



WEGHAUS GMBH



Bericht

Einsatz eines Feuerungsmodells zum Klimaschutz durch Effizienzsteigerung und Emissionsminderung in Rostanlagen mit heterogenen Brennstoffen

Kurztitel:

Modell-Feuerungsregelung

- EU 22776 - Abschlussbericht -

Erstelldatum: 30.4.2012

Erstellt für: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Erstellt von: R. Warnecke; M. Weghaus; M. Zwiellehner; F. Dannerbeck

Bearbeitungszeitraum: 1.5.2009 - 30.4.2012

Investition in Ihre Zukunft

Dieses Projekt wurde von der Europäischen Union aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und vom Bayrischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit ko-finanziert.



WEGHAUS GMBH



Abkürzungsverzeichnis

Chemische Verbindungen

CaCl ₂	Calciumchlorid
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
HCl	Chlorwasserstoff
KCl	Kaliumchlorid
K ₃ Na(SO ₄) ₂	Trikaliumnatriumsulfat
NaCl	Natriumchlorid
PbCl ₂	Bleichlorid
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
ZnCl ₂	Zinkchlorid

Abkürzungen

APC	Advanced Process Control
APS	Aerodynamic Particle Sizer (aerodynamisches Partikelgrößenspektrometer)
AS	Automatisierungssystem
CFC	Continous Function Chart (Funktionsplaneditor des Prozessleitsystems)
CV	Regelgröße, Istwert
DB	Datenbaustein
ECO	Economiser (Speisewasservorwärmer)
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor (Elektro-Niederdruckimpaktor)
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie
FR,FLR	Feuerungsregelung, Feuerleistungsregelung
IR	Infrarot
Min	Minimum
Max	Maximum
MPC	Model Predictive Control
MV	Stellgröße, Steuergröße
MVA	Müllverbrennungsanlage, thermische Restabfallbehandlungsanlage
OB	Organisationsbaustein
OS	Operator-Station, Bedienstation
s.	siehe
s. o.	siehe oben
SCL	Structured Code Language (Programmiersprache innerhalb Prozessleitsystemen)
SP	Sollwert
ÜH	Überhitzer
vgl.	vergleiche

Z (Kessel-) Zug
z. B. zum Beispiel

Investition in Ihre Zukunft

Dieses Projekt wurde von der Europäischen Union aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit ko-finanziert.

Projektbeteiligte:

Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH
Hafenstraße 30 , 97424 Schweinfurt
Dr.-Ing. R. Warnecke, Tel.: +49 (9721) 6580-120

SAR Elektronik GmbH
Gobener Weg 31, 84130 Dingolfing
Dipl.-Ing. M. Zwiellehner, Tel.: +49 (8731) 704 - 132

Weghaus GmbH
Kirchstraße 11, 97297 Waldbüttelbrunn
Dipl.-Ing. (FH) M. Weghaus, Tel.: +49 (931) 2075064

Abstract

Der Betrieb von thermischen Anlagen mit heterogenen Brennstoffen (wie Müll, Ersatzbrennstoff oder Biomasse) hat sich als merklich diffiziler erwiesen, als mit homogenen Brennstoffen (wie Kohle, Öl oder Gas). Die zum Betrieb der Anlage erforderlichen Regelungen und Steuerungen müssen auf die stark variierenden Parameter abgestimmt sein. Mit modernen Regelungskonzepten kann komplexer in den Prozess eingegriffen werden. Das Konzept Modellprädiktiver Regler (MPC) erfordert ein mathematisches Modell des zu regelnden Prozesses. Ein kommerzieller Code wurde dazu an die Anlage des GKS angepasst und im Betrieb getestet. Parallel wurde mittels eines modellbasierten Regelkonzeptes (MBC) der bestehende PID-Regler ergänzt (PID-MBC) und ebenfalls in der Anlage optimiert. Um das modellbasierte Regelkonzept, das anders als der MPC auf einem physikalisch-chemischen Modell aufgebaut ist, zu optimieren, wurde das Modell in einigen Teilmodellen verbessert. Diese verbesserten Teilmodelle konnten durch Messungen und Validierungen in der Anlage gewonnen werden. Neben der Möglichkeit, Regelstrategien mit dem Modell zu testen und zu bewerten bietet das Modell auch die Möglichkeit zur Schulung und zum Erkenntnisgewinn hinsichtlich eines besseren Verständnisses der Feuerung.

Die Ergebnisse zeigten, dass der installierte PID-Regler gegenüber dem mathematisch basierten MPC-Regler gleichwertig war. Für die automatisierte Optimierung der Regelparameter konnte eine Parametrierungssoftware angepasst und erfolgreich getestet werden. Durch die Koppelung des PID-Reglers mit dem physiko-chemischen Modell konnte der PID-MBC-Regler in vielen Fällen Störungen im Betriebsablauf „vorhersehen“ und dadurch vermeiden. Somit war er sowohl dem MPC- als auch dem reinen PID-Regler überlegen. Allerdings konnten nicht alle Störungen, die durch äußere Störgrößen verursacht waren, vermieden werden. Dazu sind weitere Optimierungen des Modells sowie der Messtechnik erforderlich.

Insgesamt konnten merkliche Verbesserungen des Betriebes mit dem PID-MBC erreicht werden. Für einen kontinuierlichen Betrieb mit PID-MBC muss noch das MBC-Programm in der Programmstabilität (> 8.000 h/a) verbessert werden.

Schlagworte:

Abfallverbrennung; Feuerung; Regelungstechnik; Modellierung

Inhalt

Abstract	5
1 Einleitung	9
2 Aufgabenstellung und Arbeitsansatz	13
2.1 Aufgabenstellung	13
2.2 Arbeitsansatz	14
3 Stand des Wissens / der Technik	16
3.1 Modellierung von Feuerung und Kessel	16
3.1.1 Brennbettmodelle für die thermische Abfallbehandlung	17
3.1.2 Kesselmodellierung.....	27
3.2 Feuerungsregelungstechnik	28
3.2.1 Neuronale Netze	31
3.2.2 Fuzzy Logic.....	32
3.2.3 Softsensoren.....	34
3.2.4 MPC.....	34
3.2.5 TIAC-BOX.....	38
3.2.6 PID	39
3.2.7 Einsatz im Rahmen des Forschungsprojekts	45
4 Durchführung	46
4.1 Planung und Ablauf der Arbeiten.....	47
4.2 Kooperationen.....	48
4.3 Modell	48
4.3.1 Programmierung	49
4.3.2 Erweiterungen zum bestehenden Modell	51
4.3.3 Grundsätzliche Validierung des Modells	56
4.3.4 OPC-Ankopplung.....	65
4.4 Feuerungsregelung	70
4.4.1 Allgemeiner Aufbau.....	70

4.4.2	Regelgrößen	75
4.4.3	Stellgrößen	75
4.4.4	MPC.....	77
4.4.5	OPC-Modell-Kopplung und Vergleich mit Ist-Zustand bzw. MPC	128
4.4.6	Parametrierung, PID-Tuner.....	133
5	Ergebnisse und Diskussion	144
5.1	Modell	144
5.2	Feuerungsregelung	147
5.2.1	Ergebnisse von MPC	147
5.2.2	OPC-Modul-Kopplung.....	148
5.2.3	Ergebnisse von automatisierter PID-Parametrierung	148
6	Zusammenfassung	150
7	Literatur	153

1 Einleitung

Der Einsatz von heterogenen Brennstoffen wie Müll, Biomasse oder Ersatzbrennstoff kann durch Substitution fossiler Brennstoffen wie Kohle, Öl oder Gas den Ausstoß von CO₂ mindern helfen. Gegenüber Kohle (rund 95 tCO₂/TJ), Öl (rund 76 tCO₂/TJ) und Gas (rund 56 tCO₂/TJ) emittieren Müll (rund 36 tCO₂/TJ), Ersatzbrennstoff (rund 40 tCO₂/TJ) und Biomasse (0 tCO₂/TJ) deutlich weniger klimarelevantes CO₂. Damit ist es wichtig, dass Müll-, Biomasse- und Ersatzbrennstoffanlagen sicher, zuverlässig und effizient arbeiten. Allen Anlagen mit heterogenen Brennstoffen ist allerdings gemein, gegenüber z. B. Anlagen mit fossilen Brennstoffen, dass der heterogene Brennstoff zu besonders ungleichmäßigen Verbrennungszuständen führt. Diese wiederum beeinflussen das Freisetzen von emissions- und korrosions-relevanten Schadstoffen und können darüber hinaus zu Zuständen im Anlagenbetrieb führen, die einerseits erhöhte Schadstoffe freisetzen können (z. B. CO) und andererseits den Betrieb erschweren und in seiner Effizienz beeinträchtigen können (z. B. Überschüttungen auf dem Rost, Bypass-Zustände um die Abgasreinigung herum, Korrosionen im Kessel, Leistungseinbrüche). Insbesondere die Effizienzminderung führt zu erhöhten CO₂-Emissionen und damit zu einer Klimarelevanz, die durch das vorliegende Projekt positiv beeinflusst werden soll.

Die negativen Zustände können durch eine optimale Feuerungsregelung vermieden oder zumindest minimiert werden. Das wesentliche Problem für Feuerungsregelungen stellt die Unkenntnis des tatsächlichen aktuellen Heizwertes und Massenstromes in die Feuerung sowie des Brennstoffinventars auf dem Rost dar. Diese Größen können bisher nur ungenau bzw. nur als Mittelwert über einen großen Zeitraum (mehrere Stunden) ermittelt werden (Heizwert und Brennstoffmassenstrom) bzw. quasi gar nicht bestimmt werden (Brennstoffinventar auf dem Rost). Das vorliegende Projekt soll helfen, diese Zustände beim oder sogar schon vor dem Eintreten zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Grundsätzlich gibt es fünf regelungstechnische Konzepte:

- PID-Regler (ohne und mit Modell (PID-MBC))
- Fuzzy (FC)
- Neuronale Netze (NN)
- Modellprädiktive Regler („model predictive control“ = MPC)
- Modellbasierte Regler (“model base control” = MBC).

Von diesen Reglerkonzepten können lediglich PID-Regler mit Modell (PID-MBC) sowie Modellprädiktive Regler (MPC) den Einfluss nicht messbarer Größen (z. B. Brennbetthöhen) berücksichtigen, da nur diese auf Daten eingebundener Modelle, chemische-physikalisch bzw. mathematisch, zurückgreifen können.

In der Vergangenheit wurde von GKS ein Feuerungsmodell für Rostfeuerungen u.a. zur Verbesserung der PID-Regler entwickelt. Eine Kopplung dieses Modells mit der Feuerungsregelung kann zeitnahe Informationen über die genannten fehlenden Größen geben. Auch wurde bereits eine solche Kopplung via OPC-Schnittstelle realisiert und sogar schon mit der Feuerungsregelung einer realen Müllverbrennungsanlage (MVA) im GKS erprobt. Die Ergebnisse waren vielversprechend. So kann das Feuerungsmodell zum Parametrieren der Feuerungsregelung unabhängig vom Betrieb der Anlage genutzt werden sowie ferner zur Bestimmung fehlender Größen (z. B. Schichthöhe des Brennstoffbettes) im Betrieb herangezogen werden. Schwierigkeiten gab es jedoch einerseits damit, dass einzelne Teilmodelle noch nicht der notwendigen Präzision genühten und andererseits die Parametrierung der Feuerungsregelung für eine Optimierung bei der enormen Parameter Vielfalt noch aufwendig manuell durchgeführt werden muss. Somit ergibt sich zum einen noch Bedarf an der Optimierung einzelner Teilmodelle (beispielsweise die Berücksichtigung verschiedener möglicher Abfall-Aufabeeinrichtungen) und zum anderen noch an der Entwicklung von automatisierten Parametrierungsalgorithmen. Diese Defizite sollen und können in dem abgeschlossenen Projekt zu einem großen Anteil beseitigt werden. Dadurch können ungünstige Anlagenzustände vermieden werden, die beispielsweise zu erhöhten CO-Emissionen oder verminderter Leistung der Anlage führen. Somit kann ein Beitrag zur Minderung klimarelevanter Größen geleistet und der Klimaschutz unterstützt werden.

Ein Beispiel für eine Kopplung einer Feuerungsregelung mit einem Feuerungsmodell, dem ein automatisierter Parametrierungsalgorithmus aufgeschaltet werden kann, zeigt Abbildung 1.1.

Im Konzept des Modellprädiktiven-Reglers (MPC) ermittelt ein Rechner aus aufgeprägten Störgrößen bzw. Stellgrößen-Änderungen das Verhalten des Systems auf der Basis mathematischer Matrizen, ohne physikalisch-chemische Modellbildung. Demgegenüber ist die Basis eines Modellbasierten-Reglers (MBC) ein physikalisch-chemisches Modell. Diese beiden grundsätzlich geeigneten Regel-Konzepte werden im vorliegenden Projekt untersucht und auf ihre Eignung zur Optimierung von Feuerung und Kessel bewertet werden.

Die Bereitstellung der Erkenntnisse dieses Projektes für alle Betreiber und Hersteller kann somit einen positiven Beitrag über die Anbieter des Projektes hinaus sicherstellen, insbesondere deshalb, da GKS die Nutzung dieses Programmes kostenlos im Internet (www.gks-sw.de) zur Verfügung stellt.

Ziel ist es, eine Regelung zu finden, die zu einer Emissionsminderung und Effizienzsteigerung beiträgt und so dem Klimaschutz Rechnung trägt.

Dazu werden diese Konzepte an einer realen Anlage (GKS) eingesetzt und es wird untersucht, inwieweit sich diese Optimierung positiv auf die Effizienz der Anlage und die Verbesserung der Emissionssituation auswirkt. Darüber hinaus soll das Feuerungsmodell ein erweitertes Verständnis der Feuerung liefern. Insgesamt kann somit ein positiver Beitrag zur Minderung klimarelevanter Größen (CO-Minderung, CO₂-Reduzierung, Effizienzsteigerung) geleistet werden.

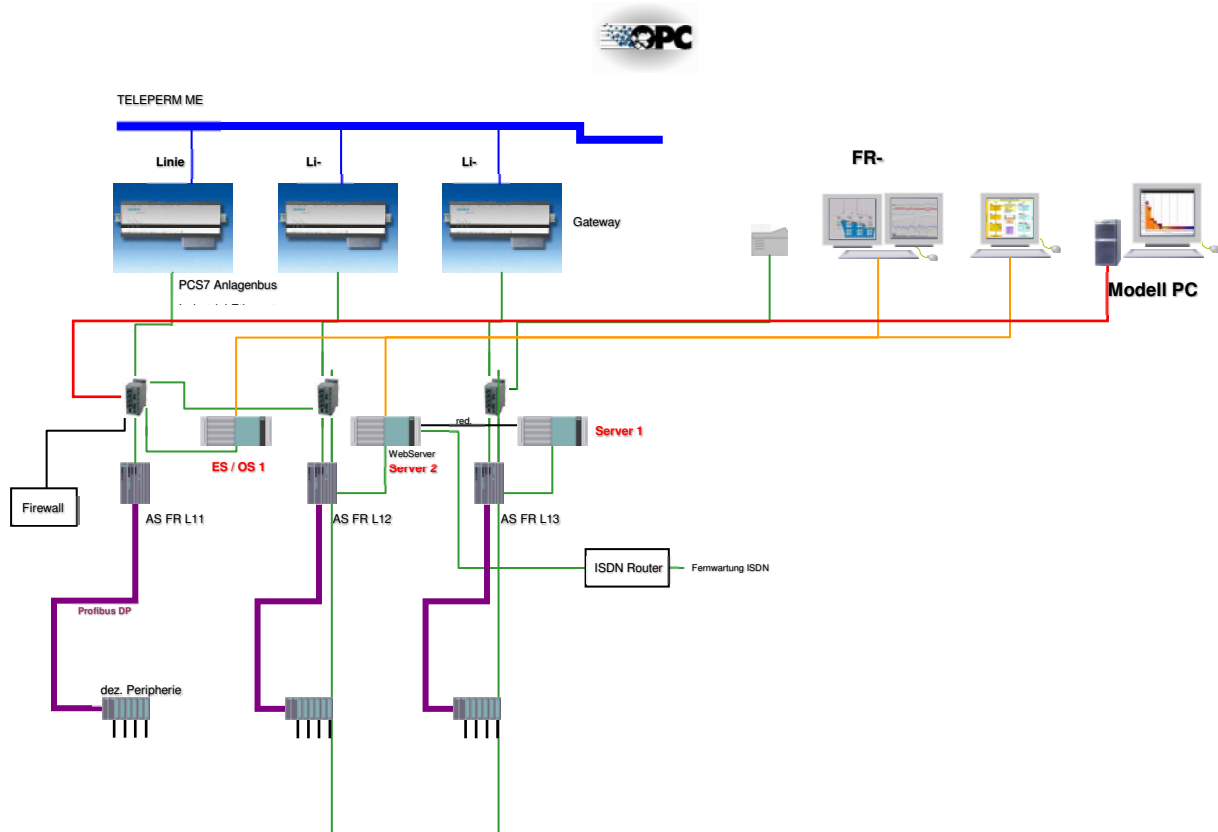


Abbildung 1.1: Kopplung der Feuerungsregelung mit dem Feuerungsmodell

2 Aufgabenstellung und Arbeitsansatz

Das Projekt hat zum Ziel in Anlagen zur Verbrennung von heterogenen Brennstoffen die Effizienz zu steigern und Emissionen zu mindern. Dazu soll einerseits ein Feuerungsmodell die Kenntnisse der Prozesse in der Feuerung offenlegen und andererseits eine Optimierung der Feuerungsregelung durch MPC und Integration des Feuerungsmodells in die Regelung als PID-MBC erreicht werden sowie beide Optionen verglichen werden.

2.1 Aufgabenstellung

Zum einen soll durch die Optimierung der Feuerungsregelung der ablaufende Prozess verbessert werden und zum anderen soll mehr Verständnis bezüglich des Prozesses durch das Feuerungsmodell gewonnen werden.

Die Regelungsoptimierung kann zu verschiedenen Verbesserungen an der Anlage und damit für Umwelt und Klima führen:

- Emissionsminderung (z. B. CO-Emissionen)
- Effizienzsteigerung (dadurch u.a. CO₂-Minderung und Leistungssteigerung)
- Schonung der Anlage.

Der Know-how-Gewinn aus dem Modell kann zur Personalschulung, aber auch zur Weiterentwicklung der Kenntnisse für Feuerung und Kessel verwendet werden.

2.2 Arbeitsansatz

Entsprechend der Ziele des Vorhabens ergeben sich 2 Schwerpunkte im Arbeitsprogramm:

1. Verbesserung des Feuerungsmodells
2. Optimierung der Feuerungsregelung
 - a. PID-Regler mit Modell-Kopplung (PID-MBC)
 - b. Modellprädiktiver Regler (MPC)

Zu 1.) Den ersten Arbeitsschritt der Integration des Modells stellte neben der Optimierung des Feuerungsmodells die Herstellung der vollumfänglich bidirektionalen Kopplung des Feuerungsmodells mit der Feuerungsregelung dar, denn die erwähnte Kopplung erfolgte bisher nur teilweise bidirektional. Bis dato waren zwar analoge und binäre Daten in beide Richtungen übertragen worden, aber eine vollumfängliche Einbindung der Modelldaten in die Feuerungsregelung - insbesondere die Übergabe der berechneten Istwerte des Modells - war noch nicht vorhanden.

Parallel zur Integration des Modells wurden die Verbesserungen am Feuerungsmodell vorgenommen und konzeptionell sowie anschließend mittels Software umgesetzt. Insbesondere zählen dazu die exakte Beschreibung des Wärmeübergangs im Partikel, der Wärmeübergang im Brennbett, die Optimierung der Flüchtigfreisetzung sowie die Integration von insgesamt 5 Partikelschichten statt der geplanten 3 Schichten. Um praxisnahe Ergebnisse des Modells zu erhalten ist es wichtig, die reale Anlage so gut wie möglich nachzubilden. Dazu gehört auch die Implementierung einer einfachen Dampfkesselnachbildung.

Das Design und die Entwicklung einer neuen graphischen Benutzeroberfläche werden im Rahmen der Optimierungen am Feuerungsmodell vorgenommen. Nachdem alle Programmierarbeiten das Modell betreffend abgeschlossen waren, wurden die neuen Funktionsweisen abschließend dokumentiert und ausführliche Testläufe zur Validierung und Fehlerbehebung durchgeführt.

Zu 2.) Der zweite und wesentliche Schwerpunkt des Vorhabens ist die Optimierung der Feuerungsregelung. Zunächst musste die Verbindung des Feuerungsmodells mit der Feuerungsregelung realisiert werden, d.h. das Modell generiert den Istwert für die Regler - vorzugsweise die berechnete Schichthöhe des Müllbettes. Der Regelkreis „Schichthöhe“ wurde daraufhin entworfen.

Erster Aspekt in diesem Schwerpunkt ist die Optimierung der PID-Regler mittels automatischer Parametrierungsroutinen und unterstützender Parametriersoftware.

Anschließend erfolgt die Implementierung und Einstellung eines modellprädiktiven Regelkreises (MPC) um einen aussagekräftigen Vergleich mit den schon vorhandenen PID-Regelkreis(en) ziehen zu können.

Damit der MPC anschließend sein mathematisches Prozessmodell berechnen kann, muss vorab ein Prozessabbild aufgenommen werden. Dieses Prozessabbild muss für eine definierte Stell-Regelgrößenkombination erstellt werden, die anschließend der MPC regeln soll. Dazu wurden mehrere Stell-Regelgrößenkombinationen integriert. Aus diesem Grund mussten diese Prozessabbilder öfter aufgenommen werden.

Das Umschalten der Stellgrößen von PID und MPC auf die Stellglieder in der Anlage (z. B. Rostgeschwindigkeiten, Verbrennungsluftmengen) war neben der softwaremäßigen Umsetzung der Erweiterungen am Feuerungsmodell zeitlich am längsten bemessen, da man sich Schritt für Schritt an die geeignete Gewichtung der Regelgrößen auf die jeweiligen Stellgrößen herantasten musste.

Da die Auswirkung einer geringen Änderung - prozessbedingt - oft erst nach mehreren Stunden sichtbar ist, nahm diese Phase sehr viel Zeit in Anspruch. Mittels der Auswertung der Versuchsfahrten wurde die grundsätzliche Wirksamkeit der modellbedingten Reglereingriffe nachgewiesen.

Abschließend wurde das Reglerverhalten von MPC- und PID-Regler miteinander verglichen. Hierzu wurde vorab die Phase der automatischen Parameteroptimierung der PID-Regler durchgeführt und abgeschlossen.

3 Stand des Wissens / der Technik

Der Stand des Wissens und der Technik ist in den beiden behandelten Bereichen Modellierung und Regelung stark unterschiedlich ausgeprägt. Während der Bereich der Regelung auf einer lange Entwicklungszeit aufbaut ist die Modellierung von Feuerung und Kessel eine relativ neue Disziplin.

3.1 Modellierung von Feuerung und Kessel

Seit vielen Jahren wird das Phänomen der Verbrennung von Festbrennstoffen untersucht. Erste Untersuchungen zu Zünd- und Verbrennungsverhalten bei Rostfeuerungen wurden bereits in den Jahren 1933-1935 durchgeführt, um Konzentrations- und Temperaturverlauf im Brennbett über dem Rost zu charakterisieren.

Trotz moderner Analysemethoden ist es noch nicht möglich, das Verhalten auf Rostsystem umfassend zu vermessen. Wegen der fehlenden wissenschaftlichen Grundlage werden mehr oder weniger komplexe empirische Modelle angewendet, die letztendlich zur Auslegung der Anlagen eingesetzt werden.

Es sind einige wissenschaftliche Aktivitäten bekannt, die mittels Labor- und Technikumsanlagen die Prozesse in Feuerungen für heterogene Brennstoffe untersuchen (z. B. KIT-Karlsruhe, Cutec-Clausthal, Uni. Duisburg-Essen). Ein auf Labor- oder Technikumsmaßstab verkleinerter Modellaufbau wie in [Wolff 2005] beschrieben, hat meistens das Problem, dass nur aufbereiteter Modellbrennstoff verwendet wird bzw. überhaupt verwendet werden kann. Auch aufgrund der bekannten Probleme der Maßstabsvergrößerung oder -verkleinerung von verfahrenstechnischen Anlagen ist der Modellaufbau nur dazu geeignet, um grundsätzliche Zusammenhänge z. B. zwischen Hublängen, Hubgeschwindigkeiten und der Verweilzeit des Brennstoffes auf dem Rost aufzuzeigen bzw. zu validieren. Die Ergebnisse solcher Versuche sind nur bedingt auf Großanlagen übertragbar. Aus diesen Aktivitäten ist bisher noch kein Feuerungsmodell entwickelt worden.

Eine weitere Möglichkeit der Modellierung ist es, Daten mittels zeitaufwändiger Versuche an Großanlagen zu gewinnen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich im Hinblick auf die Untersuchung z. B. des Transportverhaltens im Allgemeinen um Kaltversuche handelt, können diese also nur während der Revisionszeiten bei Stillstand der Anlage durchgeführt werden. Hier führen dann aber einerseits ökonomische Gesichtspunkte sowie auch gesetzliche Vorschriften dazu, dass solche Versuche sehr selten durchgeführt wurden.

Grundsätzlich kann ferner die direkte Simulation der physikalischen und chemischen Zusammenhänge entweder durch die Beschreibung mathematisch-stochastischer Zusammenhänge oder durch die numerische Simulation, z. B. mit der Diskreten-Elemente-Methode (DEM), mit der die Bewegung einer Großzahl von Teilchen berechnet werden kann, angegangen werden (z. B. Uni. Bochum, Uni. Luxemburg). Diese Methoden haben den Nachteil extrem langer Rechenzeiten. Außerdem ist die Validierung der Berechnungen sehr schwierig, da insbesondere Zeiteffekte einer realen Feuerung auf Grund der extrem langen Rechenzeiten nicht berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund gibt es noch keine belastbaren Ergebnisse aus diesen Berechnungen.

Physikalisch-chemische Globalmodelle wurden an den Universitäten Sheffield („Flic“), Bochum, Duisburg-Essen, Stuttgart und bei TNO, Delft, entwickelt. Alle Modelle haben große Rechenzeiten und können nicht in Echtzeit benutzt werden. Zudem sind die Validierungen jeweils an Labor- und Technikumsanlagen vorgenommen und nur mit Einzelergebnissen in Großanlagen verglichen worden.

Von Warnecke u.a. wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Weghaus ein physikalisch-chemisches Modell entwickelt, das ausführlich an der realen Großanlage des GKS validiert werden konnte. Der Vorteil des Modells gegenüber anderen Ansätzen ist seine sehr hohe Rechengeschwindigkeit, die es ermöglicht, in Echtzeit, d.h. mit gleicher Reaktionsgeschwindigkeit wie der reale Prozess bzw. sogar bis zu 100-fach schneller als Echtzeit zu simulieren und weist damit ein Alleinstellungsmerkmal auf.

3.1.1 Brennbettmodelle für die thermische Abfallbehandlung

In den letzten Jahren wurden mathematische Modelle entwickelt, die Temperatur-, Strömungs- und Konzentrationsfelder betrachten und analysieren sowie physikalische und chemische Vorgänge mit Hilfe von Gleichungssystemen beschreiben. Die sich ergebenden Gleichungen werden dabei durch numerische Berechnungsmethoden gelöst.

Da dem Brennbettmodell eine wichtige Rolle bei der Strömungssimulation von Abfallverbrennungsanlagen zukommt, werden im Folgenden einige mehr oder weniger effiziente Modelle näher erläutert.

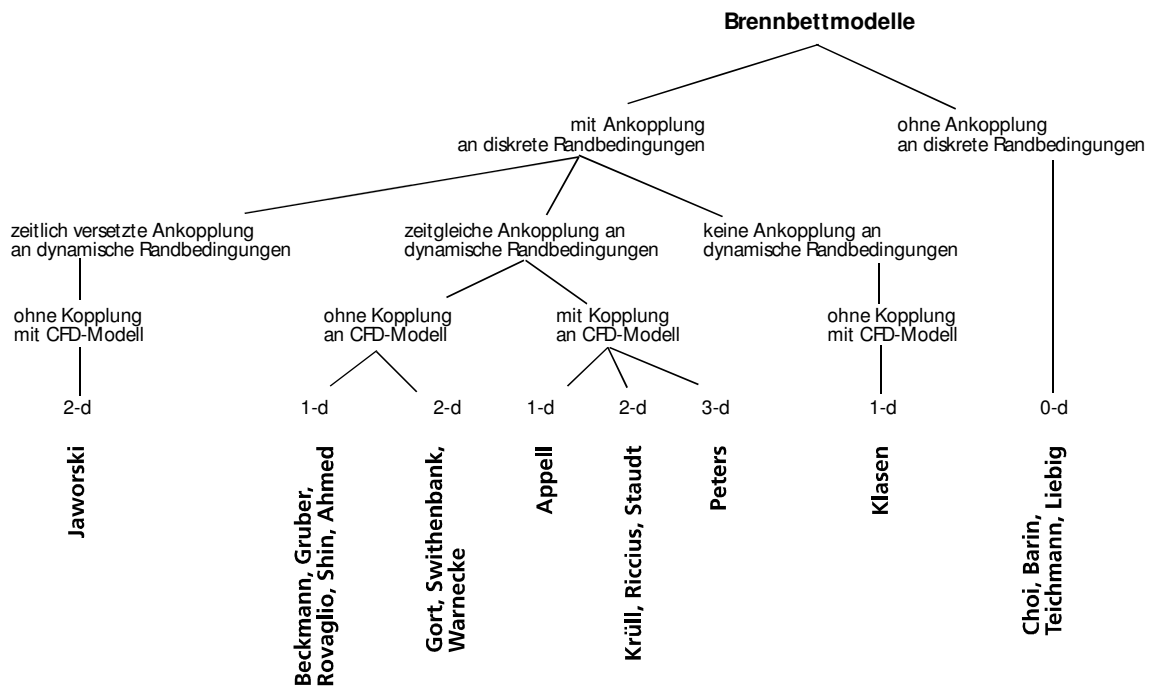


Abbildung 3.1: Zuordnung bekannter Modellvorstellungen [Wolf 2005]

Die Darstellung in Abbildung 3.1 nach [Wolf 2005] strukturiert die aktuell verfügbaren Brennbettmodelle nach Detaillierungsstufe, Randbedingungen und Dimensionalität.

In der ersten Strukturebene wird unterschieden, ob die Modelle Randbedingungen wie z. B. Luftverteilung oder Abfallzusammensetzung berücksichtigen können. Können die Modelle diesen ersten wesentlichen Punkt nicht erfüllen, ist der praktische Einsatz kaum gegeben. Die nächste Ebene gliedert entsprechend der Möglichkeiten der Modelle hinsichtlich „dynamischen Randbedingungen“. Einzelne Ansätze weisen dabei eine direkte Verknüpfung zu den technischen Randbedingungen auf, andere Ansätze sind nicht an die diskreten Randbedingungen angekopelt.

