15
Abbildung 12: Visualisierung aus dem Bereich Rost + Beschickung – markierte Istwerte .....	16
Abbildung 13: Parametrierung Beschickhub .....	16
Abbildung 14: Trendanzeige Müllmenge – Aufgabegeschwindigkeit - Beschickhöhe .....	17
Abbildung 15: Ermittlung der Müllmenge pro Beschickhub.....	18
Abbildung 16: Trendanzeige - Rostgeschwindigkeiten .....	19
Abbildung 18: Trendanzeige – Rostgeschwindigkeiten – Rosthübe .....	20
Abbildung 21: Feuerleistungsdiagramm mit berechnetem Heizwert (markiert) .....	22
Abbildung 22: Betrieb der Feuerungssimulation, 1h bei $9,5 \text{ MJ/kg}$ .....	24
Abbildung 23: Betrieb der Feuerungssimulation, Heizwertsprung von $9,5$ auf $7,8 \text{ MJ/kg}$ .....	25
Abbildung 24: Betrieb der Feuerungssimulation, Heizwertsprung von $9,5$ auf $7,8 \text{ MJ/kg}$ , Reaktion der Regelung .....	25
Abbildung 25: Der Simulation zugrundeliegendes Feuerleistungsdiagramm .....	26
Abbildung 26: Schichthöhe auf dem Rost bei $9,5 \text{ MJ/kg}$ .....	27
Abbildung 27: Schichthöhe auf dem Rost bei $7,8 \text{ MJ/kg}$ .....	27
Abbildung 28: Feuerlage bei $7,8 \text{ MJ/kg}$ .....	28
Abbildung 29: Feuerlage bei $9,5 \text{ MJ/kg}$ .....	28
Abbildung 30: Reglerparametrierung .....	29
Abbildung 31: Betrieb des Feuerungsmodells, 13 h mit Aufschwingen des Regelkreises .....	30