Die Interaktion von Brennbett und der überströmenden Gasphase beeinflusst das Verhalten im Brennbett. Diese Unterscheidung wird in der 3. Strukturebene getroffen.

Eine weitere Unterteilung wird nach ihrer Dimensionalität vorgenommen:

- 0-dimensionale Modelle:
Pauschal-Modelle auf der Basis von abgeschätzten/berechneten konstanten Temperaturen und Konzentrationen oder auf der Basis von vorgegebenen pauschalen Messwerten über die Zusammensetzung des Gesamtbrennstoffes
- 1-dimensionale Modelle (viele Firmen und Institute):
Erzeugung von voneinander weitgehend unabhängigen Teil-Profilen in Abfalltransportrichtung auf der Basis von singulären Betrachtungen (z. B. Verweilzeitverhalten)
- 2-dimensionale Modelle:
Erzeugung voneinander abhängiger Profile in Abfalltransport-/Reaktionsrichtung sowie normal dazu (also der Brennbetthöhe), wobei die unterschiedlichsten Vorgänge (z. B. Wärmeübergang, Transport, Verweilzeitverhalten) auf dem Transportweg komplex miteinander gekoppelt sind
- 3-dimensionale Modelle (extrem hoher Rechenaufwand)
wie 2-dimensionale Modelle, wobei jedoch Profile in Abfalltransport-/Reaktionsrichtung, über der Brennbetthöhe und der Rostbreite, die durch asymmetrische Belegung hervorgerufen werden können, modelliert werden.

Als **0-dimensionales Modell** ohne Ankopplung an diskrete Randbedingungen ging BARIN von der Annahme aus, dass sich ein thermodynamisches Gleichgewicht bei den Vorgängen im Feuerraum für die Gesamtheit des Brennstoffes einstellt. Mit einem Berechnungsprogramm für die Speziesverteilungen für Gas- und Aschephase stellt sich jedoch heraus, dass sich aufgrund kurzzeitiger Kontakt- und Reaktionszeiten bei gemäßigten Temperaturen kein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt. Dieser Ansatz bietet jedoch eine Möglichkeit mittels thermodynamischer Berechnungen die Schadstofffreisetzung und die Asche-Gastransferprozesse grob abzuschätzen. Allerdings werden keinerlei Informationen über die Dynamik des Brennbettes berücksichtigt bzw. gewonnen. Gleiches gilt für die Ansätze von CHOI, TEICHMANN bzw. LIEBIG. Ebenso sind einfache Verbrennungsrechnungen (z. B. stöchiometrische Verbrennungsrechnung nach Baehr) unter diesem Modelltyp zu fassen.

Bei dem **1-dimensionalen Brennbettmodell** (Abbildung 3.2) von z. B. KLASSEN können diskrete Randbedingungen mit einbezogen werden, allerdings wird dabei eine Rückkopplung nicht berücksichtigt. Seine Modellvorstellung basiert auf einer integralen Berechnung bestimmter Spezies- und Temperaturprofile, die auf der Basis von erwarteten Wärmefreisetzungsprofilen und angenommenen Verteilungen der Hauptkomponenten C und H auf die entstehende Gasspezies beruhen.

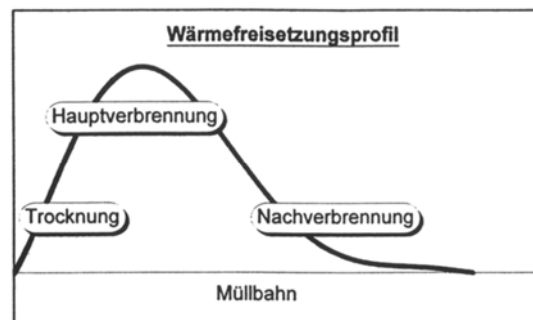


Abbildung 3.2: Wärmefreisetzungsprofil nach KLASSEN

Als ein Modell mit zeitversetzter Ankopplung an dynamische Randbedingungen gilt das von JAWORSKI und WANDRASZ. Sie unterteilen das Brennbett, die Wände und die Brennkammer in einzelne Zellen (Abbildung 3.3). Um den Strömungszustand und den Wärmetransport in den einzelnen Zellen zu ermitteln, werden Gleichungen aufgestellt und gelöst. Bei diesem Modell wird zwischen der Gasphase und der festen Phase unterschieden. Bei dieser Strategie werden einige Parameter wie Bettgestalt, Zellenhöhe und Temperatur abschnittsweise konstant gehalten, womit erreicht wird, dass sich die Stabilität des Berechnungsverfahrens erhöht und die Berechnungszeit gering gehalten wird. Die Temperatur des Brennbetts wird beispielsweise nicht permanent neu berechnet, sondern nach einigen Berechnungsschritten überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

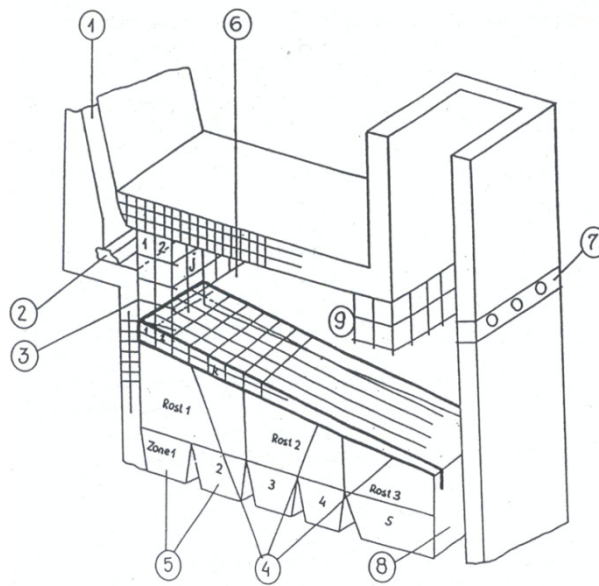


Abbildung 3.3: Diskretisierung der Brennkammer nach Jaworski

AHMED entwickelte ein Modell (Abbildung 3.4) bei dem die zeitgleiche Ankopplung an dynamische Randbedingungen im Vordergrund steht. Dies bildet den Prozess der Pyrolyse auf dem Rost ab. Bei dieser Strategie sollen Brennbettlängen, Temperaturprofile und Umsatzgrade bei wechselnden Luft- und Abfallmengen vorhergesagt werden.

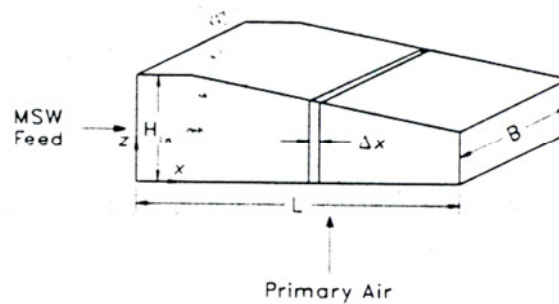


Abbildung 3.4: Diskretisierung des Brennbetts nach AHMED

BECKMANN und GRUBER legten Wert auf die Reaktormodellierung, die das Verweilzeitverhalten eines Rostsystems anhand einer Kaskadenschaltung aus idealen Reaktoren (Rührkesseln) abbilden.

BECKMANN legte sein Modell so aus, dass der Feuerraum und die Abfallschüttung in verschiedene Zonen unterteilt werden, die sich an einzelnen Primärluftzonen orientieren. Um einen diskontinuierlichen idealen Rührkessel zu erreichen, wird jeder Zone ein Rührkessel-element zugeordnet. Dabei bemisst sich die Reaktionszeit nach der Rostgeschwindigkeit. Es werden keine praxisbezogenen Transportgrößen, wie z. B. Roststab-Doppelhöhe, einbezogen. Der Ausbrand des festen Kohlenstoffs wird über eine messtechnisch entwickelte Kinetik-Gleichung berücksichtigt.

GRUBER wählte mit seinem Modell einen Ansatz, um den Rost mit Wanderbettcharakteristik abzubilden. Dabei werden die Reaktorelemente als kontinuierliche ideale Reaktoren angesehen. Gleichzeitig werden auch hier die Zonen der Verbrennungsanlage in unterschiedliche Primärluftzonen eingeteilt. Neben der horizontalen Einteilung erfolgt aber auch eine vertikale Einteilung, um zwischen der Feststoff- und der darüber liegenden Gasphase unterscheiden zu können. GRUBER arbeitet mit dieser Technik, da die vertikale Zweiteilung der Reaktorelemente (Rührkessel) und damit die Zuführung der so genannten Plattenluft, die von der Feuerraumseite einströmt, besser abbilden zu können.

GRUBERs Modellvorstellung wurde an einer thermischen Abfallbehandlungsanlage validiert und als geeignet bewertet, um das Prozessverständnis zu erhöhen und die Auslegung zu unterstützen.

ROVAGLIOs et al. Modellvorstellung (Abbildung 3.5) gleicht dem Rührkessel-Kaskaden-Modell, da sie ebenfalls eine Reaktoreinteilung mit kontinuierlichen idealen Rührkesseln vornimmt.

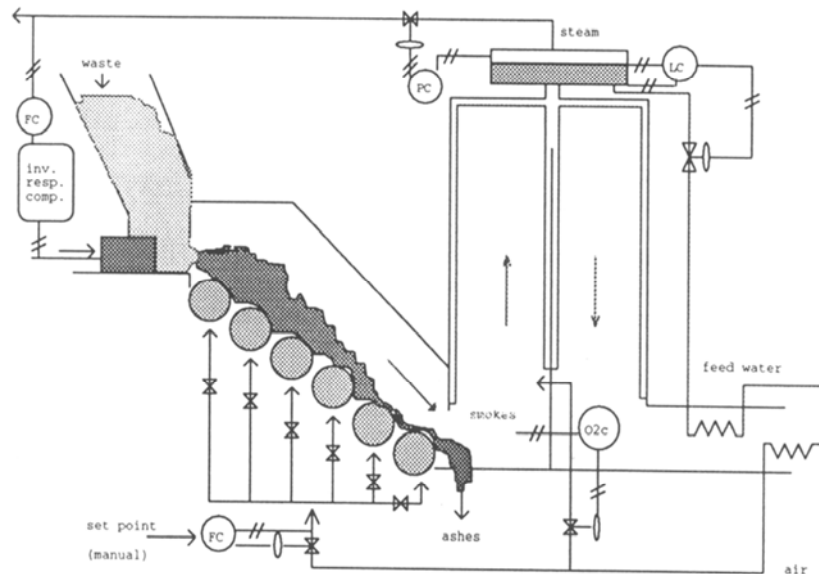


Abbildung 3.5: Modellkonzept nach ROVAGLIO et al.

Auch diese Modellvorstellung orientiert sich in der geometrischen Darstellung an den Primärluftzonen. Um einen Regelkompensator zu entwickeln, wird ein Modell für den Wärmeübergang im Kessel erstellt. Der Kompensator soll im regulären Betrieb die Aufgabe übernehmen, die beobachtete Totzeit bzw. die gegenläufige Reaktion zwischen Brennstoffmassenstrom und Dampfproduktion auszuregeln.

Beispiele für **2-dimensionale Modellierungen** liefern SWITHENBANK, KRÜLL; WARNECKE und andere.

Um speziell für CFD- Simulationen mit FLUENT geeignete Randbedingungen generieren zu können entwickelten SWITHENBANK et al. das Modell FLIC. Bei ihrer Modellvorstellung wird das Abfallbett feiner diskretisiert. Neben den Erhaltungsgleichungen für die durch das Abfallbett strömende Gasphase (Masse, Elemente, Enthalpie etc.) werden auch Gleichungen für die feste Phase (Impuls, Kontinuität, Spezies etc.) aufgestellt und gleichzeitig gelöst. Den detaillierten Erhaltungsgleichungen stehen bei der Modellvorstellung zahlreiche Vereinfachungen auf der Reaktionsseite gegenüber. Beispielsweise sind Vergasungsreaktionen auf eine einfachere Oxidation mit empirisch ermittelter CO/CO_2 - Verteilung reduziert worden.

Die Modellansätze von APPEL-WARNECKE (eine Vorläuferversion des heutigen CombAte-Programms von WARNECKE) ist ähnlich den 2-dimensionalen Vorstellungen einer Rührkessel-Kaskade. Dabei können die aufgestellten Erhaltungsgleichungen jedoch im CFD-Modell gelöst werden, wobei der gekoppelte Wärme- und Stoffaustausch berücksichtigt wird, um den realen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen. Durch die Berechnung von Differentialgleichungen kann das Programm bzgl. der Rechenzeit keine Echtzeit erreichen. Diese Modellvorstellung (Abbildung 3.6) beruht auf einer Rührkesselkaskade als Reaktormodell, bei dem die einzelnen Zellen jeweils den Abmessungen einer Primärluftzone entsprechen. Im Modell werden die Rückvermischungsfaktoren über die Vermischungs- und Verweilzeiten eingestellt.

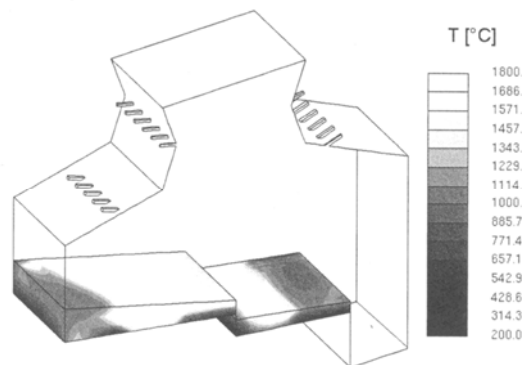


Abbildung 3.6: Reaktormodell nach APPEL-WARNECKE

Allerdings sind die Beschreibungen der Reaktionen von APPEL-WARNECKE als wenig detailliert einzustufen, da teilweise vereinfachte Zusammenhänge ausgewählt werden.

Ebenfalls wie bei APPEL-WARNECKE ist auch die Modellvorstellung von STAUDT als gering detailliert einzustufen. Er legt seinem Modellansatz (Abbildung 3.7) nur dominierende Phänomene (Vermischung, Reaktion) zu Grunde, welche bei folgenden Modellen verfeinert werden können.

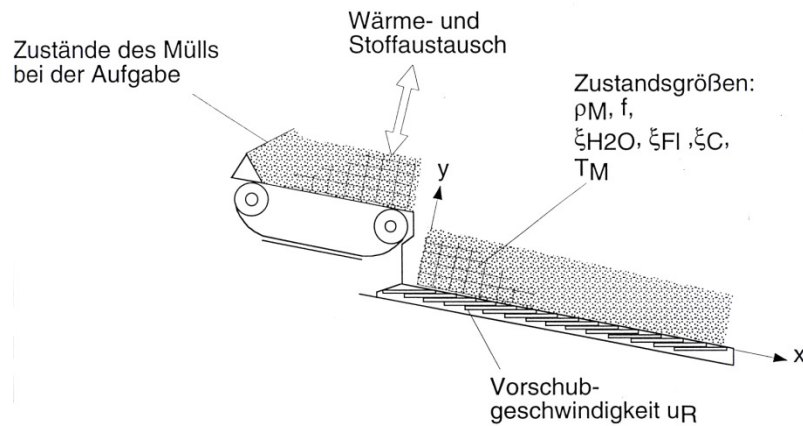


Abbildung 3.7: Reaktordiskretisierung und -bilanzierung nach STAUDT

RICCIUS greift die Modellvorstellung von STAUDT auf, wobei er jedoch den Feststoffreaktionen eine größere Bedeutung zukommen lässt. In seinem Ansatz integriert er das Vermischungsverhalten nicht, berücksichtigt jedoch das Verweilzeitverhalten vereinfacht durch rostspezifisch vorzugebende Partikelgeschwindigkeiten.

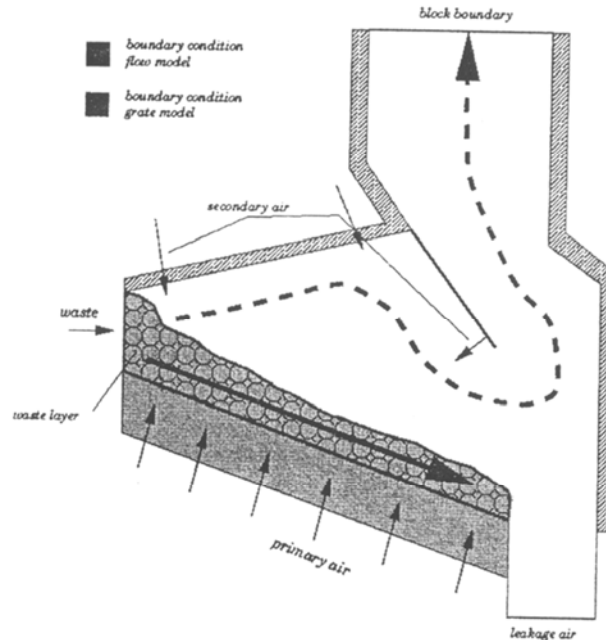


Abbildung 3.8: Reaktoreinteilung nach KRÜLL

Neben RICCIUS und STAUDT modelliert KRÜLL (Abbildung 3.8) ebenfalls zweidimensional. Er berücksichtigt in seinem Ansatz jedoch zwei in vertikaler Richtung übereinander liegende Feststoffschichten, die einem Wärme- und Stoffaustausch unterliegen. Obwohl das Verweilzeitverhalten nur abgeschätzt werden kann, werden in seiner Modellvorstellung dennoch die dominierenden Einflussfaktoren eingebunden.

Bei den neueren Entwicklungen der Arbeitsgruppe um WARNECKE et al. wird weiterhin ebenfalls am Modellansatz eines Kaskaden-Rührkessels festgehalten. Um hohe Rechengeschwindigkeiten zu realisieren, wurde auf die Lösung von Differenzgleichungen umgestellt. Da die Vorgänge im Brennbett vergleichsweise langsam sind, führt diese Art der Berechnung bei kleinen Berechnungs-Zeitschritten zu infinitesimal kleinen Ungenauigkeiten, die die Aussage des Modells nicht nennenswert beeinflussen (siehe dazu Kapitel 5.1).

Die neuesten Entwicklungen laufen als **3-dimensionale Modellierungen**, die erst durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit der Computer möglich wurde.

PETERS (Abbildung 3.9) modelliert dreidimensional, womit seine Berechnungsansätze vergleichsweise umfangreich sind. Obwohl die Vorgänge in den Poren der Einzelpartikel beschrieben werden können, ist das Modell jedoch sehr abhängig von der Verfügbarkeit an belasteten Parametern zur Beschreibung der Reaktionskinetik und des Wärmetransports in der Abfallschüttung.

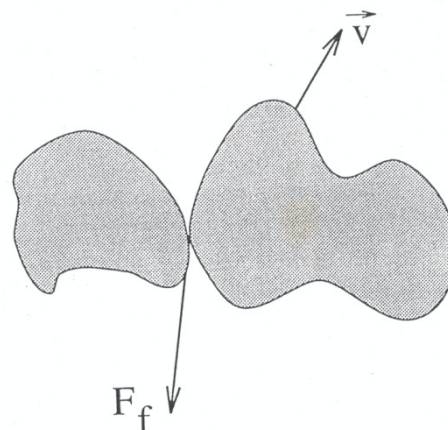


Abbildung 3.9: Kräftebilanzen am Einzelpartikel nach PETERS

Für die Gas- und die feste Phase werden die einzelnen Bilanzen für Massen-, Spezies- und Energieerhaltung jeweils gekoppelt gelöst. Um das Temperatur- und Konzentrationsprofil in Abhängigkeit von der Zeit- und dem Partikelradius zu ermitteln werden für die Kräftebilanzen an Einzelpartikeln Bewegungsgleichungen aufgestellt und gelöst. Somit kann das Schürungsverhalten verschiedener Rostsysteme dargestellt werden.

Aktuell wird auch von WIRTZ et. al. eine 3-dimensionale Modellierung vorgenommen. Ähnlich der Vorgehensweise von Peters wird dort mittels Diskret-Element-Methode (DEM) das Verhalten einzelner Partikel beschreiben. Dabei werden etwa 1 Mio. Partikel über einen Rost bewegt, wobei die Bewegungen direkt durch die Kräfte der Roststabbewegung und der Gravitation übertragen werden. Es werden Teilmodelle integriert, die das Verhalten des Brennstoffes beschreiben sollen. Nachteil ist, wie auch beim Modell von Peters, dass die Rechenzeiten weit davon entfernt sind Echtzeit zu erreichen.

Auch das Modell von WARNECKE kann als 3-dimensionale Modellierung laufen und so die Anisotropien des Brennbetts bzw. der Aufgabe berücksichtigen. Dabei verliert das Modell jedoch gegenüber der 2-dimensionalen Berechnung die Möglichkeit zur Echtzeit-Simulation.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bisher lediglich das 2D-Modell von WARNECKE et. al. (sog. „CombAte“-Programm) die Anforderung an Echtzeitsimulation und praxisnahen Ergebnissen erfüllt.

3.1.2 Kesselmodellierung

Hinsichtlich der Modellierung des an die Feuerung anschließenden Kessels gibt es eine Vielzahl an Insellösungen, die Kesselbauer wie Babcock, Alstom oder Steinmüller im eigenen Haus entwickeln und pflegen.

Als kommerziell verfügbares Modell ist insbesondere das KED-Kesselmodul zu nennen, mit dem detailliert Kessel mit Wärmetauschern und Verrohrung abgebildet werden.

Außerdem sind Energiebilanzierungsmodelle wie GateCycle, Epsilon u.a. grundsätzlich auch geeignet, um Kesselsimulationen durchzuführen.

Alle diese genannten Programme werden wir hier in Verbindung mit einem detaillierten Brennbettmodell nicht nutzen können, sondern werden auf der Basis der Energie- und Massenbilanzen noch eine eigene Lösung entwickeln müssen.

3.2 Feuerungsregelungstechnik

Abfall als Brennstoff unterscheidet sich ganz wesentlich von anderen eingesetzten Brennmaterialien wie beispielsweise Steinkohle oder Erdgas. Abfall ist in der Zusammensetzung stets heterogen und besteht aus pulverförmigen, pastösen, körnigen, stückigen, sperrigen, dünnen und dickeren Einzelstücken. Diese wiederum können sein:

- locker oder fest gepresst
- trocken oder getränkt mit Wasser oder brennbaren Flüssigkeiten und damit
- schwer oder leicht entzündlich,
- heizwertreich, heizwertarm oder nicht brennbar

Die hohen technischen Forderungen an die thermische Abfallbehandlung sowie die strengen Auflagen bezüglich Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen sowie die heute praktikierbare Datenerfassung und Auswertung mittels moderner Informationstechnologie ermöglichen bzw. bedingen die Automatisierung der thermischen Abfallbehandlung [Reimann 1991]. 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 umweltschonende 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 in diesem Zusammenhang 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.

Grundsätzlich lässt sich eine FLR schulbuchmäßig beschreiben als ein geschlossener Regelkreis mit Sollwertvorgabe, Soll-/Istwertvergleich, Regeleinrichtung (= „Intelligenz“) mit Stellgrößenbildung, Störgrößenaufschaltung und Istwerterfassung mit Rückführung (

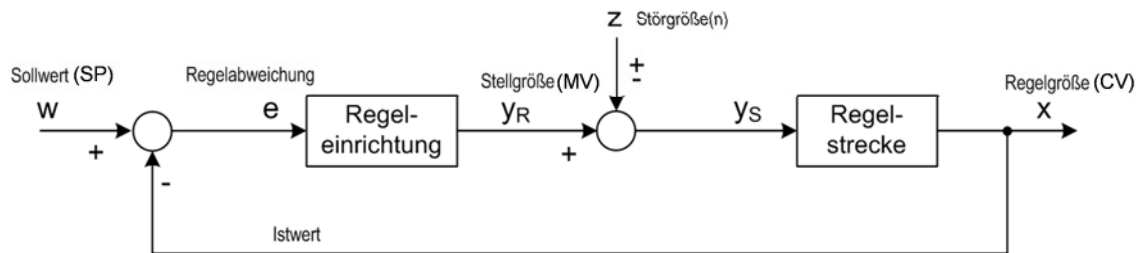


Abbildung 3.10). Je nach Komplexität der aufgebauten Regelung und je nach vorhandener Anlagentechnik kann die Anzahl von Regelkreisen variieren.

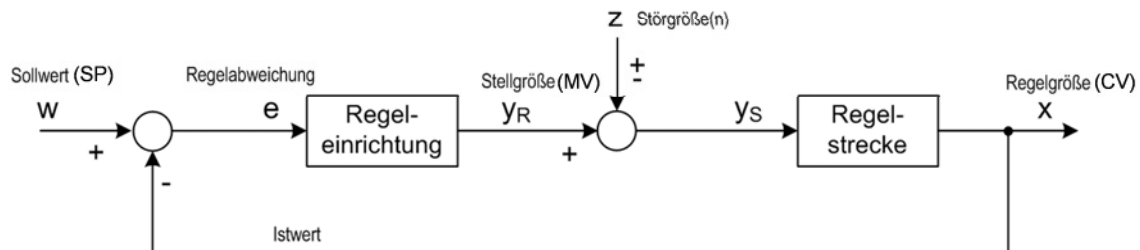


Abbildung 3.10: Allgemeiner Regelkreis

Selbst durch sorgfältiges Mischen des Mülls im Bunker, kann in der Praxis kein annähernd homogenes Brennstoffgemisch erreicht werden [Kozmiensky 1991]. Dies wird insofern erschwert, weil die Müllzusammensetzung auch im zeitlichen Verlauf differiert und die Dauer der Mülllagerung, die Zündfähigkeit und den Heizwert des Mülls verändert. Nach diesen Ausführungen wird deutlich, dass der Prozess der Feuerung eine sehr schwierig zu beherrschende Regelstrecke ist. Eine weitere Herausforderung für die einzusetzende FLR in Müllverbrennungsanlagen, stellen die auftretenden Totzeiten dar. Damit ist es beispielsweise nicht möglich, mit einem Prozesseingriff unmittelbar einer veränderten Müllzusammensetzung entgegenzuwirken.

All diese Punkte machen deutlich, welche Ansprüche an eine moderne Feuerleistungsregelung gestellt werden. Grundsätzlich werden derzeit 4 Basis-Regelungskonzepte verfolgt:

1. PID
2. Fuzzy
3. MPC
4. Neuronale Netze.

Dabei kann jedes dieser Systeme in dem Kasten „Regeleinrichtung“ in

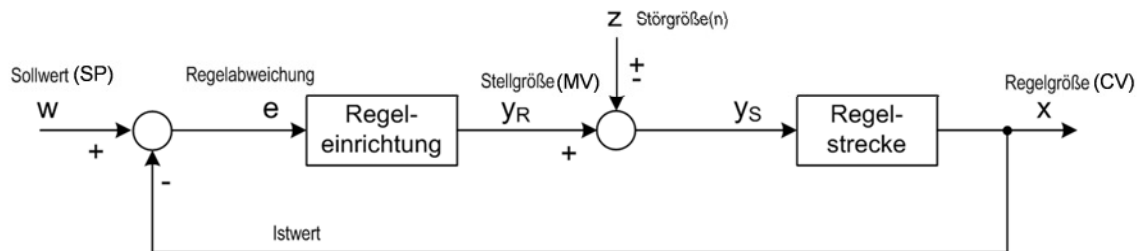


Abbildung 3.10 stehen. Teilweise können in realen Regelungskonzepten diese Basis-Konzepte verknüpft sein und mit zusätzlichen modernen Techniken zu Advanced Process Control-Konzepten (APC) vereint sein. Diese APC-Konzepte sollen im Folgenden weiter ausgeführt werden.

Zum Stand der Technik zählen heute in der Industrie vor allem PID-Regelungskonzepte. Da die Ansprüche an Regelungssysteme - bedingt durch steigende wirtschaftliche und ökologische Anforderungen ständig steigen - wird zunehmend nach neuen Technologien und Strategien geforscht. Die dabei „neu“ entstandenen Regelungskonzepte werden heute unter dem Begriff „Advanced Process Control“ (= APC) zusammengefasst.

Gegenüber der konventionellen Regelungstechnik hat sich in den letzten Jahren das „Advanced Process Control“-Konzept durchgesetzt. Der inzwischen in der Prozessindustrie eingebürgerte Begriff „Advanced Process Control“ wird im deutschen Sprachraum mit den Begriffen „gehobene Methoden der Prozessführung“ oder genauer „gehobene Regelungsverfahren“ übersetzt.

Unter „Advanced Process Control (APC)“ ist eine auf die Verbesserung der Prozessführung gerichtete Vorgehensweise zu verstehen, die Elemente aus verschiedenen Teilgebieten der Regelungs- und Automatisierungstechnik, Mathematik, Physik und Informatik wie z. B.:

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

nutzt und integriert, und damit über standardmäßige PID-Regelungen und Ablaufsteuerungen hinausgeht. Eine Übersicht über die unterschiedlichen APC-Konzepte zeigt Abbildung 3.11.

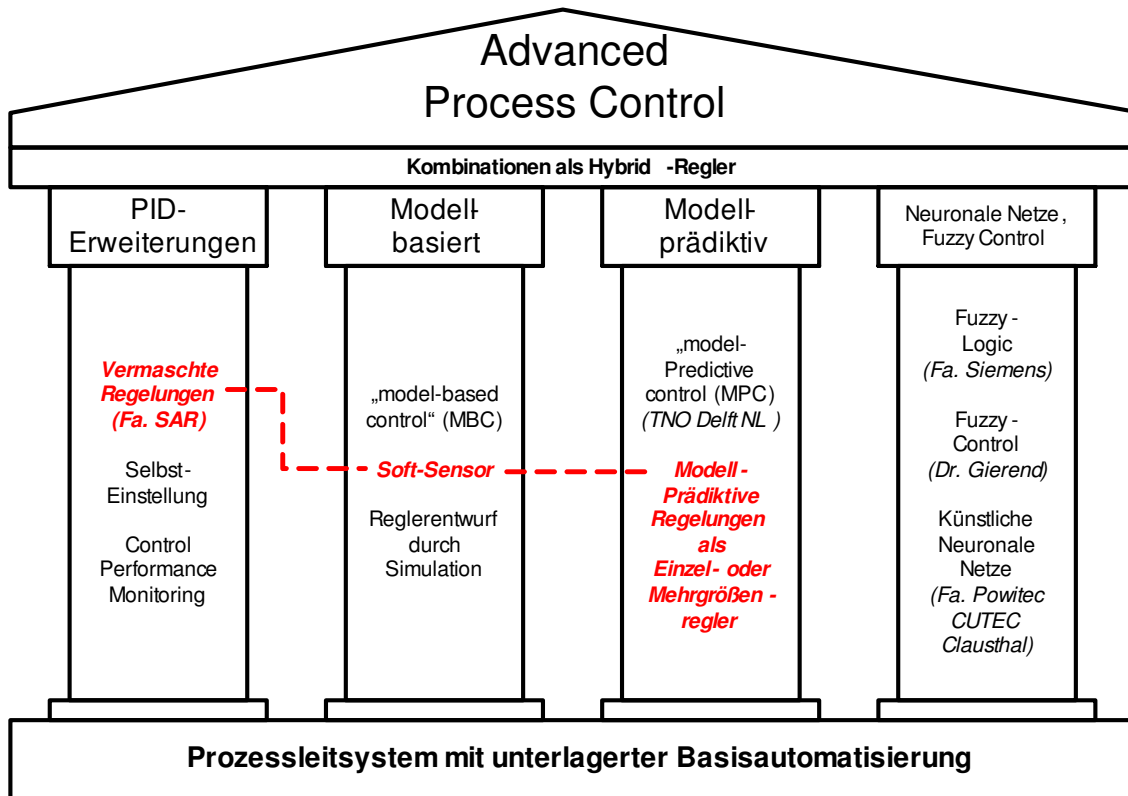


Abbildung 3.11: Übersicht über die wichtigsten Werkzeuge für APC

Im Folgenden sollen verschiedene Regelungskonzepte kurz beschrieben und insbesondere auf die Methoden näher eingegangen werden, die beim vorliegenden Projektentwurf verwendet werden sollen - siehe dazu auch die rote Markierungslinie in obiger Abbildung 3.11.

3.2.1 Neuronale Netze

Bei *Künstlichen Neuronalen Netzen* (KNN) handelt es sich um Systeme, die in der Lage sind auf Grundlage von bestehenden Messdaten das Übertragungsverhalten der Regelstrecke zu „erlernen“. Das Prozessmodell wird dabei aus vorhandenen Daten gewonnen, die als Lernmuster für die zu konditionierenden Neuronalen Netze dienen. An Hand dieser Lernmuster evaluieren Neuronale Netze, bedingt durch ihre Lernvorgaben, selbständig eine Klassifikations- und Identifikationsverhalten, welches zum Regeln und Steuern verwendet werden kann.

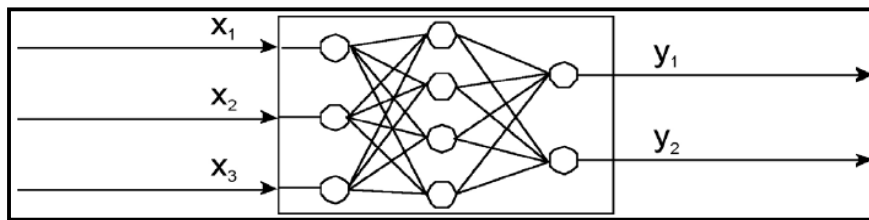


Abbildung 3.12: Übertragungsfunktion eines künstlichen neuronalen Netzes

Selbstlernende Systeme, wie die KNN, haben inzwischen einen Entwicklungsstand erreicht, der sie für alle Regelungs- und Steuerungsaufgaben prädestiniert, in denen nicht alle Parameter, die ein zu steuerndes und zu regelndes System beschreiben, bekannt und / oder messbar sind. Bedingt durch ihre Struktur vollziehen die Neuronale Netze in ihrer Lernphase selbständig ein sog. Data Mining - durchsuchen also einen großen Datenbestand mit dem Ziel einer Mustererkennung. In der Literatur sind einige Anwendungen von Neuronale Netzen auf die Feuerungsregelung von Müllverbrennungsanlagen angegeben - siehe dazu [Keller 1994] und [Keller 1998]. Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass bei vielen Untersuchungen die Feuerungsregelung um eine Infrarotkamera erweitert und die Neuronale Netze zur Auswertung der dadurch gewonnen Bildinformation benutzt wurden. Zusammenfassend kann man feststellen, dass Neuronale Netze in manchen Anwendungsgebieten (z. B. Fertigungstechnik) bereits als Stand der Technik betrachtet werden können, im Bereich der Feuerleistungsregelung jedoch noch umfangreicher Forschungsbedarf besteht um einen industriellen Einsatz zu ermöglichen. Ein Grund für die teilweise mangelhafte Regelgüte in MVA ist das Vorhandensein von nicht definierten Quelltermen, wie z. B. der großen Menge an Abfall, der noch unverbrannt oder teilverbrannt auf dem Rost liegt und ein kaum mit neuronalen Systemen vorhersagbares Verhalten verursachen kann.

Tätigkeiten im Bereich thermischer Abfallverwertung und neuronalen Netzen sind von der Firma Powitec mit Sitz in Essen bekannt. Die von Powitec entwickelte Regelung ist z. B. in der MVA Bonn und partiell in der MVA Coburg eingesetzt. Die Regelung nennt sich PiT Navigator. Ebenso kommt dieses Konzept von Powitec in Zementwerken, Kohlekraftwerken und Drehrohröfen zum Einsatz. Derzeit kann noch nicht davon gesprochen werden, dass dieses System vollständig am Markt etabliert ist.

3.2.2 Fuzzy Logic

Bereits seit längerem in industrietauglichem Standard verfügbar ist die so genannte „Fuzzy Logic“, die auch in die Feuerleistungsregelung von MVA Einzug gehalten hat - siehe dazu [Gierend 2000a,b]. Die Wurzeln der Fuzzy Logic reichen zurück bis in die griechische Antike, wo bereits der Philosoph Platon vermutete, dass zwischen den Begriffen „wahr“ und „falsch“ ein dritter Bereich liege. Die bei Fuzzy-Systemen verfolgte Strategie ist es, vage und unvoll-

ständige Informationen trotzdem verarbeiten zu können. Besonders oft wird in der Fuzzy-Logic mit der sprachlichen Unschärfe von Wörtern wie „warm“, „heiß“, „kalt“ etc. umgegangen. Dies kommt dem Menschen oft entgegen, da es mit Fuzzy Logic quasi direkt möglich ist, Erfahrungen, die man mit Worten beschreiben kann, ohne aufwendige mathematische Modellierung nutzbar zu machen. Das Modell wird also aus dem Wissen des Betriebspersonals gewonnen. Dazu werden die charakteristischen, den Prozess beschreibenden Größen durch linguistische Variablen beschrieben. Durch umfangreiche Befragung des Betriebspersonals (Audit) wird das Verhalten der Anlage verbal erfasst und in Form von „Wenn-Dann-Regeln“ beschrieben. Die einzelnen linguistischen Variablen werden dann mit Hilfe der Fuzzy-Set Theorie bewertet („Fuzzifizierung“), so dass eben Aussagen der Form Temperatur ist „ziemlich hoch“ oder „eher niedrig“ ermöglicht werden. Anhand vorgegebener Verarbeitungsvorschriften für die „Wenn-Dann-Regeln“ (Inferenz) wird eine unscharfe Menge von Gegenmaßnahmen ermittelt, die mit geeigneten Methoden in eine (scharfe) technische Stellgröße umgewandelt wird („Defuzzifizierung“).

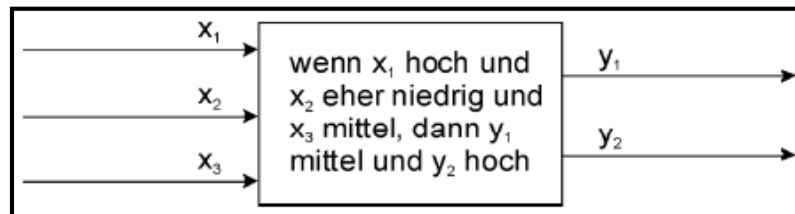


Abbildung 3.13: Übertragungsfunktion einer Fuzzy Logic

Versuche an Müllverbrennungen wurden dazu von September 2005 bis August 2007 durch die CUTEC GmbH durchgeführt [CUTEC 2008]. Dabei wurden Vergleiche zwischen konventioneller PID-Regelung und einen auf Fuzzy-Logic basierenden Regler vorgenommen.

Eine weitere Firma die auf diesem Gebiet tätig ist, ist die Firma INP Deutschland GmbH. Die Firma INP bietet ein Produkt mit dem Namen INP Fuzzy Control an [INP 2010].

3.2.3 Softsensoren

Unter Soft-Sensoren versteht man Sensoren, die mit Hilfe von Software nicht messbare oder schwierig zu messende Größen ermitteln. Dazu ist ein mathematisches Modell des Prozesses notwendig, welches theoretisch oder aus historischen Prozessdaten ermittelt werden kann. Es gibt ebenso Modelle, die auf künstlichen neuronalen Netzen beruhen. Dies ist besonders in Chemieanlagen verbreitet.

Bei einem Prozessmodell in der Zustandsraumform mit Beobachter, kann man diesen Beobachter als Softsensor betrachten. Dabei wird die vom Zustandsbeobachter gemessene Zustandsgröße als zu messende Prozessgröße interpretiert [Abel 2008].

Ein Ansatz im Bereich der thermischen Abfallbehandlung ist, mit einem Feuerungsmodell nicht messbare Größen zu berechnen und diese in die Feuerleistungsregelung einzubinden. So kann z. B. die Schichthöhe mit einem Modell berechnet werden und in die Regelung integriert werden.

3.2.4 MPC

Modellbasierte Regelungen, die auch prädiktiv (vorausschauend) arbeiten, wurden bereits in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts durch industrielle Regelungstechniker entwickelt und im Raffineriesektor sowie der Petrochemie eingesetzt. Die Zahl der industriellen Einsatzfälle von modellbasierten prädiktiven Regelungen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. So gut wie keine Anwendungsfälle von modellprädiktiven Regelungen sind in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung bekannt, obwohl aufgrund der Komplexität des Verfahrens und der Vielzahl von Einflussgrößen genau dort dieses neuartige Regelungsverfahren signifikante Verbesserungen hinsichtlich verbesserter Effizienz, gesteigerter Verfügbarkeit und minimierten Emissionen versprechen. Einige Forschungsvorhaben zu diesem Thema laufen bereits.

Im Konzept des Modellprädiktiven-Reglers (MPC = model predictive control) ermittelt ein Rechner aus aufgeprägten Störgrößen bzw. Stellgrößen-Änderungen das Verhalten des Systems auf der Basis mathematischer Matrizen, ohne physikalisch-chemische Modellbildung.

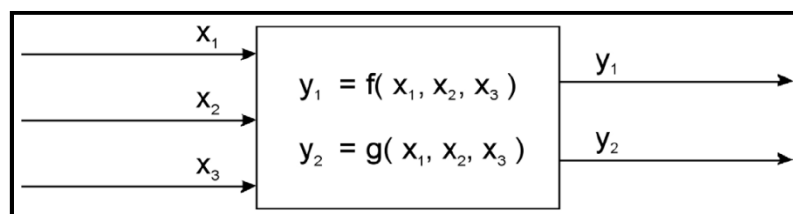


Abbildung 3.14: Übertragungsfunktion eines modellprädiktiven bzw. modellbasierten Reglers

Auch die modellprädiktiven Regler werden innerhalb der APC-Maßnahmen geführt (siehe oben). Unter einem modellprädiktiven Regler versteht man einen Regler, der in gewisser Weise vorschauend regeln kann. Das Verhalten ist dem Autofahren sehr ähnlich. Dem Fahrer ist der Verlauf der Strecke für einen gewissen Horizont bekannt und er kennt das Verhalten des Fahrzeugs. Somit sind ihm zum Zeitpunkt k die erforderlichen Steuereingriffe für einen gewissen Zeitraum bekannt. Der Fahrer führt aber nur die für den nächsten Moment, den Zeitpunkt $k+1$, richtigen Steuereingriffe aus. Danach wird wieder der Verlauf für den nächsten Horizont bestimmt - vgl. Abbildung 3.15. Im Vergleich dazu basiert das Verhalten eines PID-Reglers auf Fehlern in der Vergangenheit. Vergleicht man dies wieder mit dem Autofahren, entspricht dies einer Fahrweise in der nur der Rückspiegel benützt wird [Siemens a]. Ein Vorteil von modellprädiktiven Reglern ist, dass sie kein zeitraubendes Parametrieren der Regelparameter (Verstärkung; Integral- und Differenzialanteil) benötigen, sondern lediglich eine Sprungantwort des Prozesses auf einige definierte Sollwertsprünge. Auf diese Weise kann der MPC ein mathematisches Prozessabbild generieren und somit seine Regelstrecke bestimmen.

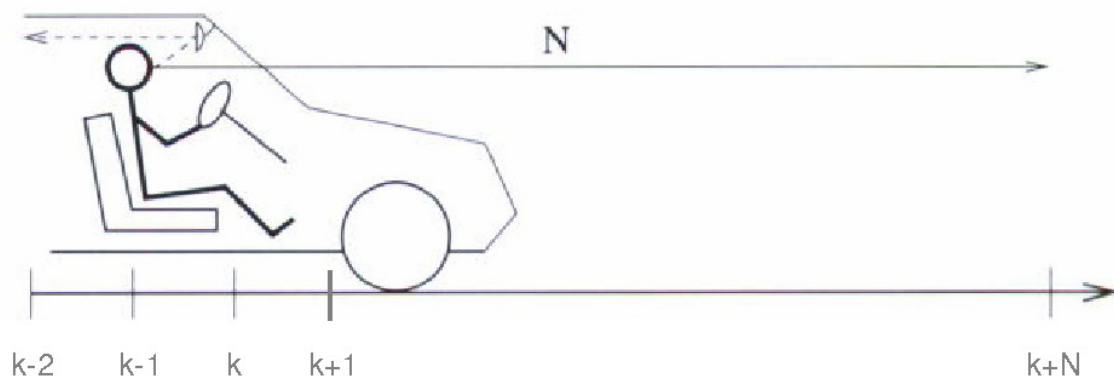


Abbildung 3.15: Vergleich Autofahren und MPC

Anhand von Abbildung 3.15 wird das Grundprinzip der modellbasierten, prädiktiven Regelung erläutert. Auf der Abszisse sind die diskreten Zeitpunkte k aufgetragen. Der Zeitpunkt k teilt das Diagramm in Vergangenheit und Zukunft. So liegt z. B. der Zeitpunkt $k-1$ in der Vergangenheit, der Zeitpunkt $k+1$ in der Zukunft. Auf der Ordinate sind die Regelgröße y , die Steuer- oder Stellgröße u und der Sollwert w aufgetragen.

Mehrgrößenprobleme können entweder unterspezifiziert oder überspezifiziert sein. Von einem unterspezifizierten System spricht man, wenn mehr Stellgrößen (Steuergrößen) als Regelgrößen vorhanden sind. Mit überspezifiziert beschreibt man ein System, das mehr Regelgrößen als Stellgrößen besitzt. Bei einem exakt spezifizierten System ist die Anzahl der Regelgrößen identisch mit der Anzahl der Stellgrößen. Hier spricht man auch von einem

quadratischen System. Da im Fall eines überspezifizierten Systems weniger Steuergrößen zur Verfügung stehen als Ziele (Sollwerte) für die Regelgrößen vorgegeben sind, treten bleibende Regeldifferenzen bei allen zu berücksichtigenden Regelgrößen auf.

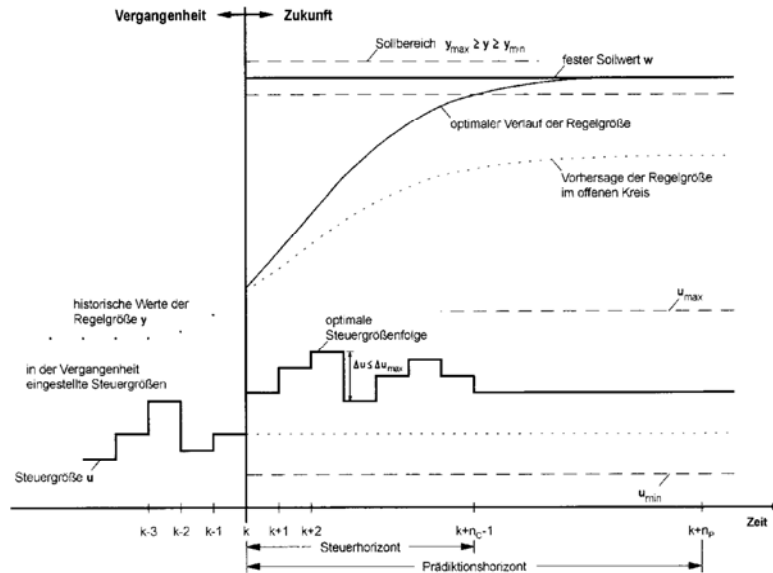


Abbildung 3.16: Grundprinzip der modellbasierten, prädiktiven Regelung

In Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung ist es immer abhängig von der vorhandenen Anlagentechnik hinsichtlich vorhandener Sensorik und Aktorik, ob das Regelungssystem über- oder unterspezifiziert ist. Aus diesem Grund müssen neu entwickelte Regelungssysteme immer eine möglichst hohe Flexibilität aufweisen um an verschiedene Anlagen anpassbar zu sein.

In der untenstehenden Liste sind einige verfügbare MPC-Softwarepakete aufgeführt:

1. RWTH Aachen, TIAC Box
2. IPCOS, INCA MPC
3. Shell Global Solutions, SMOG
4. ABB, Predict&Control
5. Honeywell, Profit Controller
6. Aspen Technology, DMCplus
7. ABB, Dynamic Optimizer
8. Siemens, PCS 7 MPC

Die TIAC-Box wird im nächsten Abschnitt näher beschrieben.

Im Rahmen des Forschungsprojekts NextGenBioWaste wurden durch die Firma TNO Versuche mit dem INCA MPC durchgeführt. Dabei wurden Sprungantworten aufgenommen und so ein Modell der Müllverbrennung erstellt. Versuche haben gezeigt, dass der Betrieb mit einem MPC möglich ist, jedoch nicht besser als mit einem modernen APC-PID Regelungskonzept.

3.2.5 TIAC-BOX

TIAC steht für Totally Integrated Advanced Control. Entwickelt und vorgestellt wurde die TI-AC-Box vom Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen. Mit diesem System ist es möglich komplexe Regelungen auf der AS-Ebene (Automatisierungs-Station) ablaufen zu lassen. Es können sowohl modellprädiktive Regler als auch komplexe PID Reglerkonzepte und Softsensoren entworfen werden.

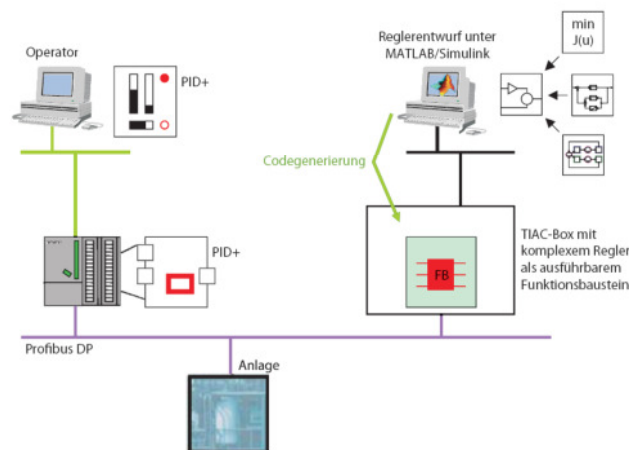


Abbildung 3.17: Systemintegration TIAC-BOX [Brunberg,2007]

Die TIAC-Box, eine leistungsstarke Recheneinheit (Industrie PC), ist der wichtigste Bestandteil der TIAC-Umgebung. Diese ist an den Anlagenbus (Profibus DP) angeschlossen. Auf der TIAC-Box wird ein Funktionsbaustein unter der Laufzeitumgebung ACPLT/FB ausgeführt, der den eigentlichen Steuerungs-/Regelungsalgorithmus enthält. Dieser wird in Matlab/Simulink erstellt und mit Hilfe des Real-Time Workshops (RTW) und des SIMCOM-Compilers zu einem Funktionsbaustein umgesetzt.

Dieser kann mit den gewohnten Methoden der Leittechnik verwaltet und überwacht werden. Dafür wird im Leitsystem selber der PID-Reglerbaustein um einen dem Funktionsbaustein entsprechenden Rahmen ergänzt, mit dessen Hilfe der Funktionsbaustein bedient und kontrolliert wird. Der PID-Regler wird zum PID+-Regler, der als Rückfallebene für das höhere Regelungsverfahren arbeitet. Die Umschaltstrategien sind Teil der Schnittstelle zwischen Rückfallebene und Advanced Control Methode.

Im Mehrgrößenfall wird diese Struktur im Leitsystem erweitert auf parallele PID+-Regler in der Rückfallebene. Aus Gründen der Praxisrelevanz werden die zu regelnden Systeme zunächst begrenzt auf Systeme mit maximal vier Ein- und Ausgängen. Grundsätzlich ist jedoch auch die Behandlung von Systemen mit einer größeren Zahl von Ein- oder

Ausgangssignalen problemlos möglich. Auf der TIAC-Box wird nun ein Funktionsbaustein ausgeführt, der einen Mehrgrößenregler beinhaltet. Die zum fehlerfreien Betrieb notwendige erweiterte Umschaltstrategie ist in der Advanced Control Methode in Matlab/Simulink implementiert. [Brunberg 2007]

3.2.6 PID

PID-Regler sind die bis heute am häufigsten eingesetzten Regler in der Prozesstechnik. Diese können als einschleifige Regelkreise oder z. B. als Kaskadenregelungen ausgeführt sein. Bei einer Kaskadenregelung sind dem Hauptregelkreis ein oder mehrere so genannte Hilfsregelkreise unterlagert. Die Entwicklung geht weiter bis hin zu softwaregestützten Optimierungsmethoden. Diese werden im Abschnitt 3.2.6.1 näher beschrieben

Bekannte PID-Regelungskonzepte im Bereich thermischer Abfallbehandlung gibt es z. B. von Firma SAR Elektronik GmbH in Dingolfing. Das von SAR entwickelte und verwendete Regelkonzept wurde bereits in über 50 Verbrennungslinien erfolgreich implementiert und basiert auf einer Vermaschung von mehreren PID-Regelkreisen deren Stellgrößen gewichtet und auf unterschiedliche Stellglieder aufgeteilt werden. Dieses Konzept geht bereits deutlich über die Anwendung einer konventionellen PID-Regelung hinaus.

3.2.6.1 Automatische Optimierung, PID-Tuning

Um sinnvolle Einstellregeln für konventionelle PID-Regler bemühen sich bereits mehrere Generationen. Gesucht sind Regeln, die an allen praktischen Regelstrecken einfach, sicher und zuverlässig ein vorhergesagtes, determiniertes Regelergebnis bewirken. Mit dem bekannten „Schwingversuch“ von Ziegler & Nichols und den daraus gewonnenen Streckenparametern $X_{p,krit}$ (kritischer Proportionalbereich bzw. kritische Verstärkung K_p) und T_{krit} (Periodendauer) entwickelten sie die für Praktiker vor Ort unschätzbar wertvollen, leicht zu handhabenden linearen Bestimmungsgleichungen, welche die Grundlage aller modernen PID-Einstellregeln sind, wenn auch in modifizierter Form. [ACT 2010]

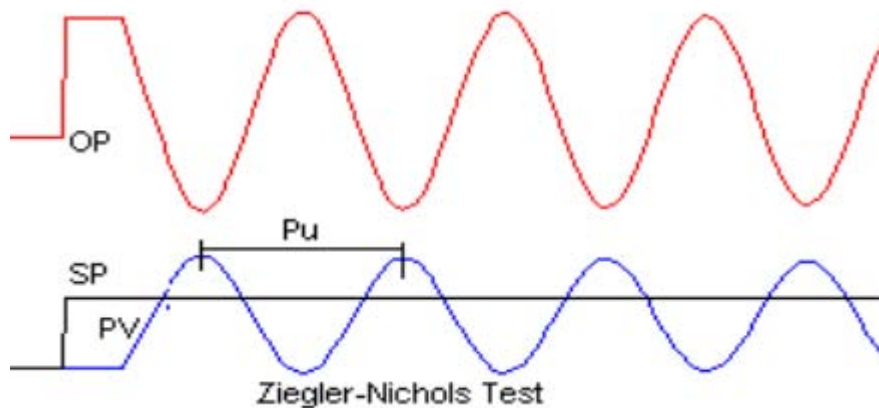


Abbildung 3.18: Ziegler Nichols Test

In diesem Zusammenhang als problematisch kristallisiert sich die Tatsache heraus, dass nicht jeder Prozess zum Schwingen angeregt werden kann bzw. darf. Dies ermutigte Chien, Hrones & Reswick et al. basierend auf der leichter durchzuführenden Sprungantwort die Ergebnisse von Ziegler & Nichols zu erweitern und zudem noch nach Führungs- und Störverhalten zu unterscheiden, mit der Vorgabe des gewünschten Einschwingverhaltens (aperiodischer Übergang oder einmaliges Überschwingen).

Wenngleich Chien, Hrones & Reswick eine Verbesserung bringen, liefern beide Verfahren jedoch nur ausreichend gute Ergebnisse für eine eingeschränkte Prozessklasse. Mit zunehmender Trägheit und Totzeit (Verzugszeit) der Prozesse - wie bei den hier vorliegenden Prozessen der Feuerführung auf einem Verbrennungsrost - führen die genannten Entwurfsverfahren bestenfalls in die Nähe des möglichen Optimums.

Die Folge daraus ist, dass nach wie vor empirisches, langwieriges Nachoptimieren durch erfahrene Prozesstechniker erforderlich ist. Diese Erkenntnis hat die Hersteller von Reglern veranlasst, durch Modifikation eigene Regeln zu entwerfen, die auf die beabsichtigten Haupteinsatzgebiete zugeschnitten sind und dadurch bessere Ergebnisse erzielen. Dadurch werden etwa 80 % aller Regelkreise hinreichend oder zufriedenstellend geregelt, auch wenn nicht immer ein Optimum erreicht wird. Allgemeingültige, universell auf (fast) alle Prozesse gleich welcher Ordnung, gleich welchen Typs (mit/ohne Ausgleich) für gleich welche Reglerart (Stellverhalten: stetig, Zweipunkt, Schrittreger, ...) anwendbare PID-Entwurfsverfahren gab es bislang nicht. Die generelle Gültigkeit von bisher bekannten Ziegler & Nichols-Regeln und aller Derivate ist also nur eingeschränkt gegeben.

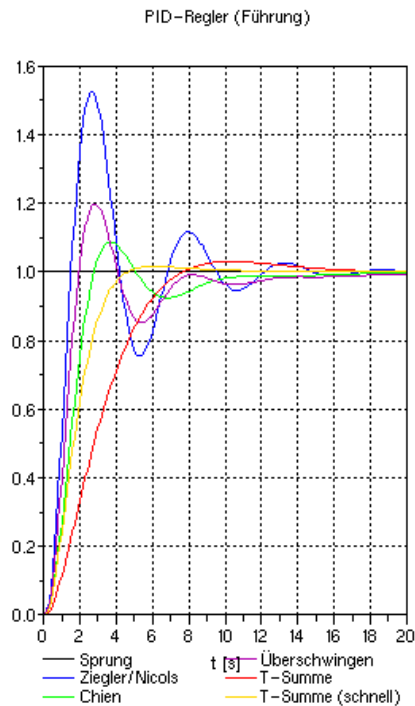


Abbildung 3.19: Vergleich Sprungantworten PID

Bei anderen Techniken, wie z. B. den ebenfalls hier zu untersuchenden modellprädiktiven Reglern, ist die Robustheit (Phasenreserve) zu untersuchen und kritisch zu hinterfragen. Es besteht die Gefahr, dass bereits geringfügige Änderungen an der Prozessdynamik zu Instabilitäten führt, was eine permanente Modelladaptation bedingt. Zudem soll auch kurz an das u. U. nicht in vollem Umfang vorhandene Verständnis vor Ort bei moderneren Regelalgorithmen hingewiesen werden.

Somit sind bis heute die Praktiker vor-Ort auf den „guten alten“ PID-Regler als Standard und ihre eigene Erfahrung angewiesen, wenn es gilt, unter erheblichen Zeit- und Kostendruck Regelkreise einzustellen und zu optimieren.

Aus diesem Grund wird versucht, den langwierigen Prozess des Findens der optimalen Reglerparameter durch softwaregestützte Tools zu verkürzen. Im Idealfall soll es ausreichen, zuerst im Handbetrieb für stabile Verhältnisse zu sorgen um anschließend das Einschwingverhalten von dem bereits erwähnten Softwaretool analysieren zu lassen. Als Ergebnis werden die optimalen PID-Reglerparameter berechnet und ausgegeben.

Bei dem vorliegenden Problem der Optimierung einer Feuerungsregelung gilt es mehrere, bis zu 10 oder mehr, sich gegenseitig beeinflussende PID-Regler einzustellen und zu optimieren. Der Prozess an sich ist äußerst schwierig zu beherrschen, da man mit sehr langen, unterschiedlichen und variablen Totzeiten zu kämpfen hat.

Das eingangs erwähnte Ziegler-Nichols- und alle anderen darauf aufbauenden Optimierungsverfahren können nur sehr bedingt angewendet werden, da ein instabiles Schwingen des Prozess mit gefährlichen Zuständen der Gesamtanlage einhergehen kann. Das heißt, die Einstellung und Optimierung des Prozesses kann nur durch empirische Versuche gemäß „Trial und Error“ durchgeführt werden, was angesichts der Anzahl an Regelkreisen mehrere Wochen bis Monate in Anspruch nimmt. Nach (vermeintlichem) Abschluss dieser Optimierungsphase stellt sich ein mehr oder weniger zufriedenstellender Zustand ein, ohne jedoch sicher sein zu können, dass es sich bei den eingestellten Reglerparametern um das tatsächliche Optimum handelt. Darum sollen mittels Einsatz von automatisierten, computergestützten Optimierungsverfahren (so genannten „PID-Tunern“) zwei wesentliche Ziele erreicht werden:

- Verkürzung der langwierigen Einstell- und Optimierungsphase vor Ort
- Qualitative Verbesserung der Regelergebnisse durch optimal eingestellte Regelparameter

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass systembedingt diese Verfahren zur Regleroptimierung nur für bereits existierende Anlagen geeignet sind, die stabil sind oder an denen ein instabiles Verhalten keine Schäden verursachen kann. Sie eignen sich daher nicht zum Einsatz in der Projektierungsphase einer Anlage.

Folgende PID-Tuner-Softwarepakete sind verfügbar:

1. Contek Systems PID Tuning Package
2. RaPID Robust Advanced PID Control
3. Matrikon EZYtune
4. ProTuner
5. Rockwell Software RSTune
6. ControlSoft InTune Controller
7. Bestune PID Tuning Software
8. Universal Dynamics Technologies Brainwave
9. Siemens PCS7 PID-Tuner
10. IPCOS INCA PID Tuner

Die Programmpakete 1. - 8. sind auf dem englischsprachigen Markt etabliert, konzentrieren sich auf chemische und petrochemische Anwendungen und sind in Europa eher unbekannt. Nicht zuletzt die einfachere Einbindung in oft anzutreffende Siemens-Applikationen führte nach Sichtung der beiden verbleibenden Pakete dazu, das PCS7 PID-Tuner-Paket als besonders geeignet für die geplante Anwendung festzulegen.

3.2.6.2 PCS7 PID-Tuner

Im Prozessleitsystem PCS7 von Siemens ist im Rahmen der APC-Bibliothek ein PID-Tuner enthalten. Zum Ermitteln der Reglerparameter wird der Prozess entweder durch einen Stellgrößensprung im Handbetrieb des Reglers oder durch einen Sollwertsprung im Automatikbetrieb angeregt (falls bereits eine grobe, zumindest stabile Reglerparametrierung vorliegt). Aus den archivierten Messdaten wird ein dynamisches Prozessmodell identifiziert, d.h. Schätzwerte für die Modellparameter werden so bestimmt, dass die Lerndaten möglichst gut durch das Modell wiedergegeben werden. [Siemens 2008a]

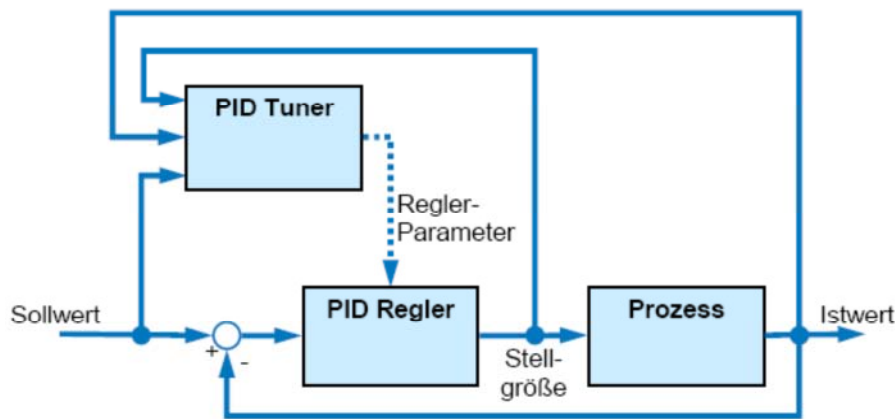


Abbildung 3.20: Rechnergestützte Regleroptimierung (PID-Tuning)

In dem besonders einfachen und robusten Verfahren des PCS 7 PID-Tuner, der voll in das Engineering-System integriert ist, wird beispielsweise ein Ansatz mit PT_n -Modellen steigender Ordnung gewählt:

$$g(s) = \frac{k_S}{(t_1 s + 1)^n}$$

Es müssen vom PID-Tuner die drei Parameter Streckenverstärkung k_S , Zeitkonstante t_1 und Ordnung n bestimmt werden. Je größer die Ordnung n , desto größer ist die Verzugszeit im Vergleich zur Ausgleichszeit der Sprungantwort.

Auf Basis des identifizierten Prozessmodells erfolgt die Bestimmung günstiger Reglerparameter nach dem **Verfahren des Betragsoptimums**.

Beim PCS7 PID-Tuner gibt es darüber hinaus die Möglichkeit zwischen zwei Varianten der Reglerauslegung zu wählen:

- Optimales Störverhalten (Dabei müssen ca. 10-20% Überschwinger bei einem Sollwertsprung in Kauf genommen werden.)
- Optimales Führungsverhalten ohne Überschwinger. Dies kann nur bei Strecken niedriger Ordnung durch eine Strukturzerlegung (P/D-Anteil in die Rückführung) ohne Einbußen beim Störverhalten erreicht werden, während bei Strecken größer zweiter Ordnung eine Reduktion des Verstärkungsfaktors erforderlich ist.

Durch den Einsatz von automatisiert-optimierten PID-Regelkreisen soll die Qualität der Reglerparameter verbessert und so Emissionen gesenkt werden.

Durch die Verkürzung der Optimierungszeiten werden auch Zeiten mit nicht optimalen Reglereinstellungen, welche einhergehen mit erhöhten Emissionen und unsicheren Betriebszuständen, drastisch verkürzt.

3.2.7 Einsatz im Rahmen des Forschungsprojekts

Bewusst wurde auf ein Miteinbeziehen von Fuzzy-Regelalgorithmen und künstlichen neuronalen Netzen (KNN) im Rahmen dieses Projektes verzichtet, da die erwähnten Regelalgorithmen kein Abbild des realen Prozesses bilden können, sondern ihre Stellgrößen aus hinterlegten (vergangenen) Zuständen bilden. Da die Steigerung des Verständnisses über den Feuerungsprozess ein wesentliches Ziel des vorliegenden Vorhabens darstellt, werden ausschließlich solche Methoden und Werkzeuge verwendet, die auch die geforderte Prozessnähe aufweisen und somit neben den PID-Reglern im Wesentlichen modellbasierende und modellprädiktive Algorithmen bereitstellen.

4 Durchführung

Die unten stehende Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau Müllverbrennungsanlage GKS Schweinfurt. Nach der Anlieferung des Mülls am Müllbunker wird dieser mit Hilfe eines Krans in den Beschicktrichter eingebracht. Mit dem Beschickungskolben wird der Müll auf den Rost geschoben. Hier wird der Müll verbrannt. Die entstehenden Rauchgase geben ihre Energie im Kessel an den Wasser-Dampf-Kreislauf ab und werden anschließend in der Rauchgasreinigung gereinigt.

Dabei ist es wichtig, alle gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte einzuhalten. Eine funktionierende Feuerleistungsregelung (FLR) trägt dazu bei, die unterschiedlichen Zusammensetzungen des Mülls auszugleichen und die Entstehung von Schadstoffen bereits bei der Verbrennung so gering wie möglich zu halten. Nach Durchlaufen der verschiedenen Teile der Rauchgasreinigung wird die gereinigte Luft durch den Kamin an die Umgebung abgegeben.

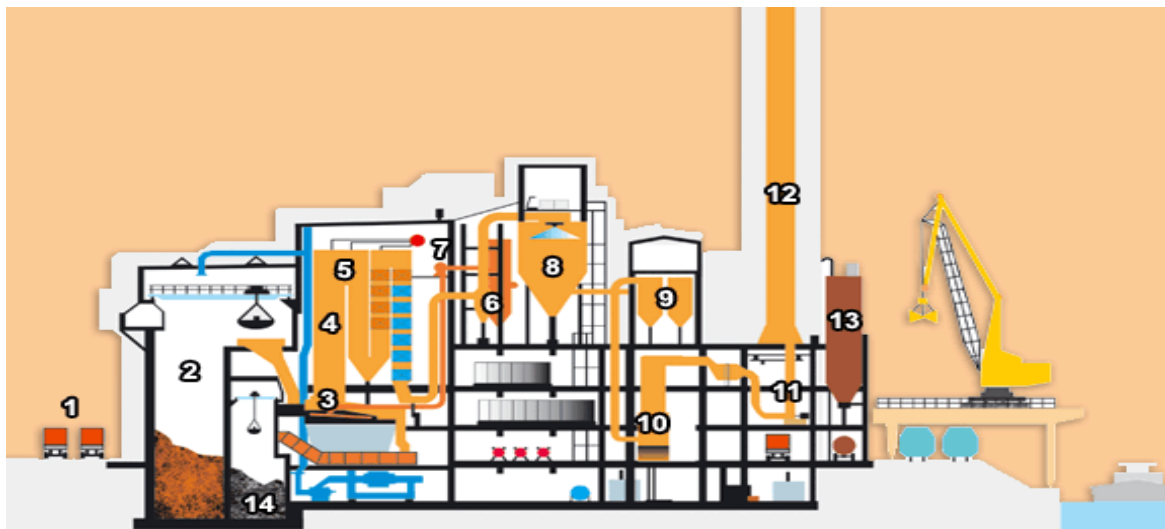


Abbildung 4.1: Aufbau Müllverbrennungsanlage GKS Schweinfurt

- | | | |
|--------------------|------------------------|--------------------|
| 1: Müllanlieferung | 6: Multizyklon | 11: Saugzug |
| 2: Müllbunker | 7: Rauchgasrückführung | 12: Kamin |
| 3: Rostfeuerung | 8: Sprühtrockner | 13: Reststoffsilos |
| 4: Entstickung | 9: Gewebefilter | 14: Schlackebunker |
| 5: Kesselzug | 10: Wäscher | |

4.1 Planung und Ablauf der Arbeiten

Die Arbeiten für das Forschungsprojekt können in verschiedene Abschnitte eingeteilt werden. So können Teile der Arbeiten im Büro durchgeführt werden. Andere werden an der Anlage GKS durchgeführt. Die einzelnen Arbeiten sind in der unten stehenden Liste aufgeführt.

Büro

- Berechnungen zur Optimierung des Feuerungsmodells „CombAte“
- Umsetzung der Teilmodelle in „CombAte“
- Vorbereitung und Planung Versuche an GKS für MPC
- Vorbereitung und Planung Versuche an GKS für PID
- Auswertung und Dokumentation der Versuche
- Kopplung Feuerungsmodell mit Feuerungsregelung
- Versuche mit dem Feuerungsmodell zum Reglerentwurf

Anlage GKS

- Kopplung Feuerungsmodell mit Feuerungsregelung
- Evaluierung Schichthöhe, Integration Schichthöhe als zusätzlichen Regelkreis
- Durchführung der Versuche
- Integration MPC ins Leitsystem
- Evaluierung der entworfenen MPC-Regler
- Evaluierung der entworfenen PID-Regler



Abbildung 4.2: Geplanter Zeitplan Forschungsprojekt

4.2 Kooperationen

Im Rahmen des Forschungsprojekts sind verschiedene Kooperationen entstanden.

Die Firma Weghaus GmbH entwickelte zusammen mit GKS das Feuerungsmodell. Die beiden Partner werden die Modellvalidierung durchführen.

Eine weitere Kooperation ist zwischen Firma Weghaus GmbH und Firma SAR Elektronik GmbH entstanden. Hier findet eine Zusammenarbeit bei der Modellkopplung mittels OPC statt. Zusätzlich leistet Firma SAR Programmierunterstützung im Bereich der OPC Kopplung. Des Weiteren wird durch Firma SAR eine praxisnahe Validierung des Modells durchgeführt.

Firma SAR Elektronik GmbH steht im engen Kontakt zur GKS Schweinfurt. Im Rahmen dieser Kooperation werden Versuche an der Anlage GKS durchgeführt und anschließend die entworfenen Regelungskonzepte getestet. Ebenso wurden Betriebsdaten zur Auswertung von seitens GKS zur Verfügung gestellt.

4.3 Modell

Das vorliegende Feuerungsmodell ist das Ergebnis von inzwischen rund 15 Jahren Entwicklungsarbeit. Besonderes Augenmerk wurde dabei immer darauf gelegt, dass das Modell mit praxisrelevanten Daten gefüttert werden kann. Ein komplexes empirisches Modell mit in der Praxis nicht verfügbaren Kennzahlen wird in der Praxis nicht anerkannt werden.

Aufbauend auf dem vorliegenden Code wurde das Projekt durchgeführt.

4.3.1 Programmierung

Zu Beginn des Projektes lag der Programm-Code in der Sprache C++ vor. Zur Zeit des Entwicklungsstarts des Programmes galt C++ als moderne Sprache und lieferte den schnellsten Ausführungscode. Nachteil der Sprache ist aus heutiger Sicht die Portierbarkeit, also die Möglichkeit, den Quelltext auf unterschiedlichen Computerarchitekturen auszuführen. Mit dem vorliegenden Projekt sollen wichtige neue Erkenntnisse in das Programmpaket eingebaut werden. Diese teilen sich auf in programmiertechnische und inhaltliche Aufgaben.

Die damals moderne Sprache C++ ist aus heutiger Sicht für viele Anwendungen in den Hintergrund getreten. Aktuelle Programmentwicklungen basieren großenteils auf Interpreter-Sprachen. Während klassische Sprachen wie z. B. C++, Fortran oder Pascal den Programmtext erst in eine sog. Maschinensprache übersetzen, interpretieren die neuen Sprachen den Programmtext erst zur Laufzeit. Dies hat den großen Vorteil gegenüber den klassischen Compilern, dass die Abhängigkeit der Maschine aufgelöst wurde. Ein Programm ist somit auf allen Systemen lauffähig. In der Vergangenheit wurden Interpreter wegen der langsamen Ausführungszeiten nicht eingesetzt.

Der Unterschied zwischen Compiler und Interpreter wird offensichtlich, wenn man den Programmtext mit einer Literatur vergleicht, die in einer anderen Sprache vorliegt. Die klassische Variante ist es, den Text einmal in die gewünschte Sprache zu übersetzen und dann immer die Übersetzung zu nutzen. Somit ist die Übersetzung immer schnell Verfügbar, aber auf die übersetzte Sprache beschränkt. Bei der Interpreter-Variante würde der Originaltext vorliegen. Für jeden Gebrauch würden die einzelnen Worte im Wörterbuch nachschlagen. Der Vorteil ist, dass die aktuelle Übersetzung immer mit dem für den aktuellen Benutzer sinnvollen Wörterbuch geschieht und auch problemlos in andere Sprachen übersetzt werden kann.

Die bislang zeitaufwendige Interpretation wurde in den letzten Jahren soweit optimiert, dass Laufzeitunterschiede zwischen Compiler- und Interpreter-Sprachen für eine Vielzahl von Einsatzgebieten kaum noch feststellbar sind und insbesondere die Portierung des Interpreters zum nutzbaren Programm zum Zeitpunkt des Programmaufrufes verkürzt wurde.

Unter den modernen portierbaren Sprachen sind nachstehend die wichtigsten aufgeführt:

- Java,
- Perl und
- Python.

Während Java und Perl als Skript-Sprache für Web-basierte Anwendungen entwickelt wurden, verfolgt Python die Philosophie, möglichst einfachen Programmtext zu ermöglichen. Die Kommandovielfalt ist bei Python stark reduziert. Auch die Elemente zur Strukturierung des Programmes sind hinsichtlich besserer Lesbarkeit optimiert. Mit Python kann schnell und einfach programmiert werden. Python ist daher besonders dort geeignet, wo Übersichtlichkeit und Lesbarkeit des Codes eine herausragende Rolle spielen. Unter den drei aufgeführten Sprachen ist sie aber die langsamste.

Obwohl Perl ursprünglich nur ein Werkzeug war, um große Texte zu bearbeiten, hat es sich inzwischen zu einer umfassenden Sprache entwickelt. In der Praxis wird es aber nahezu ausschließlich für Skripte auf Systemebene (Systemadministratoren) und Passagen in der Web-Entwicklung verwendet.

Der Entwurf der Programmiersprache Java strebte im Wesentlichen fünf Ziele an. Sie soll:

- eine einfache objektorientierte, verteilte und vertraute Programmiersprache sein,
- robust und sicher sein,
- architekturneutral und portabel sein,
- sehr leistungsfähig sein,
- interpretierbar, parallelisierbar und dynamisch sein.

Besonderes Merkmal von Java ist die Architekturneutralität, welche sich nicht nur auf die unterschiedlichen Computermodelle bezieht, sondern selbst bei virtuellen Maschinen, wie sie z. B. das Internet darstellt, beste Ergebnisse erzielt.

In vielen Tests konnte festgestellt werden, dass für unsere Aufgabenstellung die Ausführungsgeschwindigkeit des Programmes mindestens vergleichbar mit einem optimierten C++-Compiler ist.

4.3.2 Erweiterungen zum bestehenden Modell

Neben der Portierung nach Java sind die Erweiterungen der physikalischen Modelle vorrangige Ziele des Projektes. Als besonders erwähnenswert haben sich dabei folgende Punkte herauskristallisiert:

- 3. Partikelschicht,
- Wärmeübergang in das Partikel,
- Wärmeübergang in die Schüttung,
- Flüchtigensfreisetzung und
- Kesselmodul.

4.3.2.1 Dritte Partikelschicht

Der bewegte Feststoff wird in dem Programm mit einem Schalenmodell abgebildet. Das alte Modell ging dabei von einem Kern und einer umgebenden Schale aus. Frischer Feststoff wird als reiner Kern aufgegeben. Der Kern bildet mit Durchlaufen des Feuerraumes die Schale aus. Am Ende des Feuerraumes verlässt der Feststoff das System mit einem kleinen Rest des ursprünglichen Kerns, welcher das Unverbrannte, in der Regel die Asche und ein kleiner Rest C_{fix} , repräsentiert. Diese Modellvorstellung gibt sehr gut die betrachteten Prozesse zur Trocknung, Pyrolyse und Koksabbrand wieder.

Eine Besonderheit der dynamischen Betrachtung der Vorgänge auf dem Rost ist aber die Beeinflussung insbesondere des Koksabbrandes durch mechanisches Eingreifen wie z. B. dem Schüren oder Herunterfallen von Stürzen. Physikalisch kann diese Veränderung mit einem Aufbrechen und somit Vergrößern der Oberfläche beschrieben werden.

Wie oben beschrieben, hat das alte Modell nur eine Schale, die im Mittel über den Feuerraumdurchlauf einen Großteil der vorliegenden Masse ausmacht. Das Schüren wirkt sich aber nahezu ausschließlich auf die Masse nahe der Partikeloberfläche aus. Betrachtet man den oberflächennahen Koks, so wird sich dessen Abbrand beschleunigen, wenn man z. B. die Rostgeschwindigkeit erhöht. Durch das stärkere Stoßen werden die Reaktionsprodukte an der Oberfläche abgereinigt, und somit kann der weitere Umsatz von Koks mit umgebendem Sauerstoff besser erfolgen. Bei dem alten 2-Schalen-Modell würde aber der Umsatz des gesamten Koks der äußeren Schale durch das Schüren beeinflusst. Weiterhin würde es nicht zum Abebben dieses Einflusses führen.

Um also diese Oberflächen-Effekte besser abbilden zu können, ist eine besondere äußere Schicht erforderlich. Dies wurde mit dem vorliegenden Programm umgesetzt.

Das neue Partikelmodell bestand zunächst aus 3 Schalen, wobei die innerste Schale den Kern bildet. Die Effekte in den einzelnen Schalen können folgendermaßen zusammengefasst werden.

Die 1. Schale = Kern präsentiert zunächst den unbehandelten Feststoff. Er setzt sich zusammen aus den für den Brennstoff typischen Spezies Wasser, Asche, C_{fix} und Flüchtige, wobei die Flüchtigen weiter detailliert sind.

Der Kern kann sich aufgrund von Temperaturleitung aus den umgebenden Schichten erwärmen. Der Wassergehalt gleicht sich diffusiv mit den umgebenden Schichten aus. Wird die Verdampfungstemperatur von Wasser erreicht, kann der Kern zusätzlich zur Trocknung durch Diffusion auch durch Verdampfen Wasser abgeben. Mit Überschreiten der individuellen Pyrolysetemperatur können auch Flüchtige entweichen. Ein Abbrand von C_{fix} findet im Kern nicht statt.

Mit dem Durchwandern des Feuerraumes bildet sich die den Kern umgebende 2. Schale aus. Dabei korreliert das Schichtwachstum mit der Temperaturleitfähigkeit des Stoffes. D.h. das mit dem Aufheizen des Partikels zunehmende Anteile des Feststoffes getrocknet und pyrolysiert werden.

Die 2. Schale ändert die Temperatur aufgrund von Temperaturleitung mit der 1. und 3. Schale. Die auf das Partikel fallende Einstrahlung wirkt abgeschwächt auch auf die 2. Schale. Wasserdiffusionsausgleich mit den benachbarten Schalen findet auch hier statt. Wesentlicher Trocknungseffekt ist hier aber die Verdampfung. Die Pyrolyse der Flüchtigen findet in dieser Schale das Maximum. C_{fix} -Abbrand ist an der Grenzfläche zur Schale 3 implementiert.

Die 3. Schale bildet sich mit der Pyrolyse der 2. Schale aus. Mit der Pyrolyse eines Feststoffes bildet sich an der Oberfläche eine Schicht aus, die im Wesentlichen aus C_{fix} und Asche besteht. Dies wird mit der aktuellen Erweiterung nachgebildet. Der in Schale 2 vorhandene C_{fix} wird anteilig der aktuellen Pyrolyserate der 3. Schale zugeordnet. Somit wächst der Anteil des Kokes in der Oberfläche. Findet kein Schüren statt, setzt sich der Koks an der Oberfläche des Partikels um. Mit dem Schüren wird die Oberfläche der 3. Schale vergrößert und somit der Umsatz von Koks gesteigert. Mit dem Abbrand des oberflächlichen Koks wird auch die vergrößerte Oberfläche abgebaut, was nach einmaligem Schüren dann vergleichsweise schnell zu einem Verebben des Schüreffekts führt, wie es auch in der Realität beobachtet wird.

4.3.2.2 Wärmeübergang in das Partikel

Der Wärmehaushalt des Partikels wird u.a. durch Wärmeübertragung zwischen Umgebung und Partikel und Wärmeleitung im Partikel bestimmt. Kühleffekte durch Phasenübergänge werden im Programm berücksichtigt, sollen hier aber für die Optimierung des Programms, unbetrachtet bleiben. Wie bereits oben beschrieben, kommunizieren die einzelnen Schichten

untereinander an den gemeinsamen Grenzflächen. Temperaturausgleich innerhalb des Partikels findet über reine Wärmeleitung statt, wobei die Wärmeaufnahme des Partikels über die Wärmekapazitäten und die Verdampfungsenthalpien berücksichtigt sind (für die Flüchtigen-Freisetzung ist der Phasenübergang mit einer neutralen Enthalpieänderung angesetzt worden). Übliche Brennstoffe haben in der Regel sehr geringe Wärmeleitkoeffizienten. Dadurch ist es möglich, dass der Kern sehr lange niedrige Temperaturen haben kann, auch wenn die äußeren Schichten bereits brennen. Diesen Effekt kann man beim Verbrennen von feuchten Holzscheiten beobachten. Trotz brennender Oberfläche mit deutlichen Flammen tritt an den Stirnholzflächen flüssiges Wasser aus bzw. trotz brennender Oberfläche ist die Innenseite von Holzstämmen auch nach 5 min. noch kein bisschen durch Reaktionen geschwärzt.



Abbildung 4.3: Kirschholz-Stamm nach 5 min. in intensivem Grillfeuer; links: von außen, rechts: aufgeschnitten

Besonders entscheidend für das Aufheizen des Partikels ist der äußere Wärmeübergang. Dieser wird durch Konvektion mit dem umgebenden Gas und Strahlungsaustausch mit der Umgebung bestimmt. Der konvektive Anteil spielt im Feuerraum an der Oberfläche des Brennbettes für den Feststoff eine untergeordnete Rolle. Die Gasphase wird aber aufgrund der günstigen Massenverhältnisse relativ stark erwärmt. Im Innern des Brennbettes überwiegt demgegenüber zunächst die Konvektion.

Die Strahlung zwischen Partikel und Umgebung wird neben dem Absorptionskoeffizienten und Sichtfaktoren wesentlich aus dem vorliegendem Temperaturgradienten bestimmt. Durch die Implementierung der 3. Schicht wurde auch der Wärmeeintrag durch Strahlung deutlich verbessert. Legt man für die Berechnung der Strahlungsintensität die mittlere Feststofftem-

peratur zugrunde, so wird wegen der größeren Temperaturdifferenz zur Umgebung der Wärmestrom überbewertet. Die Tiefenwirkung der Wärmestrahlung ist begrenzt, ggf. durch Rissbildung des Feststoffes erweitert, so dass für die korrekte Berechnung der Temperaturdifferenz nur die oberflächliche Temperatur berücksichtigt werden darf. Mit der Implementierung der 3. Schicht ist dies implizit umgesetzt. Die geringe Masse der 3. Schicht heizt sich schneller auf und reduziert somit die Gesamt-Einstrahlleistung. Die sich einstellende Temperatur der äußeren Schicht ergibt sich aus der Bilanz von Einstrahlleistung (aus Emission, Reflektion und Transmission) und Konvektion.

4.3.2.3 Wärmeübergang in die Schüttung

Das Eindringen der Temperaturfront in die unbewegte Schüttung ist ein viel diskutiertes Thema. Reine Wärmeleitung kann nur über die Kontaktstellen der einzelnen Partikel erfolgen. Hinsichtlich der ohnehin geringen Wärmeleitkoeffizienten der betrachteten Feststoffe und des schlechten Verhältnisses von Kontaktfläche pro Volumen kann eine merkliche Wärmeleitung kaum stattfinden. Durch Strahlung zwischen den Partikeln kann Wärme in die Schüttung übertragen werden, wenn diese bewegt ist. Bei einer unbewegten Schüttung gleichen sich die Temperaturen der sich sehenden Oberflächen an. Die Temperaturerhöhung wird aber aufgrund der geringen Wärmeleitkoeffizienten kaum an entfernte Stellen auf der Oberfläche weitergeleitet. Zur Wärmeübertragung durch Strahlung innerhalb der Schüttung ist also eine Bewegung des Partikels erforderlich, damit die erwärmte Stelle mit einer kühleren Stelle in der Schüttung kommunizieren kann. Zusätzlich kann reagierende Gasphase in den Zwischenräumen der Schüttung zu einer erhöhten Wärmeübertragung beitragen.

Im vorliegenden Ansatz wurde die Wärmeübertragung innerhalb der Schüttung als Wärmeleitung abgebildet, wobei der Wärmedurchgangskoeffizient aus Mittelung von Strahlung, Konvektion und Leitung bestimmt ist.

4.3.2.4 Kesselmodul

Mit dem Programmpaket werden die Vorgänge auf dem Rost beschrieben. Innerhalb dieser Beschreibung liegt der Schwerpunkt auf der Feststoffseite. Die Gasphase, bestehend aus dem Unterwind und den aus dem Feststoff austretenden Gasen, wurde zwar in ihrer Zusammensetzung exakt berechnet, aber die Strömungsrichtung nur rudimentär behandelt. Um das Programmpaket an die Regelung anknüpfen zu können, sind weitere Aussagen wie z. B. Dampfleistung oder O₂-Gehalt des Rauchgases erforderlich, die durch die Berücksichtigung des Dampferzeugerverhaltens eingebunden werden sollten. Diese Daten ergeben sich aus einer Kesselberechnung. Eine vollständige Kesselberechnung in das Programm zu integrieren, würde den Rahmen des Programms sprengen. Die erforderlichen Aussagen können aber über eine globale Kesselbilanzierung zufriedenstellend gewonnen werden.

Das implementierte Kesselmodul stellt im aktuellen Stand folgende zusätzliche Informationen bereit:

- Dampfleistung,
- Volumenstrom Rauchgas und
- Qualität des Rauchgases hinsichtlich der Spezies wie O_2 , CO_2 , H_2O etc.

4.3.2.5 Weitere Rostbauarten

In der Vorgänger-Version von CombAte wurden im Wesentlichen Vorschubroste behandelt. Mit diesem Projekt wurde das System um Rückschub- und Walzenroste erweitert.

In Abbildung 4.4 ist ein typischer Rückschubrost abgebildet. Die Roststäbe arbeiten in Richtung der Aufgabe.

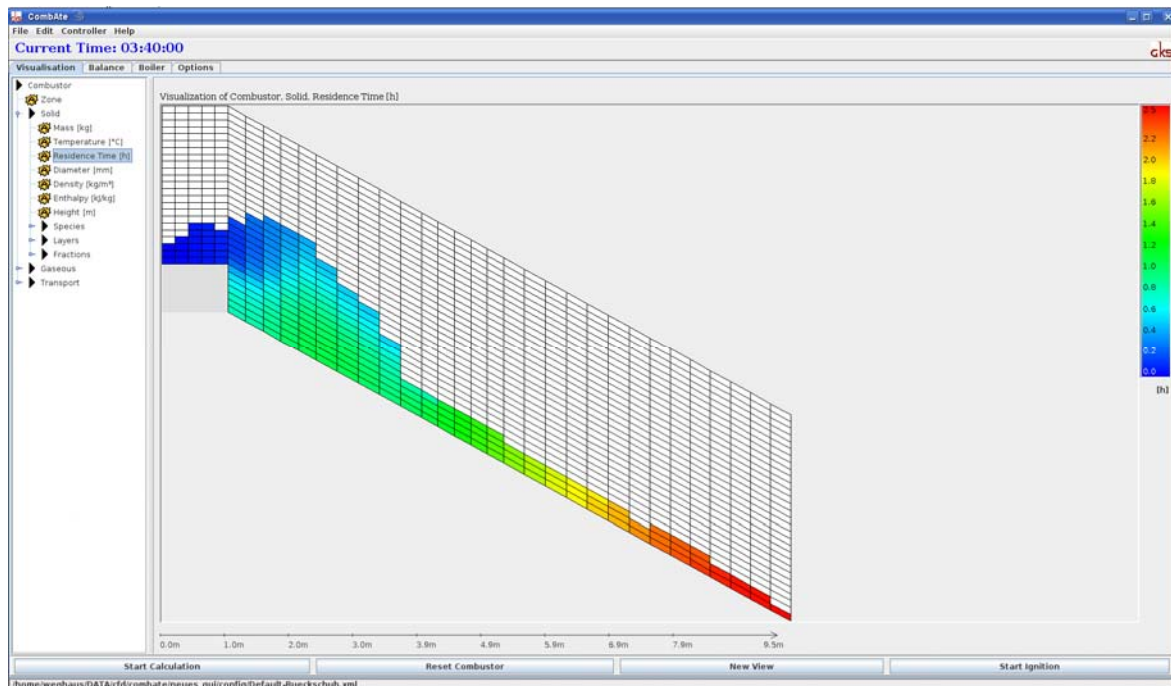


Abbildung 4.4: CombAte mit neuem Rückschubrost-Modell

Abbildung 4.5 gibt einen Walzenrost mit 6 Walzen wieder. Auf der Bergseite der Walzen kann schön die charakteristische Feststoff-Anhäufung beobachtet werden. Bei den letzten Rollen liegt die Walze talseitige nahezu frei (eine Beobachtung, die auch an realen Anlagen zu sehen ist).

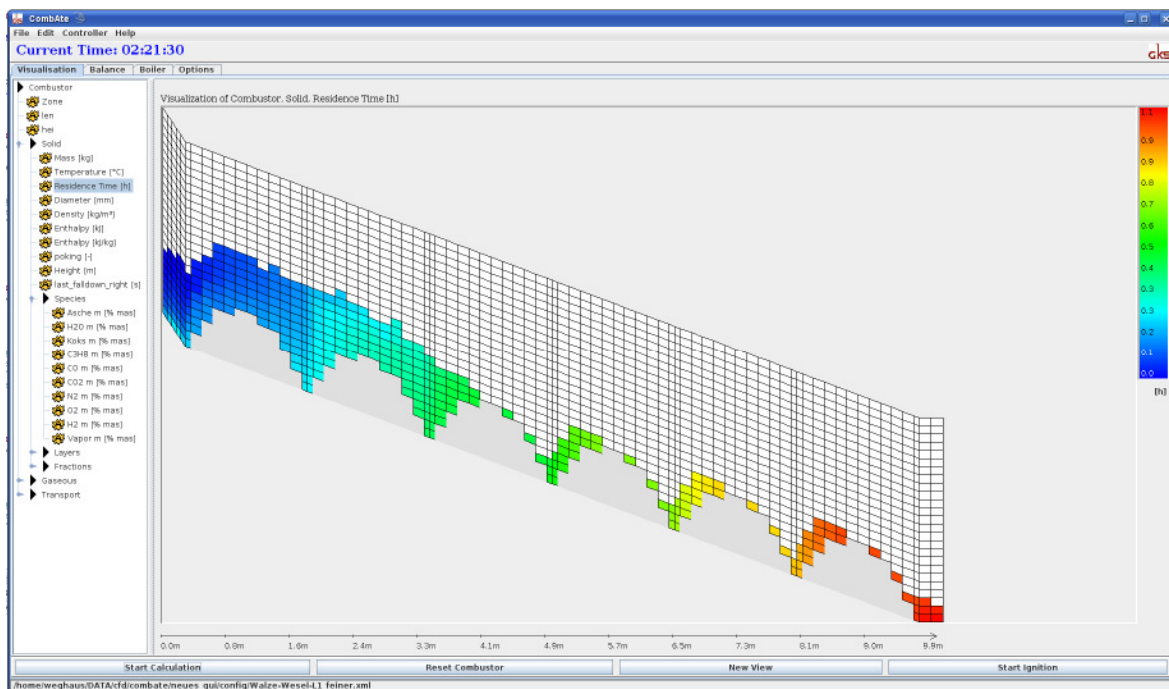


Abbildung 4.5: CombAte mit neuem Walzenrost-Modell

4.3.3 Grundsätzliche Validierung des Modells

Eines der Ziele des vorliegenden Projektes ist es, zusätzliche Messgrößen zu erhalten, die in der realen Anlage nicht gemessen werden können. Dieser Umstand macht es schwierig, das Programm zu validieren. So können z. B. Schütthöhen an der realen Anlage nicht ohne Weiteres bestimmt werden. Auch die wahre Ausbreitung der Trocknungszone kann nicht verlässlich gemessen werden. Aussagen über Temperatur- oder Speziesverteilung sind ebenfalls nur teilweise realisierbar. Deswegen kann das Modell weitgehend lediglich über Sekundäreffekte in der Art validiert werden, dass eine Übereinstimmung von Beobachtungen mit hoher Wahrscheinlichkeit die gleichen primären Effekte bedingt.

Validierungen können mit Laborversuchen und an realen Anlagen erfolgen.

4.3.3.1 Laborversuche

Das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) hat einen Versuch zu Abbrand und Temperaturleitung in die Schüttung zur Verfügung gestellt.

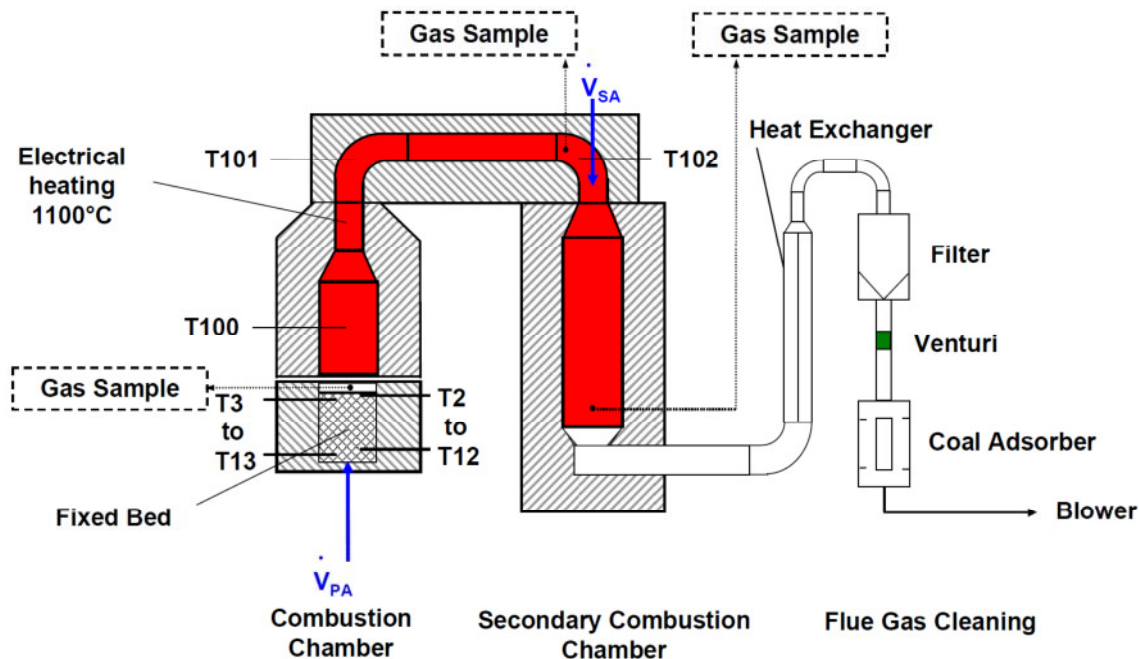


Abbildung 4.6: Labor-Festbettreaktor KLEAA

Die experimentellen Untersuchungen zur Charakterisierung der Abbrandeigenschaften fester Brennstoffe wurden am Festbettreaktor KLEAA durchgeführt. Das Volumen der zu untersuchenden Brennstoffschüttung beträgt ca. 10 l. Am Festbettreaktor KLEAA können somit im Vergleich zu thermogravimetrischen Verfahren, bei denen Probenmengen im Grammbereich eingesetzt werden, technische Brennstoffe mit einer Stückigkeit bis 10 cm untersucht werden. Der Feuerraum sowie die Nachbrennkammer können elektrisch auf maximal 1100 °C aufgeheizt werden. Die Primärluft wird von unten durch eine Sintermetallplatte zugeführt und kann auf maximal 300 °C vorgewärmt werden. Die Hauptkomponenten der Anlage sind schematisch in Abbildung 4.6 dargestellt. Zur Durchführung der Abbrandexperimente wird das verfahrbare Brennkammerunterteil, in dem sich die bei Umgebungstemperatur eingefüllte Brennstoffschüttung befindet, luftdicht mit dem Feuerraum verbunden. Die Brennstoffprobe wird durch die Strahlungswärme aus dem Feuerraum gezündet und brennt in entgegengesetzter Richtung zum Primärluftstrom ab. Die Konzentration der wesentlichen Rauchgas-komponenten wird an drei verschiedenen Messstellen entlang des Gasweges kontinuierlich gemessen (siehe Abbildung 4.7).

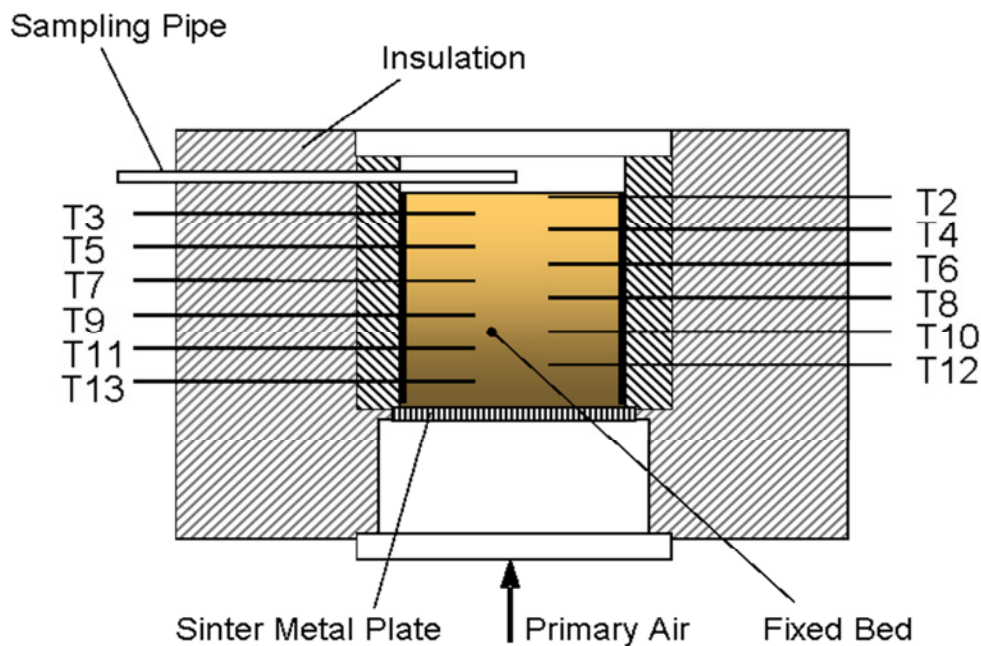


Abbildung 4.7: Anordnung der Thermoelemente

Die Temperaturen werden orts aufgelöst im Glutbett über der gesamten Betthöhe erfasst. Der Brennstofftopf sitzt auf einer Wägezelle, mit der die zeitliche Massenabnahme des Brennstoffes bestimmt werden kann. Zur optischen Bewertung des Feststoffabbrandes ist über der Brennstoffschüttung eine Kamera angebracht.

Besonders interessant ist der Messschieb der Temperaturen über die Zeit (Abbildung 4.8). Die 12 Temperaturen zeigen zu Anfang des Versuchs eine einheitliche Temperatur (Umgebungstemperatur). Mit dem Start des Versuches wird eine Strahlungsquelle oberhalb der Schüttung aktiviert, die die Oberfläche des Brennstoffes aufheizt. Hierdurch wird dieser zuerst getrocknet und zündet dann, was in dem Temperaturanstieg von T2 zu sehen ist. Die Schicht unterhalb dieses Thermoelements bleibt bei Umgebungstemperatur. Nach einer gewissen Zeit ist die obere Schicht abgebrannt und die Zone bei T3 zündet. Wieder ist zu erkennen, dass die darunter liegende Zone kalt bleibt. Dieses Verhalten bleibt bis zum Erreichen der untersten Zone erhalten.

Der Versuch zeigt zwei Effekte:

Zum einen wird deutlich, dass Zünden/Brennen in die Schüttung nicht stattfindet. Die Temperatur bleibt zwar nach Erreichen der 900 °C erhalten. Dies zeigt aber nicht, dass die Schüttung lokal bei der Temperatur verharrt und die Wärme nach unten in die Schüttung eindringt. Vielmehr ist nach dem Abbrand der entsprechenden Zone diese Zone leer, da der geringe Ascheanteil zusammenfällt, die Oberfläche der Schüttung nach unten wandert.

Zum anderen kann eine Aussage über die Wärmeleitung in die Schüttung getroffen werden. Es kann kein Anstieg der Temperatur der unteren Zonen vor Erreichen der Zündtemperatur festgestellt werden. Im vorliegenden Experiment wurde die Schüttung mit ca. 1 m/s angeströmt. Dies bedeutet, dass die Wärmeleitung in die Schüttung kleiner als die Konvektion ist.

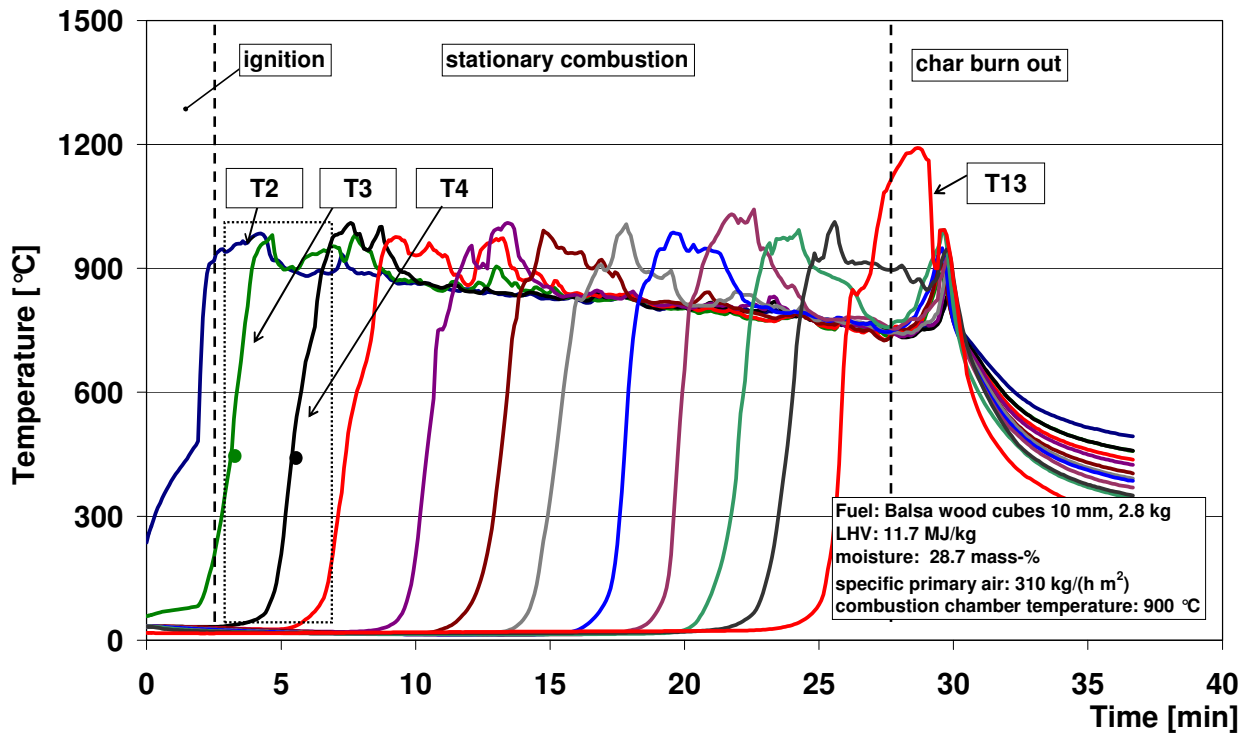


Abbildung 4.8: Temperaturen

Zur Validierung wurde das Experiment mit dem vorliegenden Programm nachgerechnet.

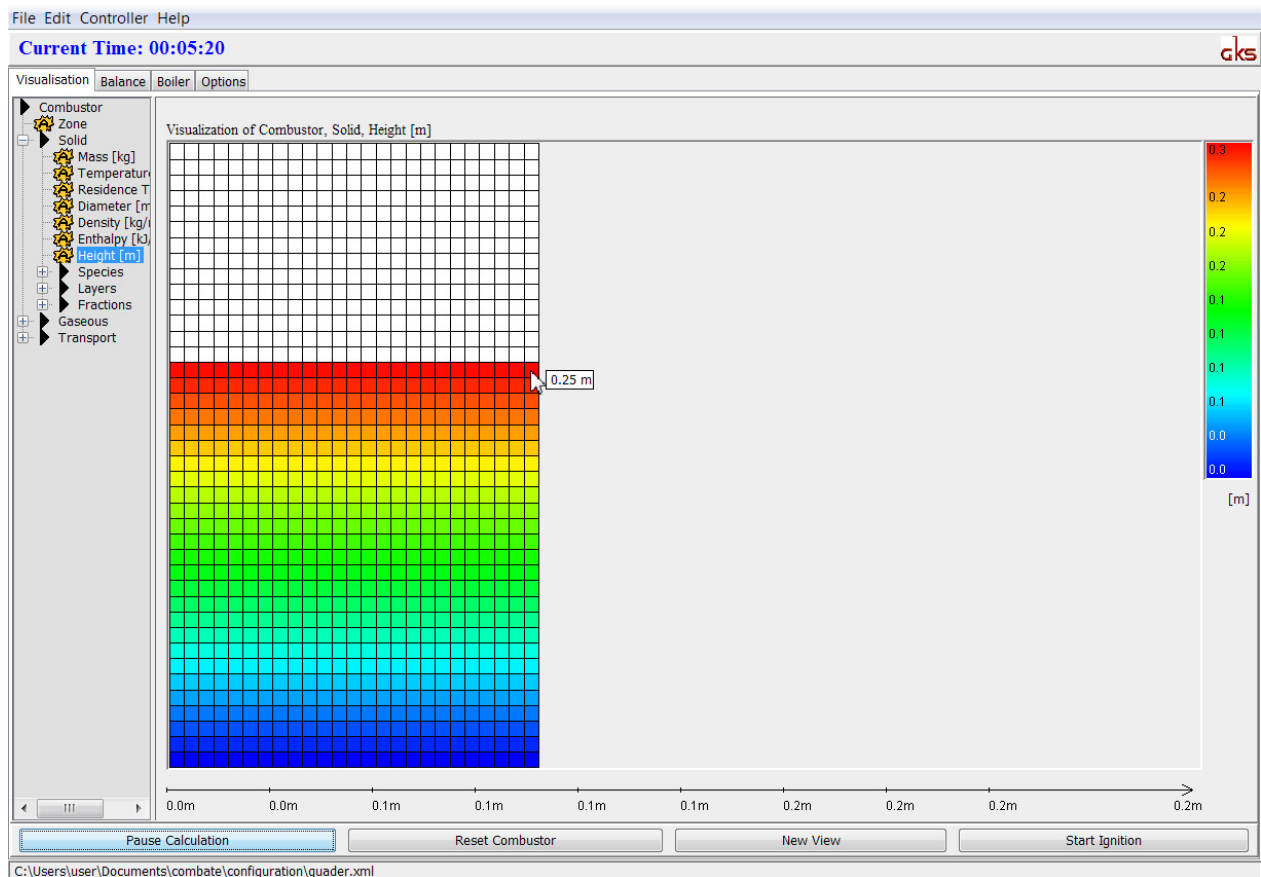


Abbildung 4.9: Versuch FZK in CombAte

Abbildung 4.9 zeigt die Anordnung des FZK-Versuches in CombAte. An der Oberfläche wurde analog zum Laborversuch eine Strahlungsquelle implementiert.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Feststofftemperaturen aufgetragen, die unter den Temperaturen des verbrannten Gases liegen müssen.

Abbildung 4.10 zeigt die ersten 10 Minuten. Zu Anfang wird der Feststoff aufgeheizt. Mit Erreichen der Zündtemperatur des Feststoffes wandert die Oberfläche langsam nach unten. Ein Erwärmen der unteren Schichten kann nicht festgestellt werden.

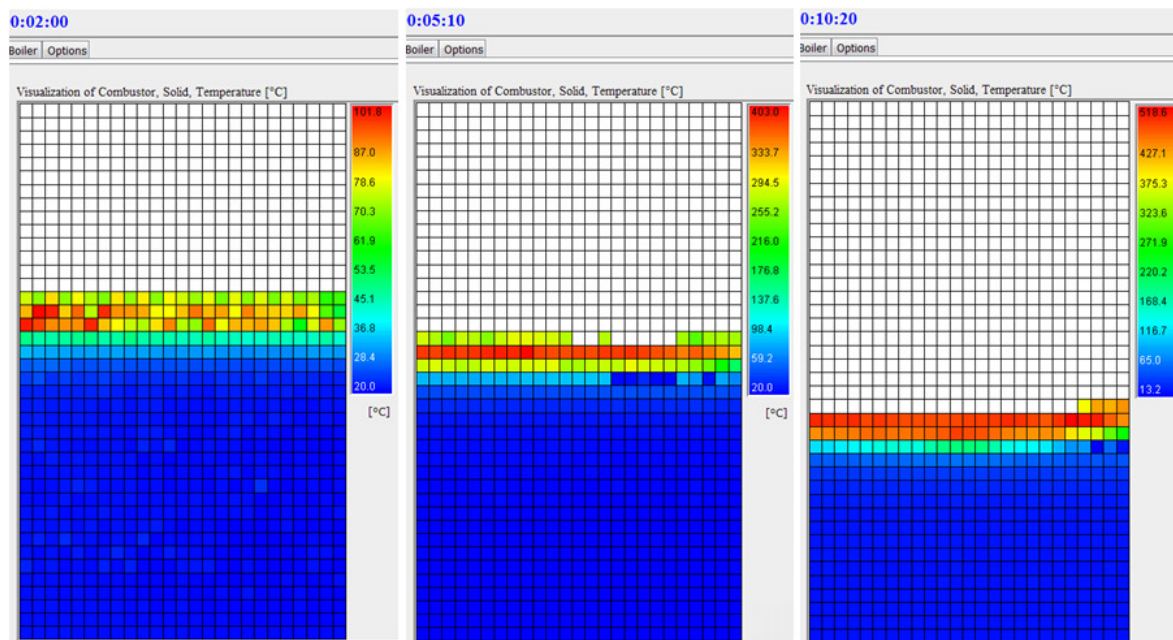


Abbildung 4.10: Versuch FZK in CombAte / Beginn

Nach 25 Minuten ist die Verbrennungszone am Boden angekommen, der Brennstoff ist umgesetzt. Die verbleibende Asche wird weiter angestrahlt und erreicht nahezu die Temperatur der Strahlungsquelle. Vergleicht man die Zeit mit dem Schrieb in Abbildung 4.11, kann sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden.

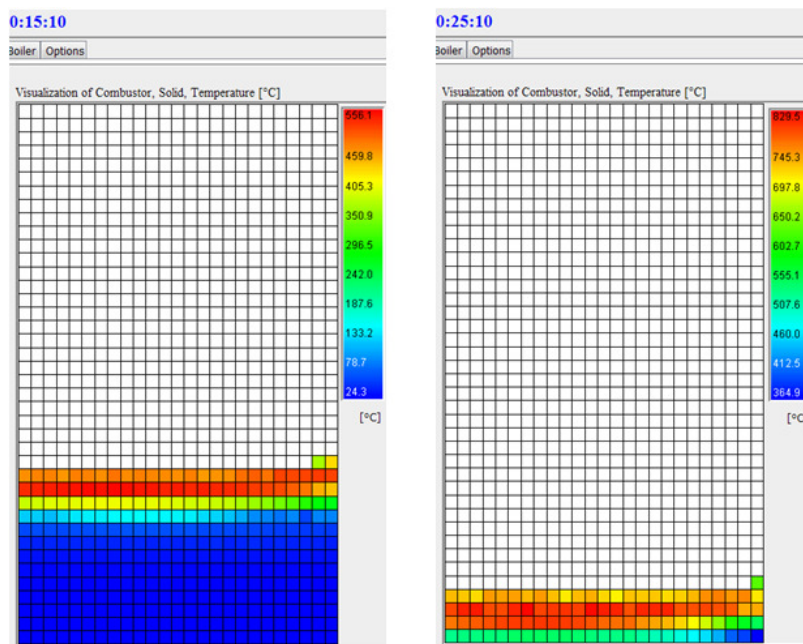


Abbildung 4.11: Versuch FZK in CombAte / 15 min und Versuchsende

Aus diesem Experiment können erste Rückschlüsse auf die Modellqualität für Strahlung, Wärmeleitung und Konvektion getroffen werden. Auch die Übereinstimmung der Abbrandgeschwindigkeit zeigt, dass Trocknung, Pyrolyse und Koksabbrand im CombAte-Modell sehr gut wiedergegeben werden.

4.3.3.2 Reale Anlage

Validierungen an realen Anlagen sind deutlich schwieriger.

Ein erster Versuch wurde mit der **Verweilzeit** auf dem sog. Ausbrandrost durchgeführt. Charakteristisch für diesen Bereich ist es, dass keine merklichen Flammen die Sicht behindern. Der Versuch gestaltet sich relativ einfach. Die geometrischen Abmessungen des Rostes sind bekannt. Durch die hinteren Schaugläser wird der Rost beobachtet. Findet sich ein Objekt wie z. B. eine Metalldose (siehe blaue Ellipse) am Anfang der Rostzone, wird die aktuelle Zeit festgehalten. Das Objekt wird beobachtet, bis es die betrachtete Zone verlässt. Es wird erneut die Zeit genommen. Die Differenz der beiden Zeiten ergibt die Verweilzeit in dieser Zone. Die Differenz von Zonenlänge und Verweilzeit ist die mittlere Geschwindigkeit in der Zone.

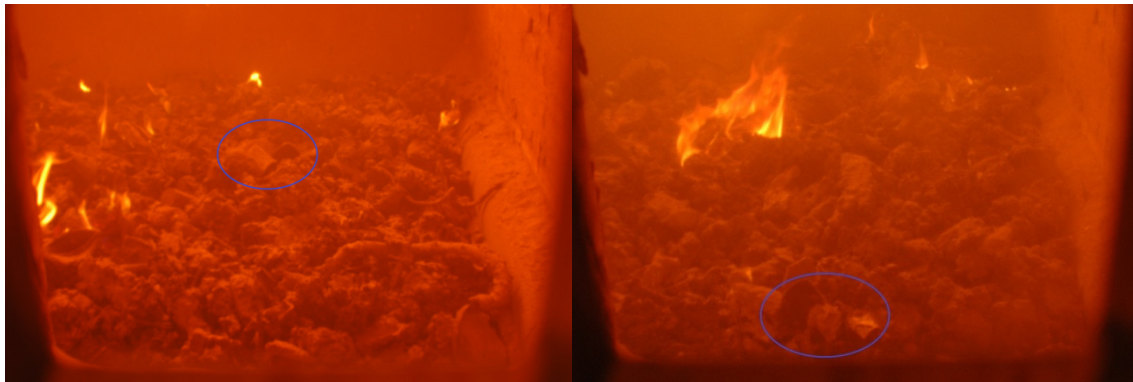


Abbildung 4.12: Versuch GKS / Verweilzeit in realer Anlage

Die gemessene Verweilzeit für diesen Rostabschnitt betrug ca. 30 min. Dieser Wert stimmt gut mit dem Wert aus der Simulation überein (Abbildung 4.13).

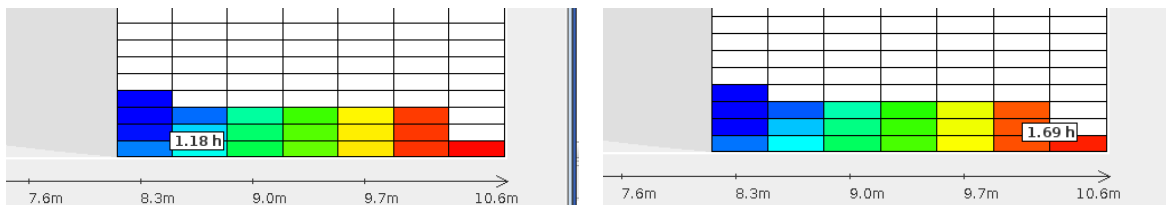
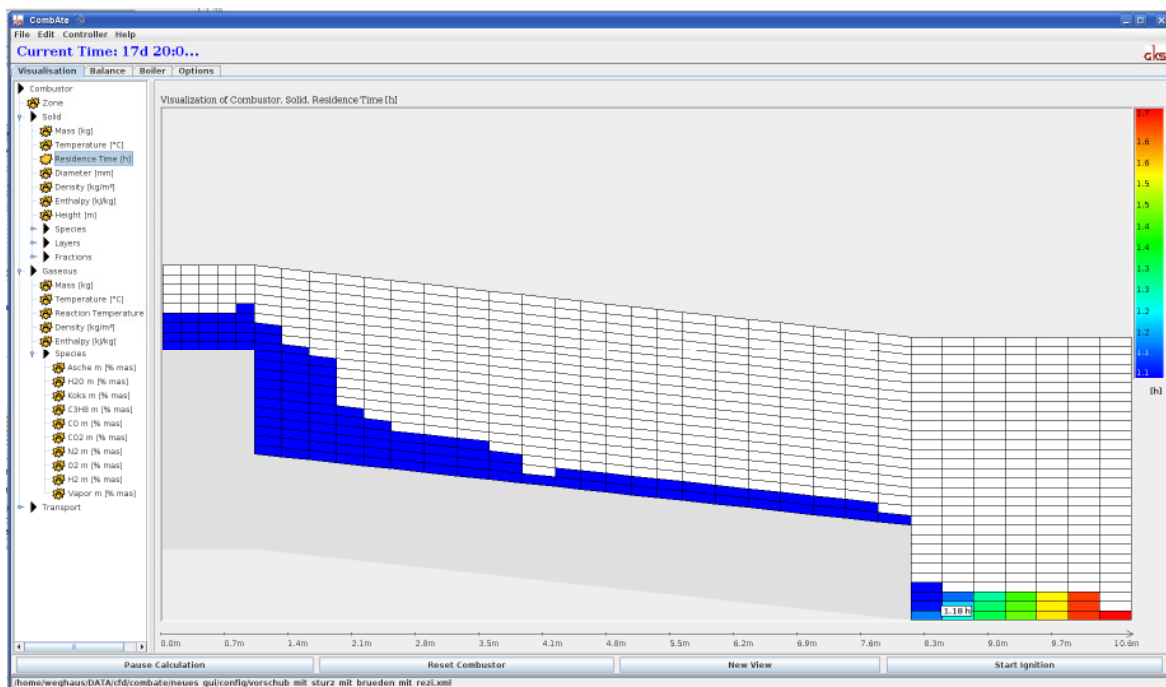


Abbildung 4.13: Versuch GKS / Verweilzeit und Schichthöhe (eine Zelle hat 10 cm Höhe) im Modell

Aus der korrekten Verweilzeit resultieren noch weitere Ergebnisse. Auf Rost 3 ist der Brennstoff nahezu komplett umgesetzt. Die Dichte der Schlacke ist bekannt, somit muss auch die Schütthöhe in diesem Abschnitt korrekt sein. Die Simulation zeigt hier eine Schütthöhe von ca. 20-25 cm. In Abbildung 4.14 lassen sich die seitlichen Verschleißsteine erkennen. Diese Verschleißsteine sind rund 20 cm hoch. Bis zur Unterkante der Verschleißsteine sind es gemessen ab Mitte Oberfläche-Roststab noch einmal etwa 20 cm. Man erkennt, dass das Schlacke-Müll-Gemisch bis etwa an die Unterkante der Verschleißsteine reicht und damit rund 20-25 cm hoch liegt. Damit zeigt auch diese Validierung, dass das Modell eine gute Übereinstimmung mit der Realität hat.



Abbildung 4.14: Versuch GKS / Schütthöhe auf Rost 2

4.3.4 OPC-Ankopplung

Zur Ankopplung des Programmpaketes CombAte an die Feuerungsregelung ist eine bidirektionale Schnittstelle erforderlich. OPC ist de Facto der Protokollstandard für industrielle Kommunikation. **OPC** ist eine Abkürzung für **OLE for Process Control**, wobei OLE für **Object Linking and Embedding** steht. Diese Ankopplung wurde schon mit dem Vorgänger-Programm getestet.

Im vorliegenden Projekt wurden Java-basierte Module getestet. Es wurde das Open Source Modul JEasyOPC gewählt, da einerseits alle Tests zufriedenstellend verliefen und der Quellcode offen liegt. Dies ist hinsichtlich der langfristigen Wartungsfreundlichkeit ein wichtiger Punkt.

JEasyOPC wurde für erste Tests in das Programmpaket integriert. Um die volle Ankopplung an den Feuerungsregler gewährleisten zu können, wurden im weiteren Projektverlauf vom User konfigurierbare Schnittstellen erstellt.

Über das OPC-Modul können dann alle Variable des Programmpaketes CombAte abgefragt werden. So können z. B. Informationen über lokale Schütthöhen, das Brennstoffinventar oder Feuerlage abgefragt und in der Regelung verarbeitet werden.

Weiterhin wird es möglich sein, das Programm von außen zu beeinflussen. So kann z. B. die Unterwind-Menge analog der realen Anlage geführt werden.

In der unten stehenden Abbildung 4.15 ist die Kopplung vom Feuerungsmodell mit der Feuerleistungsregelung schematisch dargestellt. Über OPC werden Daten bidirektional zwischen Feuerungsmodell und Feuerleistungsregelung ausgetauscht. Die Datenpunkte sind in der Tabelle in Abbildung 4.16 aufgelistet.

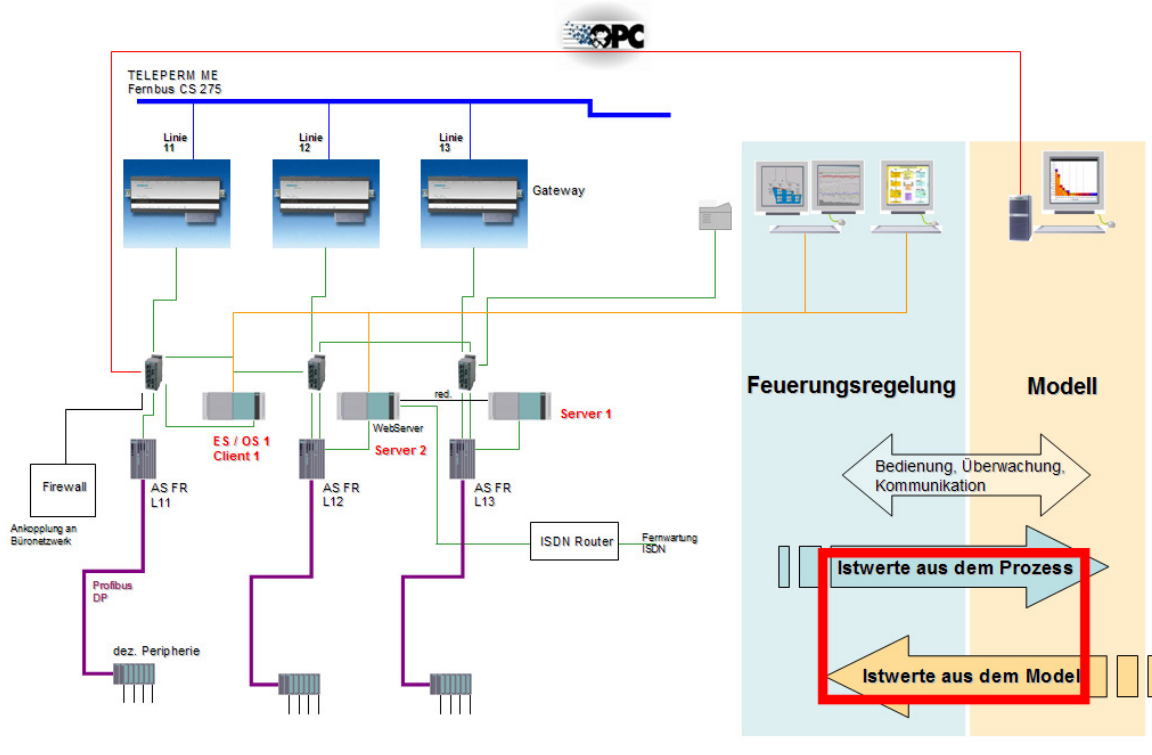


Abbildung 4.15: Kopplung FLR und Modell

Die Kopplung mit dem bestehenden Modell wurde erfolgreich getestet. Die Signalliste ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Das weiterentwickelte Feuerungsmodell wurde im weiteren Verlauf des Projekts ebenfalls angebunden. Diese Ankopplung ist im nächsten Abschnitt näher beschrieben.

In Abbildung 4.17 ist ein Bild des Aufbaus im GKS Schweinfurt zu sehen. Im linken Teil ist der Arbeitsplatz der FLR zu sehen und im rechten Teil der Rechner mit dem Feuerungsmodell.

Output		Input	
CombAte	FLR	CombAte	FLR
Steam [kg/s]	SIM_12LBA10CF901	Plattenluft Zone 1	12HLA41CF901/VAL.V
O2 RG [%-Vol.]	SIM_12HBK05CQ301	Plattenluft Zone 2	12HLA42CF901/VAL.V
Feuerraumtemperatur[°C]	12HBK02CT301	Plattenluft Zone 3	12HLA43CF901/VAL.V
		Plattenluft Zone 4	12HLA44CF901/VAL.V
Temperature Side Air 1 [°C]	12HHC31CT301/VAL.V	Plattenluft Zone 5	12HLA44CF901/VAL.V
Temperature Side Air 2 [°C]	12HHC31CT302/VAL.V		
Temperature Side Air 3 [°C]	12HHC31CT303/VAL.V	Unterwind Zone 1	12HLA21CF901/VAL.V
Temperature Side Air 4 [°C]	12HHC31CT304/VAL.V	Unterwind Zone 2	12HLA22CF901/VAL.V
Temperature Side Air 5 [°C]	nicht vorhanden	Unterwind Zone 3	12HLA23CF901/VAL.V
		Unterwind Zone 4	12HLA24CF901/VAL.V
Schuetthoehe 1	12HBK01CL951/VAL.V	Unterwind Zone 5	12HLA25CF901/VAL.V
Schuetthoehe 2	12HBK01CL952/VAL.V		
Schuetthoehe 3	12HBK01CL953/VAL.V	Rostgeschwindigkeit 1	12HHC21DG301/VAL.V
Schuetthoehe 4	12HBK01CL954/VAL.V	Rostgeschwindigkeit 2	12HHC21DG301/VAL.V
Schuetthoehe 5	12HBK01CL955/VAL.V	Rostgeschwindigkeit 3	12HHC22DG301/VAL.V
		Rostgeschwindigkeit 4	12HHC22DG301/VAL.V
		Rostgeschwindigkeit 5	12HHC23DG301/VAL.V
		Solid Charge (Aufgabe)	12HFB21DG301/VAL.V

Abbildung 4.16: Input und Output Variablen OPC bestehendes Modell



Abbildung 4.17: Aufbau Kopplung GKS

4.3.4.1 Kopplung neues Modell

Für die Kopplung des „neuen“ Modells wurde der Signalaustausch deutlich erweitert, was einen Zugewinn an Information sowohl auf FLR- als auch auf Modell-Seite bedeutet. Die verwendeten Signale sind in den Abbildung 4.18 und Abbildung 4.19 zu sehen. Unter anderem wurde ein so genanntes „Life Bit“ implementiert. Dies ermöglicht der FLR zu überwachen, ob die Kopplung und das Modell noch funktionsfähig sind. Sollte die Kopplung oder das Modell ausfallen, so kann die FLR die entsprechenden Regeleinflüsse deaktivieren.

OPC MODELL INPUT		
Nr.	Klartext	Tagname OPC
1	Primary Air Mass 2	12HLA21CF901/VAL.V
2	Primary Air Mass 3	12HLA22CF901/VAL.V
3	Primary Air Mass 4	12HLA23CF901/VAL.V
4	Primary Air Mass 5	12HLA24CF901/VAL.V
5	Primary Air Mass 6	12HLA25CF901/VAL.V
6	Frequency Inlet 1	12HFB21DG301/VAL.V
7	Grate Frequency 2	12HHC21DG301/VAL.V
8	Grate Frequency 3	12HHC21DG301/VAL.V
9	Grate Frequency 4	12HHC22DG301/VAL.V
10	Grate Frequency 5	12HHC22DG301/VAL.V
11	Grate Frequency 6	12HHC23DG301/VAL.V
12	ac1-Plattenluft-Mass 1	12HLA41CF901/VAL.V
13	ac1-Sekundärluft-Mass 1	12HLA03CF901/VAL.V
14	Heating Value 1	12HFB01FU931/VAL.V
15	Solid Mass Inlet 1	12HFB01CW901/VAL.V
16	Primary Air Mass 7	12HTA03CF301/VAL.V
17	Primary Air Mass 9	12HLA41CF901/VAL.V
18	Primary Air Mass 10	12HLA42CF901/VAL.V
19	Primary Air Mass 11	12HLA43CF901/VAL.V
20	Primary Air Mass 12	12HLA44CF901/VAL.V
21	ac1-Rezi 2-Mass 1	12HTA03CF301/VAL.V

Abbildung 4.18: Eingangsvariablen OPC Modell

OPC MODELL OUTPUT		
Nr.	Klartext	Tagname OPC
1	Dampfmassenstrom	12LBA10CF951/VAL.SIM_V
2	Sauerstoff	12HBK05CQ951/VAL.SIM_V
3	Feuerraumtemperatur 1	12HBK01CT951/VAL.SIM_V
4	Feuerraumtemperatur 2	12HBK01CT952/VAL.SIM_V
5	Feuerraumtemperatur 3	12HBK01CT953/VAL.SIM_V
6	Feuerraumtemperatur 4	12HBK01CT954/VAL.SIM_V
7	Feuerraumtemperatur 5	12HBK01CT951/VAL.SIM_V
8	Schichthöhe Zone 1	12HBK01CL951/VAL.SIM_V
9	Schichthöhe Zone 2	12HBK01CL952/VAL.SIM_V
10	Schichthöhe Zone 3	12HBK01CL953/VAL.SIM_V
11	Schichthöhe Zone 4	12HBK01CL954/VAL.SIM_V
12	Schichthöhe Zone 5	12HBK01CL955/VAL.SIM_V
13	Müllmassenstrom	MODELL_VARIABLE_1/VAL.SIM_V
14	Heizwert	MODELL_VARIABLE_2/VAL.SIM_V
15	Leistung	MODELL_VARIABLE_3/VAL.SIM_V
16	Rauchgasvolumenstrom	MODELL_VARIABLE_4/VAL.SIM_V
17	Primärluft (Unterwind)	MODELL_VARIABLE_5/VAL.SIM_V
18	Plattenluft 1	MODELL_VARIABLE_6/VAL.SIM_V
19	Plattenluft 2	MODELL_VARIABLE_7/VAL.SIM_V
20	Plattenluft 3	MODELL_VARIABLE_8/VAL.SIM_V
21	Plattenluft 4	MODELL_VARIABLE_9/VAL.SIM_V
22	Reziluft	MODELL_VARIABLE_10/VAL.SIM_V
23	Sekundärluft	MODELL_VARIABLE_11/VAL.SIM_V
24	Verbrennungstemperatur [Kesseleintritt]	MODELL_VARIABLE_12/VAL.SIM_V
25	Weg Aufgabe	MODELL_VARIABLE_13/VAL.SIM_V
26	Weg Rost 1	MODELL_VARIABLE_14/VAL.SIM_V
27	Weg Rost 2	MODELL_VARIABLE_15/VAL.SIM_V
28	Weg Rost 3	MODELL_VARIABLE_16/VAL.SIM_V
29	Wirkungsgrad	MODELL_VARIABLE_17/VAL.SIM_V
30	Geschwindigkeit Aufgabe	MODELL_VARIABLE_18/VAL.SIM_V
31	Geschwindigkeit Rost 1	MODELL_VARIABLE_19/VAL.SIM_V
32	Geschwindigkeit Rost 2	MODELL_VARIABLE_20/VAL.SIM_V
33	Geschwindigkeit Rost 3	MODELL_VARIABLE_21/VAL.SIM_V
34	Solid Asche at Cell [31,0,1]	MODELL_VARIABLE_22/VAL.SIM_V
34	Life Bit	MODELL_VARIABLE_30/VAL.SIM_V

Abbildung 4.19: Ausgangsvariablen OPC Modell

4.4 Feuerungsregelung

In diesem Abschnitt wird die im GKS Schweinfurt eingesetzte Feuerungsregelung (FLR) beschrieben. Dies ist notwendig, um die verschiedenen Integrationsmöglichkeiten und die Ansätze zur Optimierung in den folgenden Abschnitten besser erläutern zu können.

Die hier eingesetzte grundlegende Feuerleistungsregelung wurde von Firma SAR entwickelt und ist patentrechtlich geschützt.

4.4.1 Allgemeiner Aufbau

Die gesamte FLR kann über die Bedienoberfläche des Leitsystems bedient bzw. parametrierbar werden. Die Regelung ist grundsätzlich in zwei Bereiche aufgeteilt:

- Transport (Beschickung, Rost)
- Luft (Unterwind, Plattenluft, Sekundärluft, Rezi)

Diese sind jeweils in die drei Unterbereiche aufgeteilt:

- Basistabellen
- Vertrimmungen
- Gewichtungen, Regler, Korrekturfaktoren

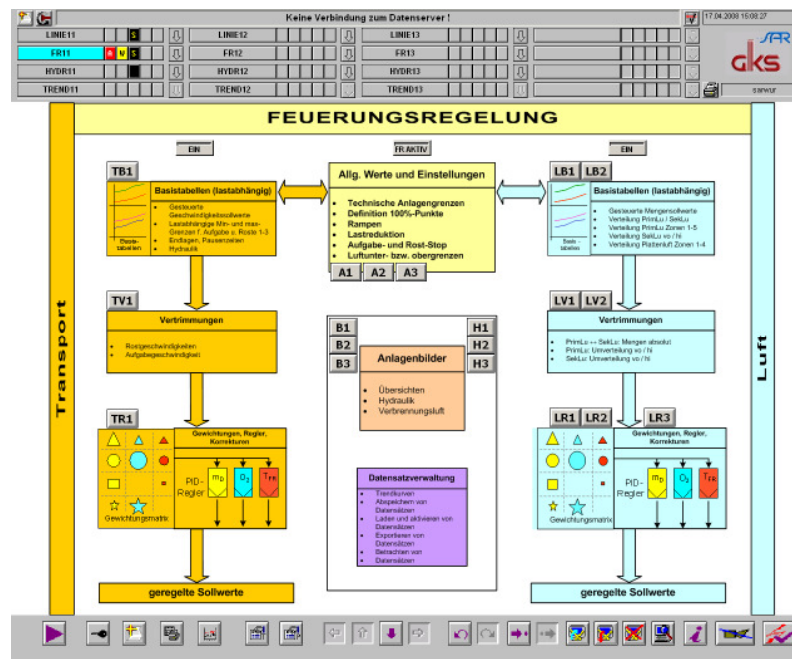


Abbildung 4.20: Übersicht Feuerleistungsregelung

In den **Basistabellen** sind Basissollwerte für die einzelnen Lastpunkte vorgegeben. Der Lastpunkt wird als Solldampfmenge in t/h definiert. Mit den in der Tabelle angegebenen Grundsollwerten ist unter normalen Bedingungen ein eingeschränkter Betrieb der Feuerung möglich. Wichtige Basiswerte (Luftmengen, Aufgabe- und Rostgeschwindigkeit) werden bei aktiver FLR über Korrekturregeleinflüsse zusätzlich angepasst. Liegt die vom Bedienungspersonal eingegebene Solldampfmenge zwischen den einzelnen Lastpunkten, so werden die Basiswerte durch Interpolation ermittelt. Zusammengefasst können die Basistabellen als die Eckpunkte verstanden werden, zwischen denen die Feuerung funktionieren muss – sowohl bzgl. der unterschiedlichen Soll-Feuerungswärmeleistungen als auch dem jeweils abzufahrenden Heizwertband.

Das Tabellenbeispiel (Abbildung 4.21) zeigt die Einstellmöglichkeiten für die Müllaufgabe (Beschickung). In den Reihen Hubfrequenz Max. und Min. werden die Geschwindigkeiten für die einzelnen Lastfälle angegeben. Die tatsächlich aktiven Werte für Hubfrequenz Max u. Min sind in der Spalte „AKTUELL“ dargestellt. Das Beispiel zeigt das Ergebnis für den Lastfall 22 t/h.

Der resultierende Grundsollwert (Abbildung 4.22) für die Aufgabegeschwindigkeit entsteht durch Mittelwertbildung aus aktuellen Maximal- und Minimalwert und wird von den Korrekturreglern als Basiswert verwendet.

		LAST 1	LAST 2	LAST 3	LAST 4	LAST 5	LAST 6	LAST 7	LAST 8	AKTUELL	
Lastpunkt	%	60,0	70,0	80,0	90,0	95,0	100,0	105,0	110,0	88,0	%
	t/h	15,0	17,5	20,0	22,5	23,8	25,0	26,3	27,5	22,0	t/h
AUFGABE	Hubfrequenz Max.	dH/h	6,0	6,5	7,0	7,8	8,5	9,2	9,2	7,6	dH/h
	Hubfrequenz Min.	dH/h	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	dH/h
	Wendepunkt vorn	%	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	%
	Wendepunkt hin.	%	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	%
	Pausenzeit	s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	s

Abbildung 4.21: Basistabelle Müllaufgabe

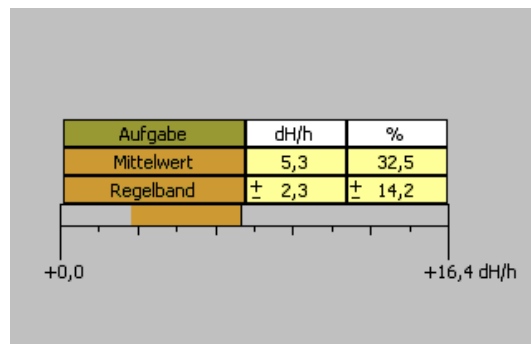


Abbildung 4.22: Mittelwerte aus Basistabelle

Mit Hilfe der **Vertrimmungen** ist es für das Bedienpersonal möglich, ohne aufwendiges Verändern der Parameter, in die Regelung einzugreifen. So kann z. B. der Transport zwischen langsam und schnell vertrimmt werden, ohne dass die überlagerten Regelkreise dadurch negativ beeinflusst werden. Wird beispielsweise bemerkt, dass tendenziell zu wenig Müll aufgegeben wird, so kann in Richtung „schneller“ vertrimmt werden. Auf diese Weise kann die Regelung an die veränderlichen Müllzusammensetzungen und Umgebungsbedingungen angepasst werden.

Aufgabe Hubfrequenz

Basiswerte

Min.	2,0	dH/h	Mittelw.	4,0
Max.	6,0	dH/h	Regelb.	± 2,0

Vertrimmung

langsamer
◀▶
schneller

+0 %

Werte nach Vertrimmung

Min.	2,0	dH/h	Mittelw.	4,0
Max.	6,0	dH/h	Regelb.	± 2,0

Abbildung 4.23: Vertrimmung Aufgabe

Anmerkung: Grundsätzlich ist es natürlich die Aufgabe der FLR die Parameter der Feuerung an die veränderlichen Müllzusammensetzungen anzupassen. Zum einen kann es jedoch durchaus Betriebssituationen geben in denen es Sinn macht, dass die Heizer manuell „nachhelfen“ und zum anderen ist auch aus psychologischer Sicht nicht zu vernachlässigen, dass manuelle Eingriffsmöglichkeiten für die Heizer bestehen. Die Anwendung der Vertrimmungen ist ein „kann“ und kein „muss“. Richtig angewandte Vertrimmungen können die Qualität der Feuerung weiter verbessern.

Im Bereich **Regler** können die einzelnen Regler angepasst und beobachtet werden. Die Abbildung 4.24 zeigt die Bedienoberfläche der bestehenden Regelung. Die einzelnen Regler nehmen über Gewichtungen Einfluss auf die einzelnen Stellgrößen.

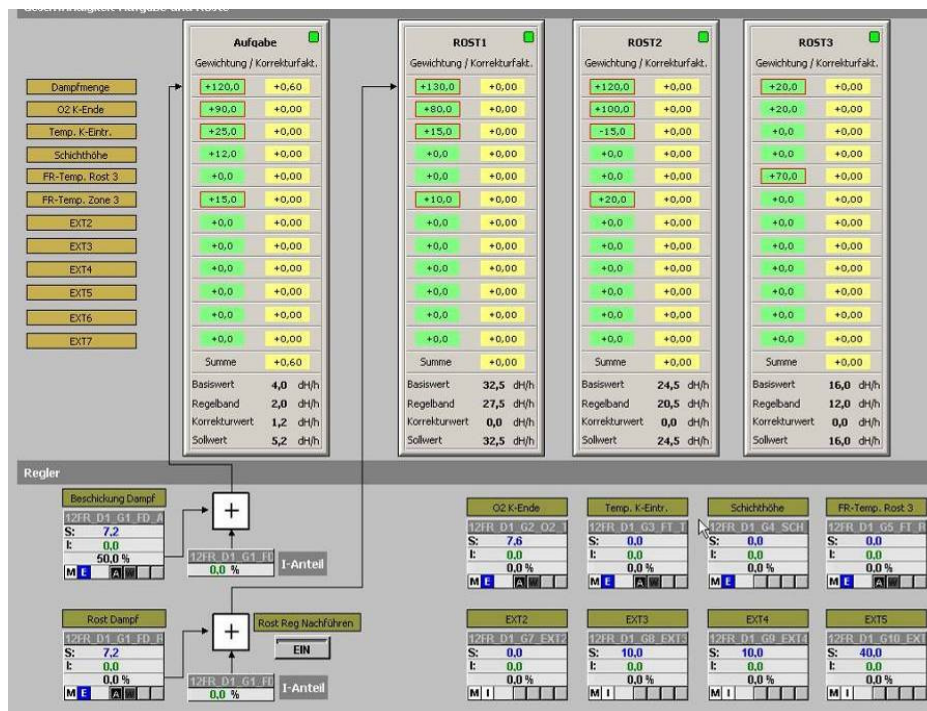


Abbildung 4.24: Regler Aufgabe und Rost

Ist das Feld für die Gewichtung rot umrandet, so ist der jeweilige Regler aktiv. Diese sind im GKS Schweinfurt als reine P oder PI-Regler parametrisiert. Die Stellgrößen der einzelnen Regler haben den Bereich -100% bis 100%. Alle Stellgrößen werden im Reglergewichtungsbaustein zusammengefasst (Abbildung 4.25).

In diesem Fenster ist es möglich, die einzelnen Regler zu aktivieren, Gewichtungen und MIN- bzw. MAX-Grenzen für die Korrekturfaktoren einzustellen. Die einzelnen sich aus den Stellgrößen ergebenden Korrekturfaktoren werden addiert und mit dem Regelband, welches sich aus der Basiswerttabelle ergibt, multipliziert. Anschließend wird dieser Wert zum Mittelwert aus der Basiswerttabelle für den jeweiligen Lastfall addiert. Dieser Wert wird durch MIN- und MAX-Grenzen in einem aus der Basiswerttabelle abgeleiteten Bereich gehalten. Als Endergebnis gibt die FLR den jeweils geregelten Wert eines jeden Stellgliedes aus.

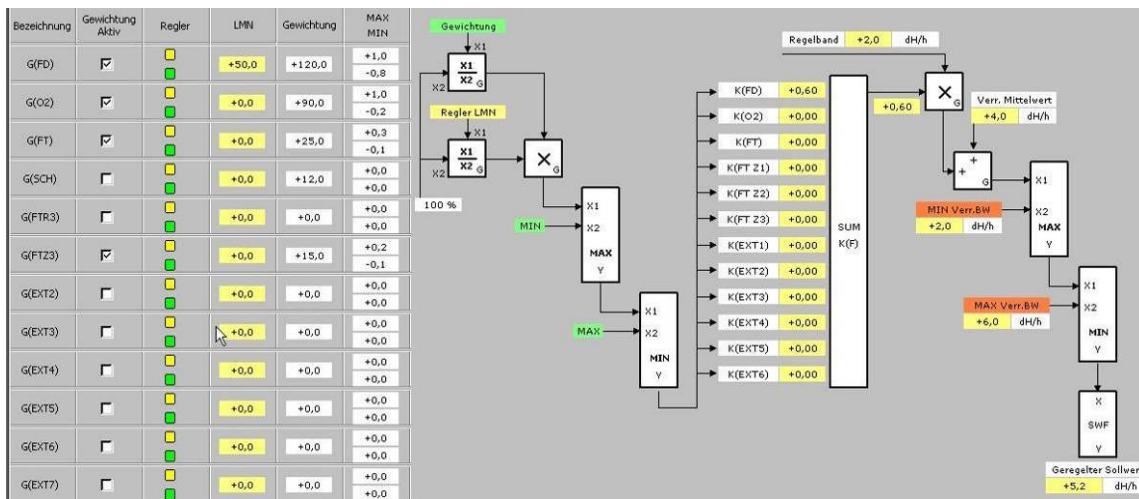


Abbildung 4.25: Bedienfenster des Reglergewichtungsbausteins

4.4.2 Regelgrößen

Die Regelgrößen werden mit Hilfe von verschiedenen Sensoren gemessen. Diese werden aufgeteilt in primäre und sekundäre Regelgrößen.

Primäre Regelgröße

- Dampfleistung

Sekundäre Regelgrößen

- Feuerraumtemperaturen
- Sauerstoffgehalt (O₂) Rauchgas Kesselaustritt

4.4.3 Stellgrößen

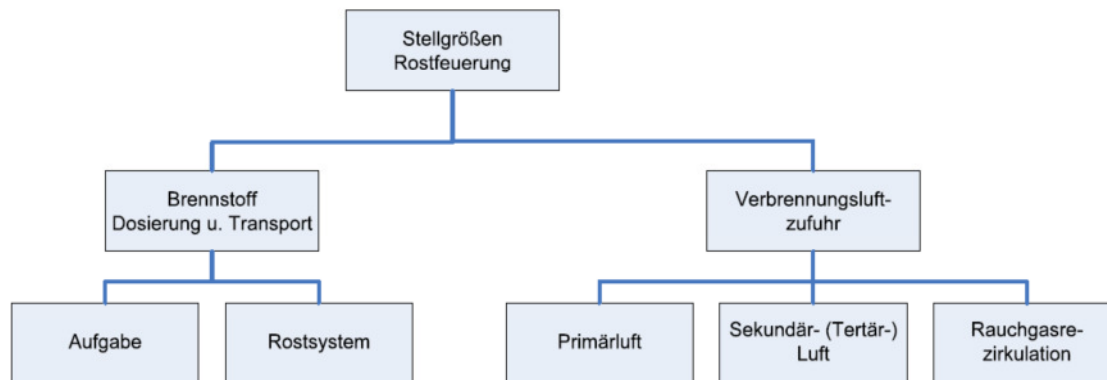


Abbildung 4.26: Übersicht Stellgrößen

Wie in Abbildung 4.26 zu sehen ist, teilen sich die Stellgrößen der Rostfeuerung in den Bereich Brennstoff-Dosierung und -Transport und in den Bereich Verbrennungsluftzufuhr auf. Mit Hilfe der Aufgabe wird die Müllmenge, die auf den Rost befördert wird, definiert. Diese wird mit der Einheit Doppelhübe pro Stunde (dH/h) vorgegeben. Die Definition eines Doppelhubes ist ein Vorhub und ein Rückhub eines hydraulischen Antriebes - entweder des Rostes oder der Aufgabevorrichtung.

Das Rostsystem übernimmt den Transport des Brennstoffes innerhalb des Ofens. Dieser ist wiederum in einzelne Rostzonen aufgeteilt. Für jede Zone kann eine eigene Transportgeschwindigkeit vorgegeben werden (dH/h). Die Umsetzung der von der FLR vorgegebenen Doppelhubanzahl in tatsächliche Bewegung der Antriebe erfolgt durch eine komplexe Ansteuerung (Gleichlaufregelung mit überlagerter Lageregelung) der Proportionalventile der Rosthydraulik. Da die korrekte Umsetzung der Hub-Sollwerte für die Rosthydraulik essentiell

für die optimale Funktion der FLR ist, wird die Ansteuerung und Regelung der einzelnen Antriebe zur Rosthydraulik als integraler Bestandteil der Feuerungsregelung verstanden.

Im Bereich Verbrennungsluft können verschiedene Luftmengen vorgegeben werden. Die Primärluft teilt sich auf in Unterwind und Plattenluft, welche jeweils wieder in mehrere Zonen aufgeteilt sind. Der Unterwind wird durch die Roststäbe in den Verbrennungsraum eingebracht. Die Plattenluft oder auch Seitenwandluft genannt ist dafür zuständig, die Konstruktion des Ofens zu kühlen und Anbackungen an der Ofenwand zu verhindern. Die Sekundärluft wird an der Vorderwand- und Rückwand-Seite im Kesselzug eingebracht, um die Rauchgase zu durchmischen und nachzuverbrennen.

In Abbildung 4.27 sind die einzelnen Luftmengen an einem Bild der Visualisierung dargestellt.

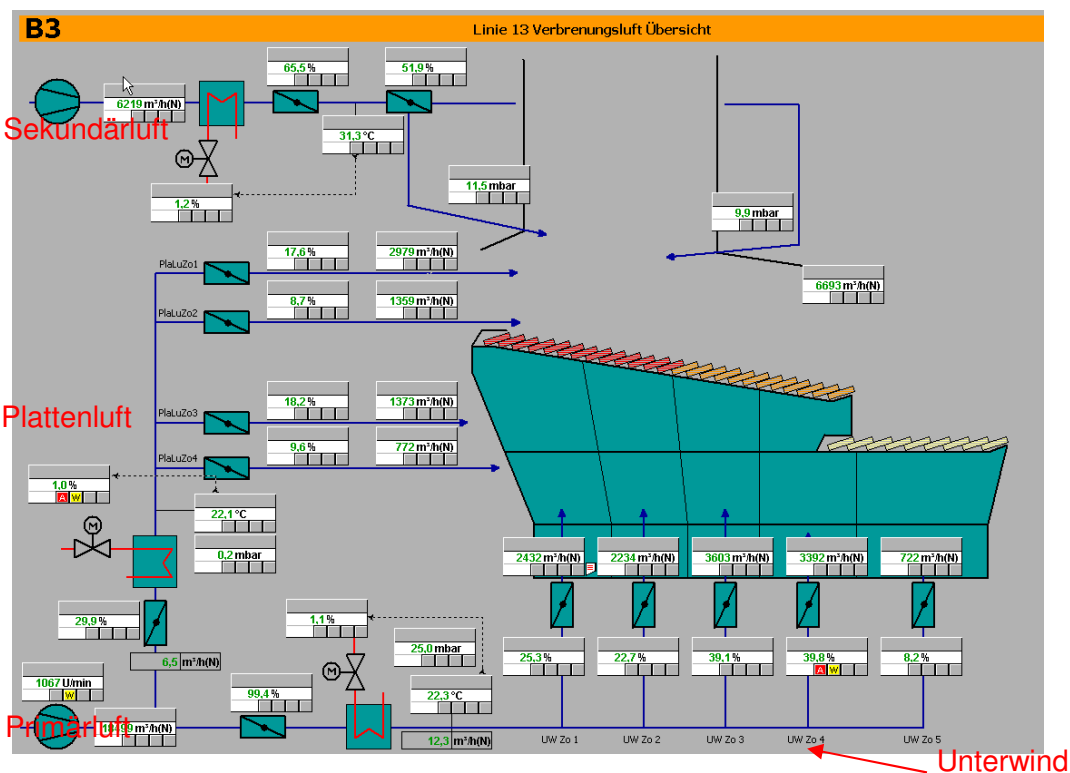


Abbildung 4.27: Übersicht Verbrennungsluft

Abbildung 4.28 zeigt die Stellgrößen der Feuerleistungsregelung im Einzelnen. Diese stehen zur Verfügung, um eine möglichst optimale Verbrennung herbeizuführen.

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		Umverteilung Sekundärluft
Anzahl:	4	10	2

Abbildung 4.28: Übersicht der einzelnen Stellgrößen

4.4.4 MPC

Der in der APC Bibliothek von Siemens enthaltene MPC stellt einen „schmalen“ modellbasierten prädiktiven Regler dar. Er basiert auf dem DMC-Algorithmus (Dynamic Matrix Control). Der Name ist darauf zurückzuführen, dass der Regler die Sprungantwort des Systems in Form einer Matrix enthält. Anders als bei bisherigen MPC, die auf separaten Rechnern außerhalb des Leitsystems arbeiten, ist dieser Regler in vorteilhafter Ausprägung komplett in das Leitsystem integriert. Der Algorithmus wird vollständig in der AS abgearbeitet. Es handelt sich dabei um einen Mehrgrößenregler. Dieser kann mit bis zu vier Regelgrößen und Stellgrößen beschaltet werden. Zusätzlich kann noch eine messbare Störgröße verwendet werden. Im Vergleich zu herkömmlichen PID-Reglern ist die benötigte Zykluszeit etwa drei bis viermal so lang, da im Algorithmus große Matrizen multipliziert werden müssen. Daher ist der MPC sehr „ressourcenhungrig“ und eher ungeeignet für schnelle Regelanforderungen.

Im Gegensatz zu den „großen“ MPC-Systemen, welche - vergleichbar mit einem Schachcomputer - ständig versuchen ein Optimum zu finden, wird bei diesem MPC das Optimierungsproblem einmalig und bereits in der Entwurfsphase gelöst.

4.4.4.1 Mögliche Strecken

- Müllaufgabe
- Rost

- Verbrennungsluft/Unterwind

Die oben aufgelisteten Regelstrecken unterscheiden sich grundsätzlich durch die deutlich unterschiedlichen Totzeiten und die immer unterschiedliche Sprungantwort in Abhängigkeit der (unbekannten) Brennstoffzusammensetzung.

Alle drei Stellgrößen haben als primäre Regelgröße den produzierten Dampfmassenstrom (ugs. Dampfmenge).

Die längste Totzeit im Bereich von ca. 15 Minuten ist bei der Müllaufgabe zu erwarten.

Eine deutlich schnellere Reaktion der Dampfmenge ist bei Veränderung der Verbrennungsluftmenge zu erwarten (< 4 Minuten). Die Reaktionsgeschwindigkeit auf Veränderung der Rostbewegung ist im mittleren Bereich zu erwarten (ca. 10 Minuten).

Im Rahmen der Versuche am GKS sollen die eben beschriebenen Strecken angeregt werden und anschließend ein Modell erstellt werden, welches dann vom MPC verwendet wird.

4.4.4.2 Integrationsmöglichkeiten in die bestehende FLR

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den MPC in die bestehende FLR zu integrieren. Die beiden wesentlichen und daher geplanten Möglichkeiten sind:

1. **MPC als unabhängiger Regler** für einzelne Regelgrößen bzw. Stellgrößen. Ersatz eines kompletten PID-Regelkreises inklusive Gewichtungen und Basiswert. Es werden nur die Grenzen aus den Basiswerttabellen verwendet.
2. Einsatz als **Korrekturregler** entsprechend dem PID-Regelungskonzept. Es wird der bestehende PID durch den MPC ersetzt.

Bei Möglichkeit 1 ist noch zusätzlich denkbar, den Regler in einer Trajektorienregelung einzusetzen. Dabei werden die Vorteile einer Steuerung geschickt mit den Vorteilen einer Regelung kombiniert.

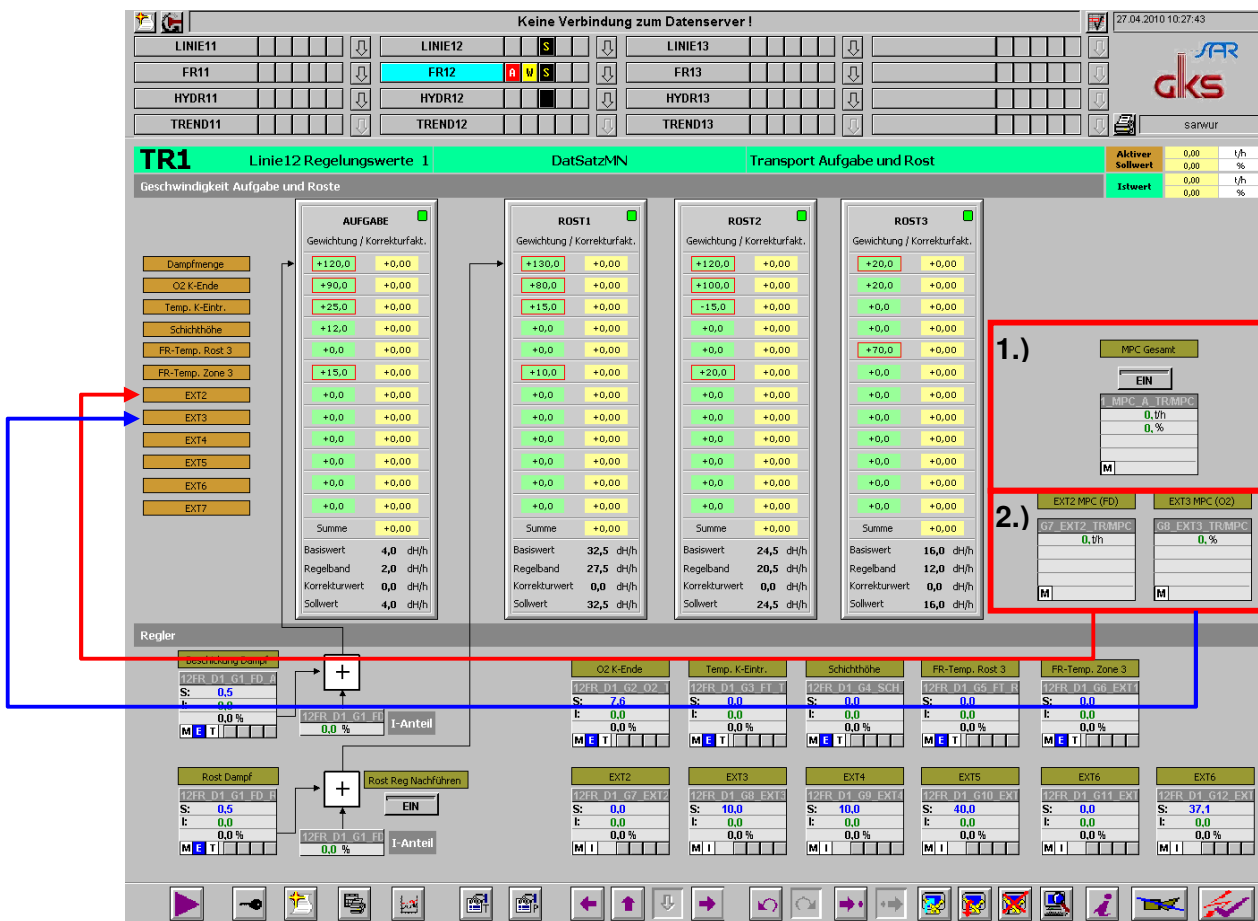


Abbildung 4.29: Integration MPC Transport

4.4.4.3 Entwurf mit dem Tool ModPreCon

Mit Hilfe des Tools ModPreCon kann das Modell der Strecke erstellt und anschließend der Regler entworfen werden. Dafür ist es notwendig, die Sprungantworten der Strecke aufzunehmen. Im CFC-Editor ist eine Trendanzeige enthalten (Abbildung 4.30), mit der die erforderlichen Regelgrößen (CV), Stellgrößen (MV) und messbare Störgrößen aufgezeichnet werden können.

Um aus der Messreihe ein Modell erstellen zu können, muss das System angeregt werden. Dies erfolgt durch einen Stellwertsprung (MV) oder in speziellen Fällen durch einen Sprung des Sollwerts (SP).

Für die Aufnahme der Sprungantwort sind gewisse Rahmenbedingungen gegeben:

- Die Anregung sollte sowohl in positiver als auch in negativer Richtung um den Arbeitspunkt erfolgen.
- Zum Zeitpunkt des Sprunges muss sich der Prozess in einem möglichst stabilen und eingeschwungenen Zustand befinden.
- Die Sprünge sollten dabei ausreichend groß sein.
- Sie sollten den Arbeitsbereich umfassen, der im normalen Anlagenbetrieb üblich ist.
- Sinnvoll ist es auch verschiedene Reihen mit unterschiedlichen Sprunghöhen aufzuzeichnen.
- Zwischen den Sprüngen muss immer abgewartet werden, bis sich ein neuer stationärer Zustand eingestellt hat.
- Die Stellgrößen sollten nacheinander angeregt werden.

Allein die o.g. Anforderungen bei dem inhomogenen Brennstoff zu erfüllen, gestaltete sich als äußerst anspruchsvolle und zeitaufwändige Aufgabe.

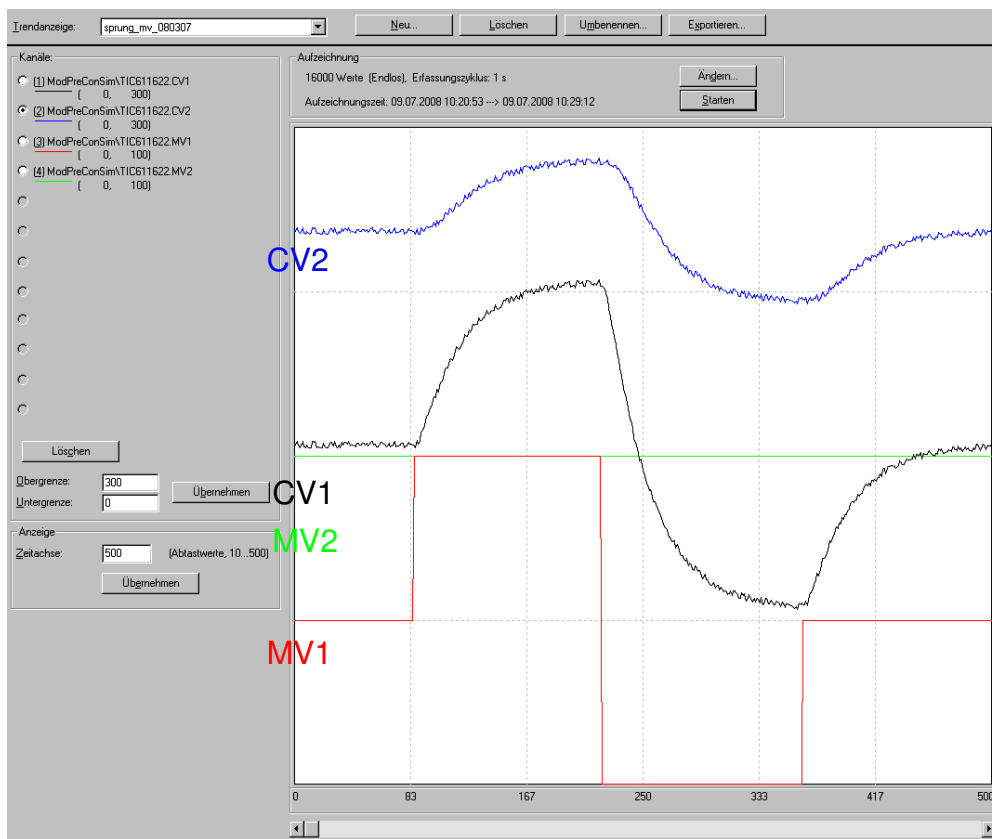


Abbildung 4.30: Trendanzeige im CFC

Abbildung 4.30 zeigt eine mit Hilfe der CFC-Trendanzeige erstellte Aufzeichnung. Als Strecke wurde dabei die im nächsten Kapitel vorgestellte Temperaturregelstrecke verwendet. Es sind die beiden Regelgrößen CV1, CV2 und die Stellgrößen MV1 und MV2 dargestellt. Im dargestellten Bereich wurden Sprünge auf die Stellgröße MV1 (rote Linie) gegeben.

Nach der Aufzeichnung können die Daten im CSV-Format exportiert werden. Der Aufbau der CSV-Datei ist in Abbildung 4.31 dargestellt.

```

"Trendanzeige:" "C:\SIMATIC 400(1)\CPU 416-2 DP\sprung_mv_080307"
"Beginn der Aufzeichnung: " "20.11.2007 00:00:00"
"Ende der Aufzeichnung: " "20.11.2007 16:29:00"

"Anzahl aufgezeichneter werte: " "990"

"" "Istwert_FD" "O2" "Temperatur_Feuerraum" "Rost_1"
"20.11.2007 00:00:00" "25,08" "6,40" "1052,09" "22,33"
"20.11.2007 00:01:00" "25,08" "6,96" "1058,10" "26,21"
"20.11.2007 00:02:00" "25,14" "6,62" "1060,26" "21,33"
"20.11.2007 00:03:00" "25,32" "6,91" "1089,75" "20,40"
"20.11.2007 00:04:00" "25,40" "6,64" "1070,35" "12,73"
"20.11.2007 00:05:00" "25,20" "7,15" "1058,40" "19,49"
"20.11.2007 00:06:00" "24,95" "7,88" "1084,96" "37,53"
"20.11.2007 00:07:00" "25,03" "6,98" "1087,43" "29,76"
"20.11.2007 00:08:00" "25,13" "6,63" "1102,52" "22,27"
"20.11.2007 00:09:00" "25,26" "6,41" "1070,84" "16,02"
"20.11.2007 00:10:00" "25,24" "6,87" "1041,69" "18,95"
"20.11.2007 00:11:00" "25,09" "7,69" "1037,16" "31,55"
"20.11.2007 00:12:00" "25,22" "7,40" "1046,97" "28,81"
"20.11.2007 00:13:00" "25,12" "7,02" "1024,11" "25,36"
"20.11.2007 00:14:00" "24,95" "7,47" "1030,81" "35,83"
"20.11.2007 00:15:00" "24,83" "7,22" "1029,34" "39,89"
"20.11.2007 00:16:00" "24,98" "6,70" "1026,76" "32,04"
"20.11.2007 00:17:00" "25,00" "7,37" "1048,45" "35,50"
"20.11.2007 00:18:00" "25,03" "7,31" "1022,66" "33,88"
"20.11.2007 00:19:00" "25,04" "7,64" "1028,49" "37,50"
"20.11.2007 00:20:00" "25,14" "7,24" "1000,54" "30,68"
    
```

Abbildung 4.31: Aufbau der CSV-Datei

Dieses Format muss eingehalten werden, damit der Import in das ModPreCon-Tool später möglich ist. Sollen andere Quellen als die CFC-Trendanzeige herangezogen werden, so ist es möglich z. B. mit Excel die CSV-Datei selbst zu erzeugen. Dabei ist es wichtig, dass die Abtastzeitpunkte äquidistant sind. Genauso muss die Angabe „Anzahl aufgezeichneter Werte“ richtig sein. In der Zeile darunter sind die Bezeichnungen der einzelnen Messreihen anzugeben.

Wird das Format eingehalten, so können Daten aus beliebigen Quellen in das ModPreCon-Tool importiert werden.

ModPreCon basiert auf einem Programmteil aus MATLAB, genannt „System Identifikation“. Mit Hilfe dieses Programms wird der Regler entworfen. Nach Aufruf des Programms müssen die Daten aus der CSV-Datei eingelesen werden. Ist der Import der Daten durchgeführt, sind die jeweiligen Regelgrößen, Stellwerte und falls vorhanden die Störgröße festzulegen. Dies erfolgt im Bereich Rohdaten mit Hilfe der Pulldownmenüs neben den Diagrammen. Sollten bestimmte Größen doch nicht benötigt werden, können diese auf „nicht relevant“ gesetzt werden. Es ist auch möglich, mehrere Messreihen zu laden. Durch Klicken mit der rechten Maustaste auf das Bedienfenster werden die aktuellen Einstellungen zu gespeichert.

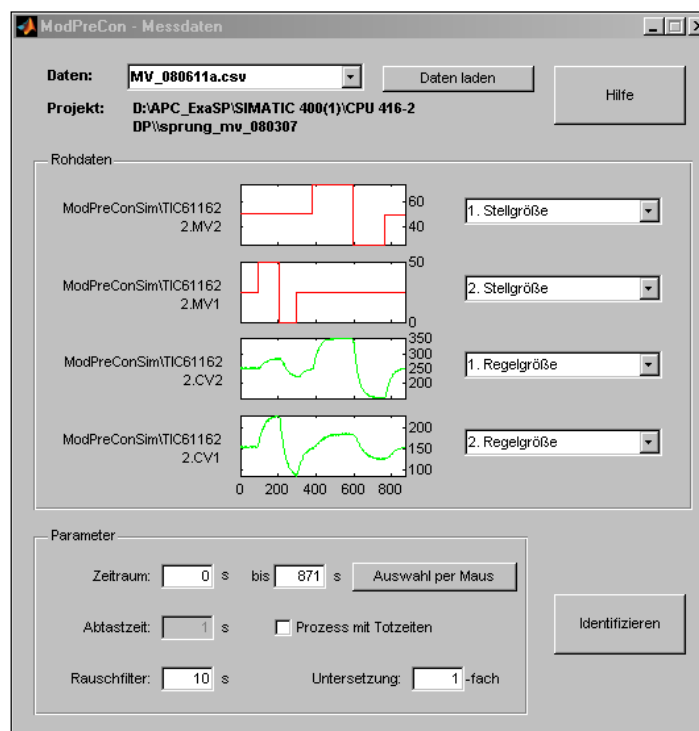


Abbildung 4.32: Messdaten einlesen

Im Bereich „Parameter“ sind weitere Einstellungen möglich. So können Totzeiten im Prozess berücksichtigt werden. Falls den aufgezeichneten Signalen ein Rauschen überlagert ist, ist es sinnvoll den Rauschfilter einzusetzen. Dieser Rauschfilter ist ein PT1-Filter. Dadurch kann eine Verbesserung der Modellgüte erzielt werden, jedoch kann es auch dazu führen, dass Informationen über den Prozess verloren gehen. Mit der Option „Untersetzung“ kann die Anzahl der für das Modell verwendeten Daten reduziert werden. Bei einer Untersetzung von zwei wird zum Beispiel nur jeder zweite Wert der Messreihe verwendet.

Des Weiteren kann nur ein bestimmter Bereich des aufgezeichneten Signals verwendet werden. Dies kann durch Eingabe des gewünschten Zeitraums erfolgen oder durch die Schaltfläche Auswahl per Maus.

Anschließend kann das System identifiziert werden. Nach dem Drücken der Schaltfläche „Identifizieren“ wird das Modell berechnet. Der wichtigste Punkt ist hier wohl die Modellgüte. Sie wird oben links in Prozent angezeigt. Diese soll in jedem Fall über 50% besser noch über 75% liegen.

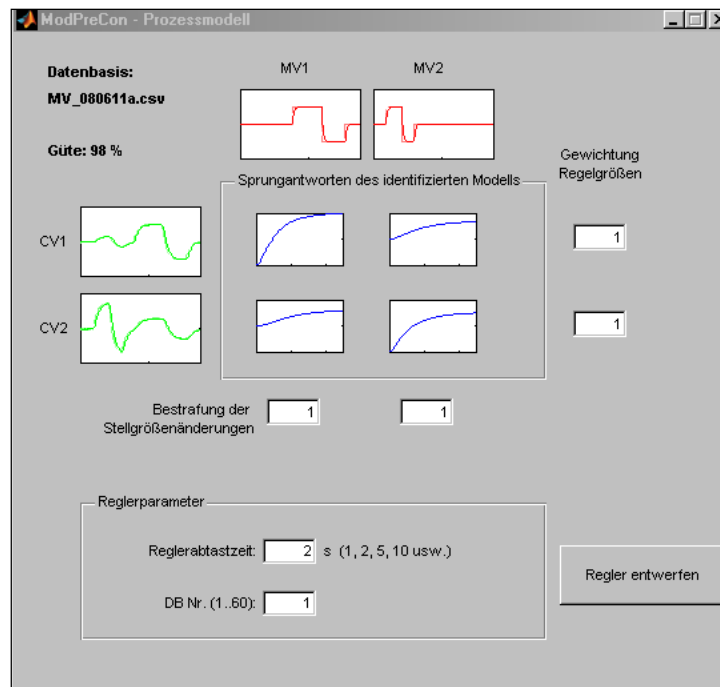


Abbildung 4.33: Regler entwerfen

Im Bedienfenster „Prozessmodell“ (Abbildung 4.33) können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Durch Gewichtung der Regelgrößen kann das Verhalten des Reglers beeinflusst werden. Für die Regelgröße mit der höheren Gewichtung wird versucht die Regelabweichung möglichst gering zu halten. Zudem wird die Geschwindigkeit bis zum Erreichen des Sollwerts erhöht. Diese Einstellung ist besonders bei überspezifizierten Systemen von Bedeutung.

Mit der Bestrafung der Stellgrößenänderungen wird das Verhalten der Stellgröße langsamer. Durch Klicken auf die Sprungantwort des identifizierten Modells kann die Sprungantwort betrachtet werden. Zusätzlich wird das Bode-Diagramm angezeigt. So kann die Qualität und Stabilität des Modells beurteilt werden.

Klickt man in das Feld CV im linken Bereich des Fensters, öffnet sich ein Diagramm für die Modellgüte der jeweiligen Regelgröße (CV). Hier ist ein guter Vergleich zwischen dem Verlauf der Regelgrößen des Modells und der aufgezeichneten Daten möglich. Dazu wird die Güte des Modells für die jeweilige Regelgröße in Prozent angezeigt.

Im Bereich „Regelparameter“ kann die Reglerabtastrzeit und die Datenbausteinnummer eingestellt werden. Im Normalfall sollte die vorgeschlagene Reglerabtastrzeit übernommen werden. Es muss darauf geachtet werden, dass der MPC-Baustein im richtigen Weckalarm-OB aufgerufen wird. Mit der DB Nummer kann der spätere DB festgelegt werden. Es sind die Nummern 1..60 möglich.

Im Fenster Verifikation und Simulation kann die Güte des Modells überprüft werden. Hierzu werden am besten Daten verwendet, die noch nicht zum Entwurf benutzt wurden. Auch eine andere Form der Anregung, wie zum Beispiel eine Rampe ist hier sinnvoll. Mit der Schaltfläche „Daten laden“ (Abbildung 4.34) werden die Daten eingelesen. So kann gut auf die Qualität des Modells geschlossen werden.

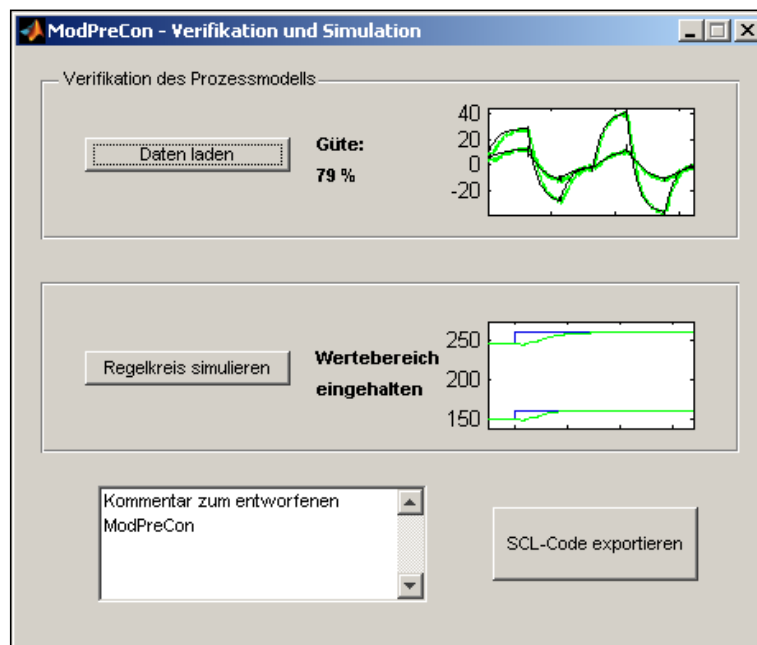


Abbildung 4.34: Verifikation und Simulation

Eine weitere Funktion in diesem Fenster ist die Simulation des Regelkreises. Dabei wird der geschlossene Regelkreis simuliert und das Ergebnis in einem Diagramm ausgegeben. Hier kann kontrolliert werden, ob bei einem Sollwertsprung der Istwert dem Sollwert folgt. Es ist zu beachten, dass die Simulation bei manchen Rechnersystemen relativ lange Zeit in Anspruch nehmen kann. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, so können die Modelldaten über SCL-Code exportiert werden. Dieser kann dann im SIMATIC-Manager als Quelle importiert werden. Anschließend kann daraus der Datenbaustein (DB) erzeugt werden. Der DB muss im CFC-Plan am entsprechenden MPC-Baustein aufgeschaltet werden. Wird ein neuer Datenbaustein aufgeschaltet, so wird dieser erst nach einem RESET des MPC-Bausteins aktiv [Dannerbeck, 2008].

4.4.4.4 Test des MPC mittels Simulation

In diesem Abschnitt soll kurz die Leistungsfähigkeit des MPC anhand einer simulierten Strecke erfolgen. Die Strecke ist dabei aus verschiedenen, zusammen geschalteten PT1-Gliedern aufgebaut.

4.4.4.4.1 Aufbau der Strecke

Bei dem in Abbildung 4.35 dargestellten System handelt es sich um ein Mehrgrößenproblem mit zwei Stellgrößen und zwei Regelgrößen. Das System soll dabei eine Temperaturregelstrecke darstellen. Die Stellgröße u_1 (Einheit in %) und die Regelgröße y_1 (Einheit $^{\circ}\text{C}$) stellen eine Regelstrecke dar. Dasselbe gilt für u_2 und y_2 . Das eigentliche Mehrgrößenproblem ergibt sich daraus, dass die Systeme durch die Funktionen $G(2,1)$ und $G(1,2)$ gekoppelt sind. Somit wird Regelstrecke 1 von Regelstrecke 2 und umgekehrt beeinflusst.

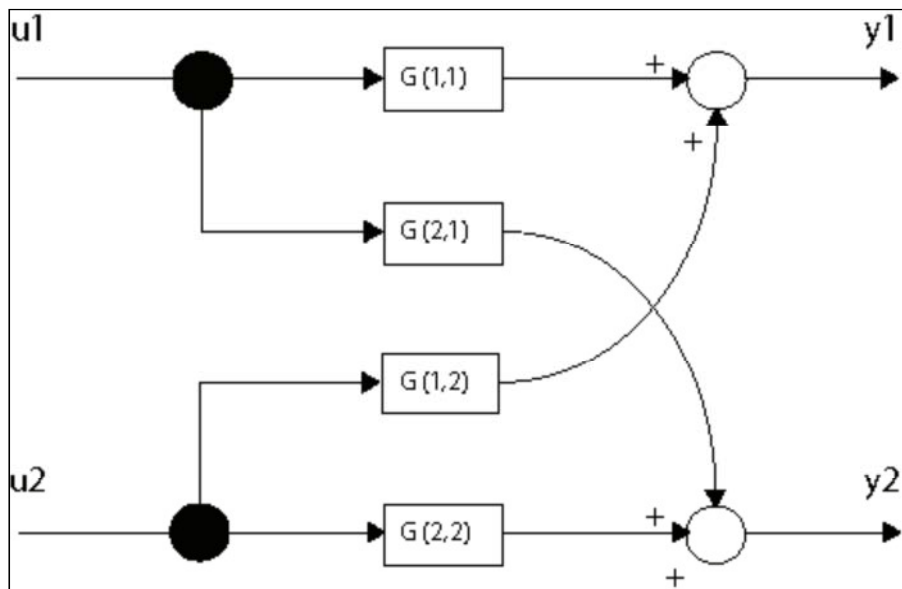


Abbildung 4.35: Schematischer Aufbau der Strecke [Siemens a]

In Abbildung 4.36 sind die Übertragungsfunktionen der einzelnen Glieder dargestellt.

$$\underline{G}(s) = \begin{bmatrix} G(1,1) & G(1,2) & \dots & G(1,n_u) \\ G(2,1) & G(2,2) & \dots & G(2,n_u) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G(n_y,1) & G(n_y,2) & \dots & G(n_y,n_u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{(30s+1)(4s+1)} & \frac{1.2}{(34s+1)(14s+1)(6s+1)} \\ \frac{1.3}{(28s+1)(12s+1)(6s+1)} & \frac{4}{(26s+1)(6s+1)} \end{bmatrix}$$

Abbildung 4.36: Übertragungsfunktionen [Siemens a]

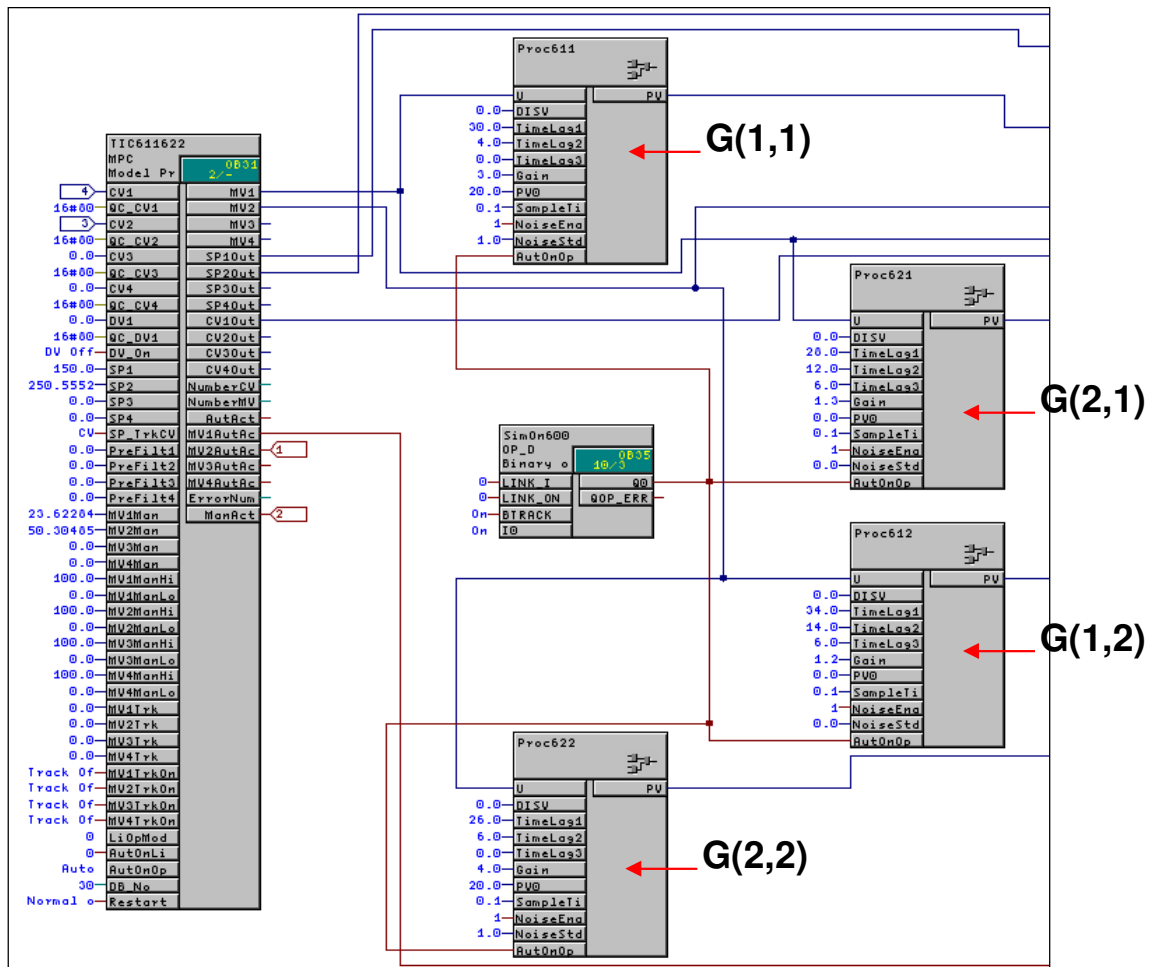


Abbildung 4.37: Strecke und Regler im CFC Plan

In Abbildung 4.37 ist die Strecke, bestehend aus den vier Proc6xx Bausteinen und der Regler dargestellt. An den Proc-Bausteinen können bis zu drei Zeitkonstanten und somit die Ordnung des Systems festgelegt werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, dem Signal ein Rauschen zu überlagern, was für den konkreten Anwendungsfall nicht relevant ist.

4.4.4.2 Regelung der Strecke mit dem MPC

In der ersten Abbildung wird ein Sprung auf die Strecke gegeben. Dabei wird die Stellgröße MV1 von 50% auf 75% erhöht. Es ist zu erkennen, wie dieser Sprung einen Anstieg für die Regelgrößen CV1 und CV2 zur Folge hat. Die Ursache dafür ist, wie weiter oben beschrieben, die Kopplung der beiden Systeme.

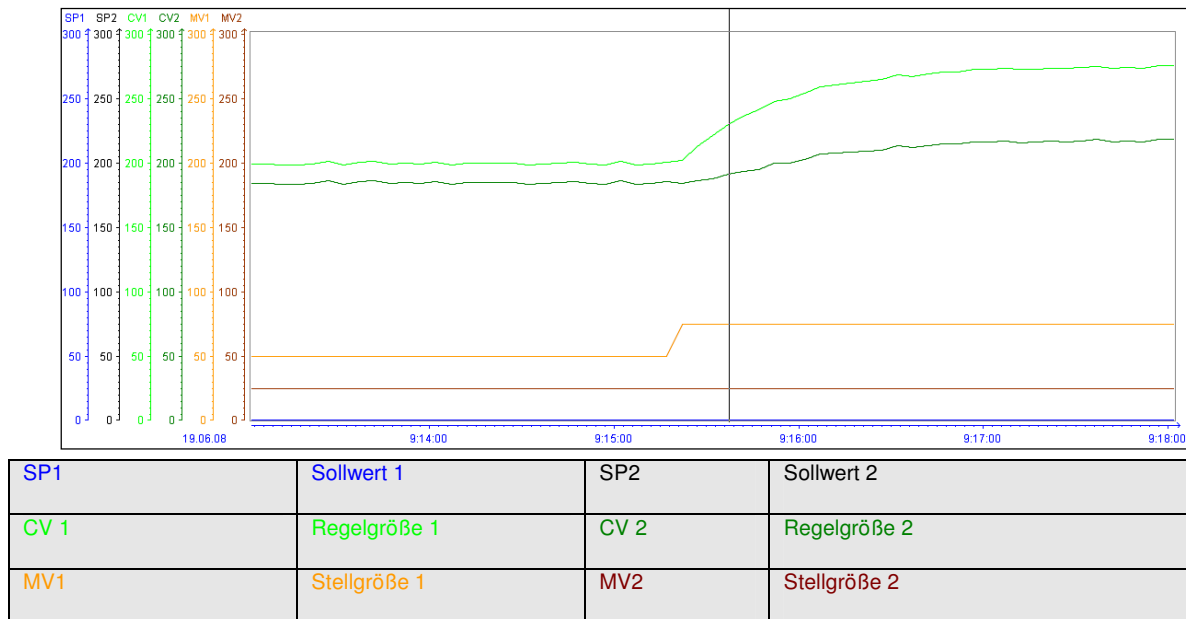
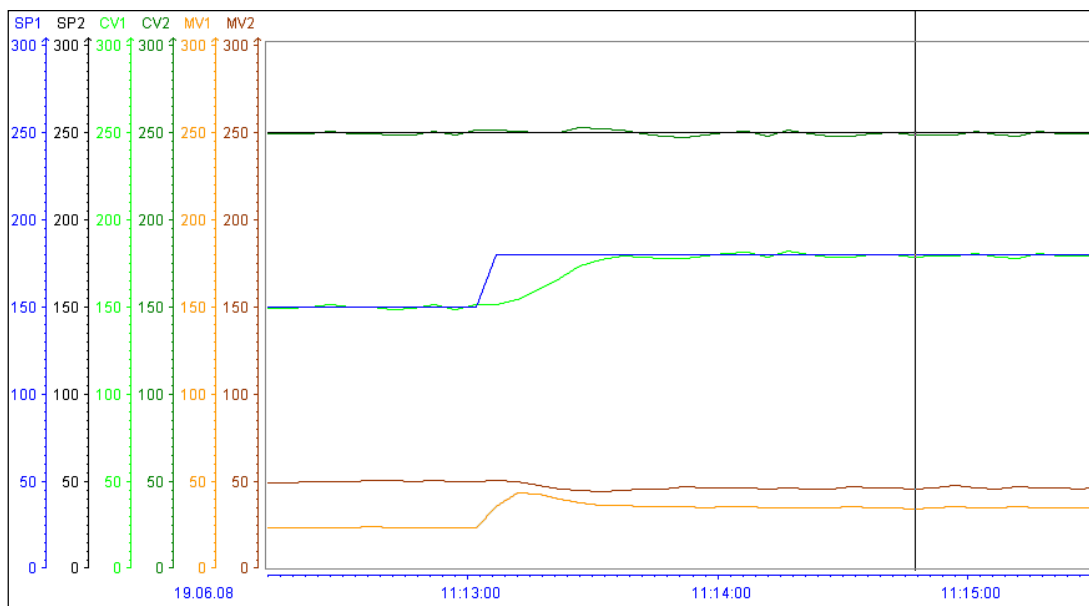


Abbildung 4.38: Sprung MV1 nach 09:15 Uhr ohne Regler

Nun soll ein Regler für dieses Modell entworfen werden. Dafür werden die Sprungantworten der zwei Systeme aufgezeichnet. In **Abbildung 4.32** im vorigen Kapitel sind im Feld Rohdaten die Sprünge der Stellgrößen zusehen. Diese wurden symmetrisch um den Arbeitspunkt ausgeführt. Die Felder darunter zeigen die Sprungantworten der Strecke.

In **Abbildung 4.33** ist das Ergebnis der Systemidentifikation dargestellt. Mit einem Rauschfilter von 10 s wurde eine Modellgüte von 98% erzielt. Die vorgeschlagene Reglerabtastrzeit beträgt 2 s.



SP1	Sollwert 1	SP2	Sollwert 2
CV 1	Regelgröße 1	CV 2	Regelgröße 2
MV1	Stellgröße 1	MV2	Stellgröße 2

Abbildung 4.39: Sprung SP1 gegen 11:13 Uhr mit Regler

In der oben stehenden Abbildung ist ein Sprung des Sollwert SP1 von 150C° auf 180C° dargestellt. Es ist zu sehen wie der Istwert (CV1) dem Sollwert folgt. Auf die Regelgröße CV2 zeigt dieser Sprung, anders als in Abbildung 4.38 keine oder nur geringe Auswirkung. Es ist schön zu erkennen, wie sich beide Stellgrößen MV1 und MV2 verändern.

Anhand dieses Mehrgrößenproblems konnte die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des MPC gezeigt werden.

4.4.4.5 Methoden zum Erstellen von Sprungantworten

Für den Betrieb eines MPC ist es notwendig, wie weiter oben bereits beschrieben, ein Modell zu erstellen. Dazu ist eine Sprungantwort des zu regelnden Prozesses notwendig. Im Folgenden sind verschiedene Methoden aufgeführt, die im Rahmen dieses Projekt zur Anwendung kommen sollen:

- Sprungantwort durch Anregung des realen Prozesses
- Sprungantworten durch Analyse von Kennlinien
- Sprungantworten mit Hilfe eines Modells

Die Methoden haben jede für sich Vor- und Nachteile. Diese werden in den nächsten Abschnitten genauer diskutiert.

Versuche an der echten Anlage haben immer den Nachteil, dass dadurch der normale Verbrennungsbetrieb unter Umständen für einen längeren Zeitraum recht deutlich beeinträchtigt wird. Vernachlässigt werden darf auch nicht, dass diese Versuche zwangsläufig zu suboptimalen Verbrennungszuständen und damit verbundenen erhöhten Schadstoffemissionen und verminderter Energieeffizienz führen. Jedoch sind diese Versuchsfahrten beim Einsatz von modernen Regelungstechnologien zur Erstellung eines Modells der Regelstrecke in vielen Fällen unerlässlich.

Durch Analyse von Kennlinien ist es möglich, das Verhalten von bestimmten Regelstrecken in eine Sprungantwort abzubilden. Auch die Unterstützung von erfahrenen Feuerungsspezialisten ist hier hilfreich. Ein Nachteil dieser Methode ist, die Daten aufzubereiten und in ein Format zu bringen, welches vom Entwurfstool ModPreCon verarbeitet werden kann. Hierfür gibt es (noch) keinen Automatismus, sodass das Aufbereiten und Einlesen der umfangreichen Daten im Moment noch mühsame Handarbeit darstellt.

Sprungantworten an einem Modell zu erstellen würde den Vorteil bringen, dass keine zeit-aufwändigen Versuchsphasen auf der Anlage notwendig sind. Wenn das Modell möglichst genau den reellen Prozess wiedergibt, wäre es möglich den für das Modell entworfenen Regler an der echten Anlage einzusetzen. Die Inbetriebnahme und Einstellphasen könnten dadurch erheblich verkürzt werden.

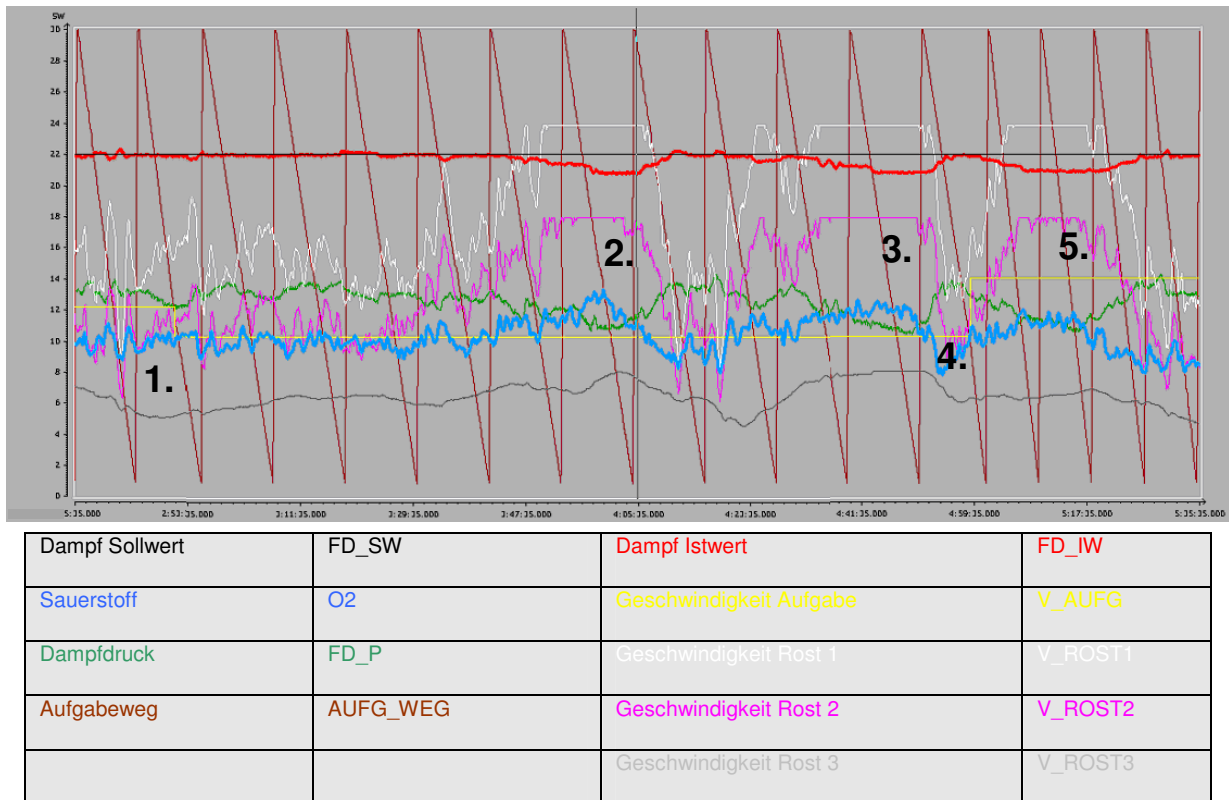
4.4.4.6 MPC im Bereich Müllaufgabe

4.4.4.6.1 Aufnahme von Sprungantworten

Der erste Versuch für die Aufnahme der Sprungantworten wurde im Rahmen einer Nachtschicht im GKS durchgeführt. Nach erfolgreicher Integration des MPC in das Prozessleitsystem wurde der Trend für die Aufzeichnung angelegt.

Es werden die Regelgrößen CV1 bis CV3 und die Stellgröße MV1 aufgezeichnet, welche dann in eine CSV-Datei exportiert werden können.

In der untenstehenden Abbildung ist der Verlauf der Größen während des ersten Versuchs dargestellt.


Abbildung 4.40: Verlauf Versuch 1

Zum Zeitpunkt 1 (gegen 02:53 Uhr) wird ein Sprung von 6,5 dH/h auf 5,5 dH/h auf die Stellgröße (gelbe Linie) gegeben. Nach einer Zeit von ca. 60 min ist ein Einbruch der Dampfmenge (rote Linie) zu bemerken (Zeitpunkt 2) jedoch steigt diese wieder an, bis am Zeitpunkt 3 ein erneuter Einbruch stattfindet. Nachdem der Dampf wieder stabil ist, wird zum Zeitpunkt 4 ein Sprung von 5,5 dH/h auf 8 dH/h auf die Stellgröße gegeben. Zum Zeitpunkt 5 ist wieder ein Einbruch zu erkennen.

Als Ergebnis dieses Versuchs muss gesagt werden, dass das Verhalten der Regelstrecke nicht dem Erwarteten entspricht. Eine Verringerung der Aufgabegeschwindigkeit hat grundsätzlich nach einer gewissen Totzeit einen Einbruch der Dampfmenge zur Folge und diese sollte sich wieder auf einen nahezu konstanten niedrigeren Wert einschwingen.

Genauso sollte bei einem Anstieg der Aufgabegeschwindigkeit nach geraumer Zeit auch ein Anstieg der Dampfmenge erfolgen. Dieses „Fehlverhalten“ kann man sich durch die Müllzusammensetzung oder auch durch ein Ausgleichsverhalten der anderen Regelkreise erklären. So kann z. B. ein Einbruch der Dampfmenge aufgrund einer geringeren Müllmenge für eine gewisse Zeit durch Erhöhung des Unterwinds ausgeglichen werden (Anm.: was jedoch zwangsläufig zu einer Verkürzung der Feuerlänge führt). Erkennbar ist eine kaskadierende Erhöhung der dH-Geschwindigkeiten von Rost 1 und 2, die ebenfalls der Wirkung der Aufgabebänderung entgegenwirkt. Der Entwurf eines Modells anhand dieser Daten erscheint nicht

sinnvoll, da sie ein falsches Verhalten widerspiegeln. Eine vollständige Unterdrückung aller anderen als der manuell veränderten Stellgröße bzw. des Sollwertes wird bei dem sehr inhomogenen Brennstoff zu willkürlichen Ergebnissen führen und daher auch wenig zielführend sein.

4.4.4.6.2 Erstellen eines Modells durch Analyse von Kennlinien

Da es sich an der Strecke Müllaufgabe als schwierig heraus gestellt hat, reproduzierbare Sprungantworten zu erstellen und aus diesen die geforderte Modellgüte abzuleiten, soll in diesem Abschnitt durch Analyse von Kennlinien des Prozesses ein Modell der Strecke erstellt werden. Hierzu soll als erstes ein Modell für nur eine Regelgröße, den Dampf, erstellt werden.

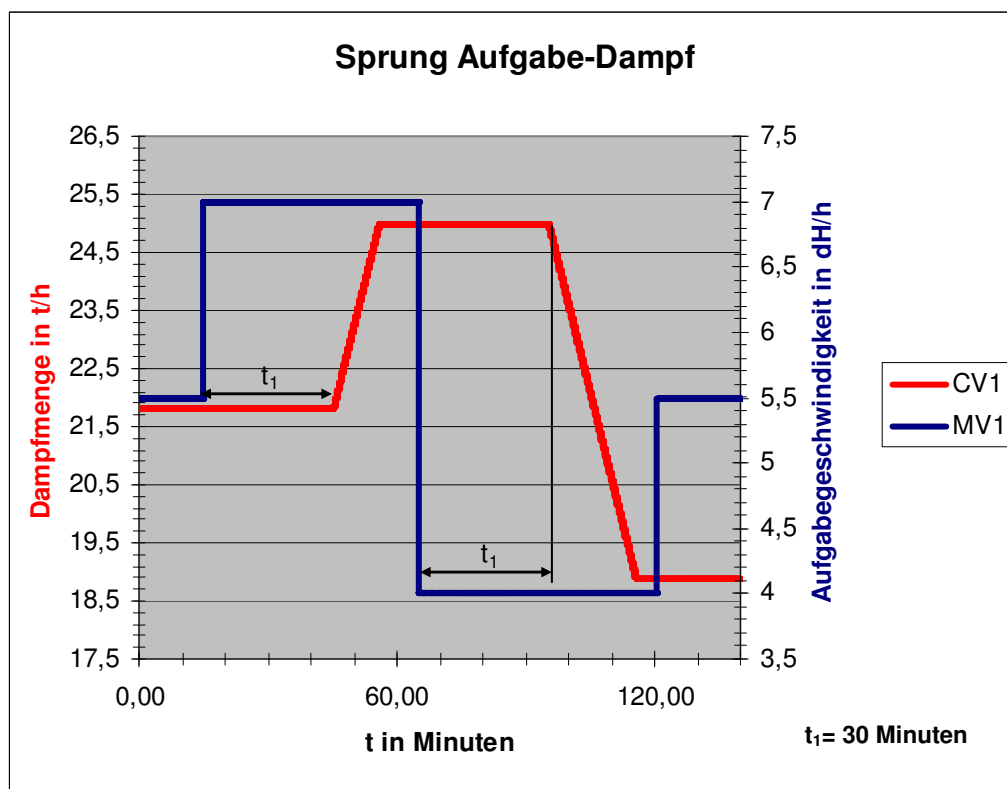


Abbildung 4.41: Sprung Aufgabe-Dampf

Abbildung 4.41 zeigt den Verlauf der nach der Analyse erstellten Kennlinien, welche für den Entwurf des Modells verwendet werden. Die Stellgröße (Aufgabegeschwindigkeit MV1) würde ausgehend vom Wert 5,5 dH/h mit einem Sprung von 1,5 dH/h beaufschlagt. Wie die Auswertung der Kennlinien und Gespräche mit Feuerungsspezialisten ergab, ist nach ca. 30 Minuten mit einer Auswirkung auf die Dampfmenge zu rechnen. Diese ist im oben stehenden

Diagramm mit der Totzeit t_1 dargestellt. Die Dampfmenge erhöht sich ausgehend von einem Wert von 21,8 t/h innerhalb 10 Minuten auf einen Wert von 25 t/h. Das bedeutet einen Anstieg von ca. 3 t/h entsprechend rund 12 %.

Nach kurzer Verweilzeit springt die Stellgröße MV1 nach unten. Dieser erfolgt von 7 dH/h auf 4 dH/h. Nach der Totzeit t_1 beginnt die Dampfmenge zu fallen. Diese fällt von 25 t/h auf 18,86 t/h. Dies bedeutet einen Abfall von etwas mehr als 6 t/h entsprechend rund 24 %.

Die Änderungshöhe und Geschwindigkeit der Dampfmenge im Bezug zur Stellgrößen-Änderung wurde durch Langzeitbetrachtung der Archivdaten ermittelt. Hierbei wurde versucht, ein repräsentatives Verhalten in den Entwurfskennlinien abzubilden.

4.4.4.6.3 Entwurf MPC Regler

Die in Abbildung 4.41 dargestellten Kennlinien wurden mit Hilfe von Excel in das für das Tool ModPreCon vorgegebene CSV-Format gebracht. Damit wird nun versucht, ein Modell zu erstellen. Nach dem Starten des Tools ModPreCon können die CSV-Daten eingelesen werden.

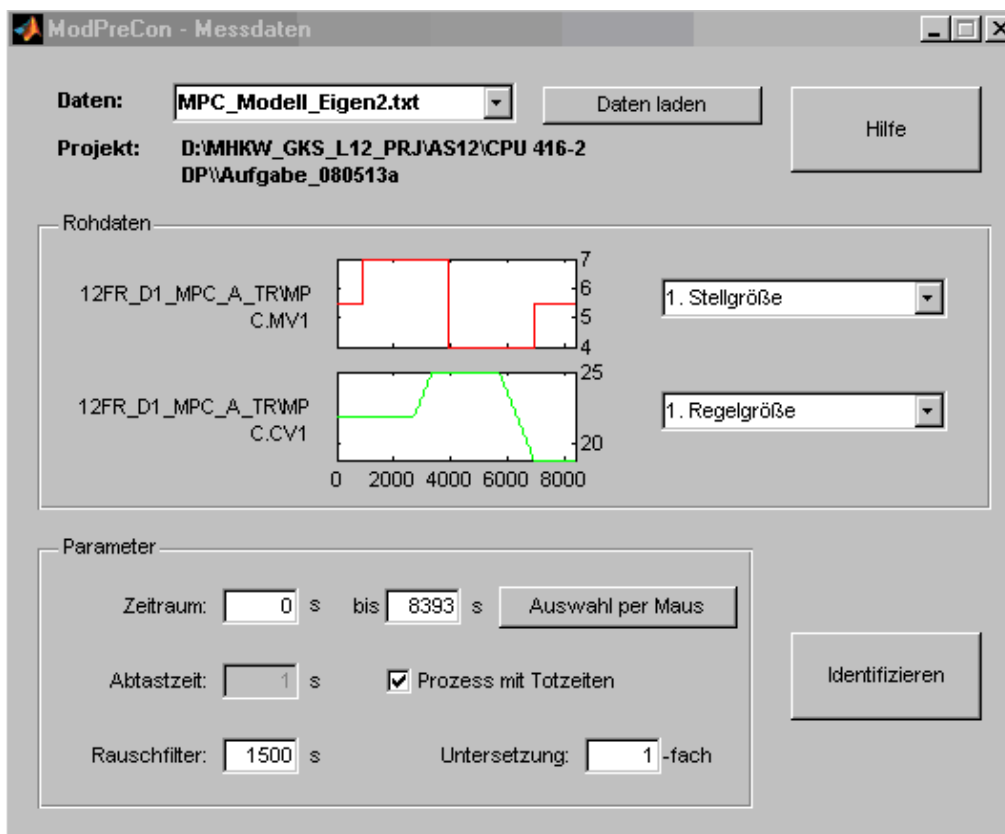


Abbildung 4.42: Tool ModPreCon Messdaten

Die oben stehende Abbildung zeigt die Bedienoberfläche von ModPreCon. Im Feld Rohdaten Abbildung 4.42 sind die Diagramme aus Abbildung 4.41 wieder zu erkennen. Für den Rauschfilter wurde eine Zeit von 1.500s eingestellt. Versuche haben ergeben, dass sich so die Modellgüte sehr stark verbessern lässt. Für einen Rauschfilter von 0s wurde zum Beispiel nur eine Modellgüte von 33% ermittelt.

Der Rauschfilter ist als PT1 Filter ausgeführt. Somit wird die Anstiegsgeschwindigkeit der Stellgröße verringert, wie in Abbildung 4.43 im Feld MV1 zu sehen. Die durchgezogene Linie stellt dabei den Verlauf der Stellgröße nach dem Filter dar. In Abbildung 4.43 ist das Ergebnis der Systemidentifikation dargestellt. Die Modellgüte, welche vom ModPreCon Tool ermittelt wurde, liegt bei 75%. Die Reglerabtastrzeit liegt mit 40 s relativ hoch. Für den Datenbaustein wurde die Nummer 22 festgelegt.

In Abbildung 4.44 ist die gemessene Regelgröße (grüne Linie) und die mit Hilfe des Modells ermittelte Regelgröße bei einem Stellwertsprung (MV) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese in weiten Bereichen nahezu übereinstimmen.

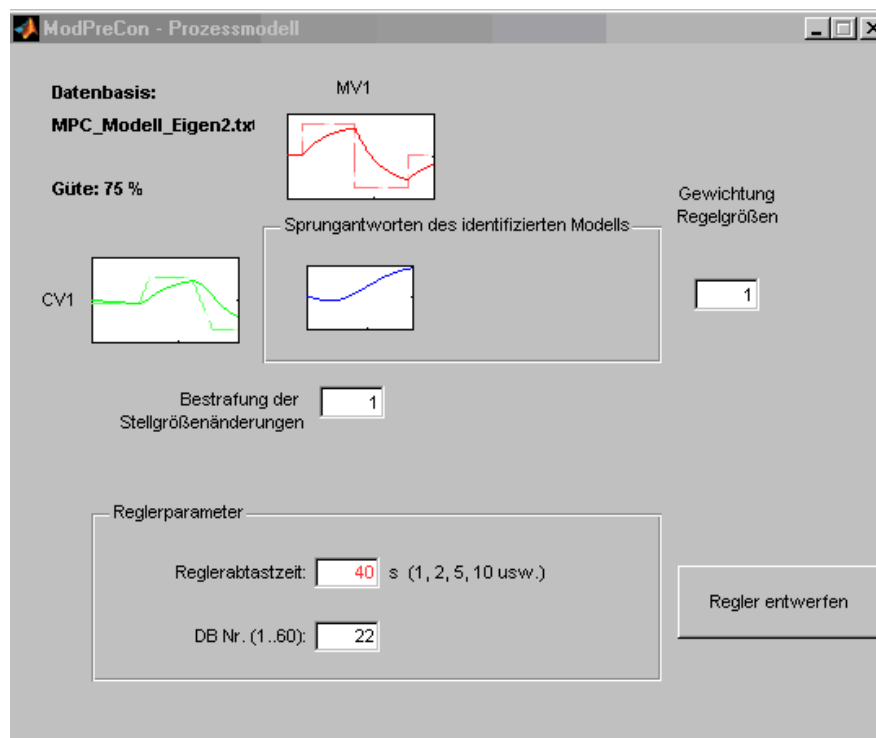


Abbildung 4.43: Tool ModPreCon Prozessmodell

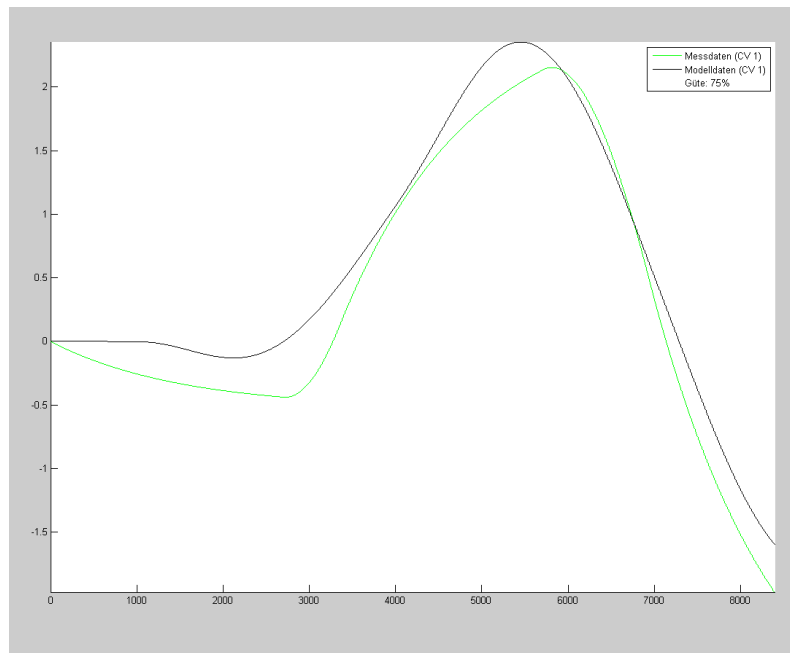


Abbildung 4.44: Modellgüte CV1

4.4.4.6.4 Test des MPC an GKS

In diesem Abschnitt wird der Probetrieb des im Kapitel 4.4.4.6.4 entworfenen Reglers erläutert. Dieser wurde an mehreren Tagen für einige Stunden eingeschaltet und dessen Verhalten beobachtet. In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf der Kennlinien dargestellt.

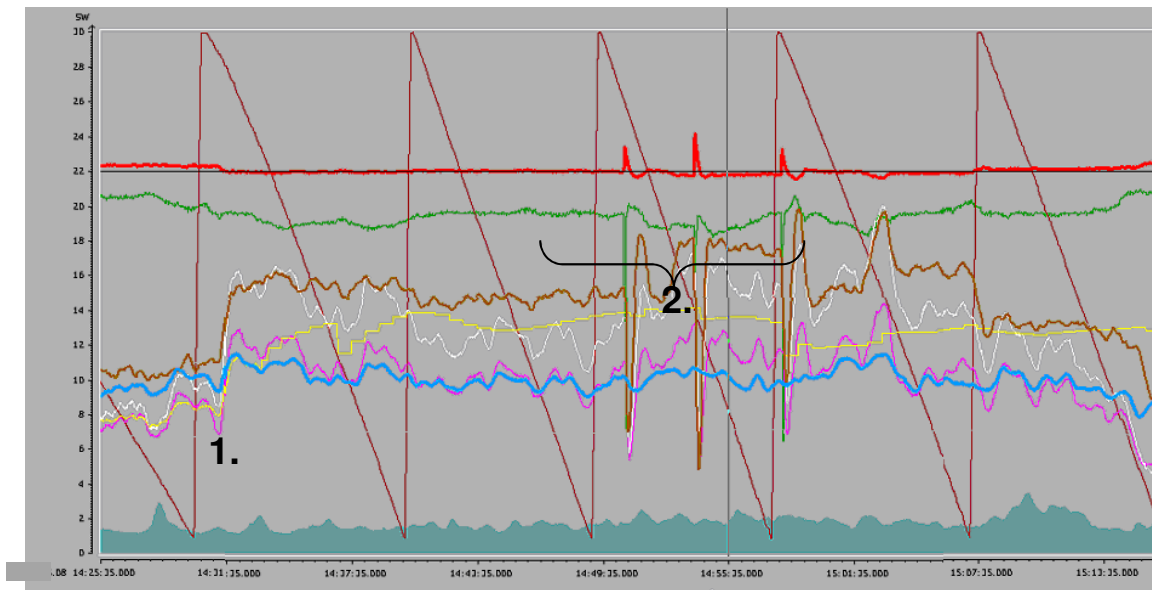


Abbildung 4.45: Probetrieb des MPC Modells (DB21)

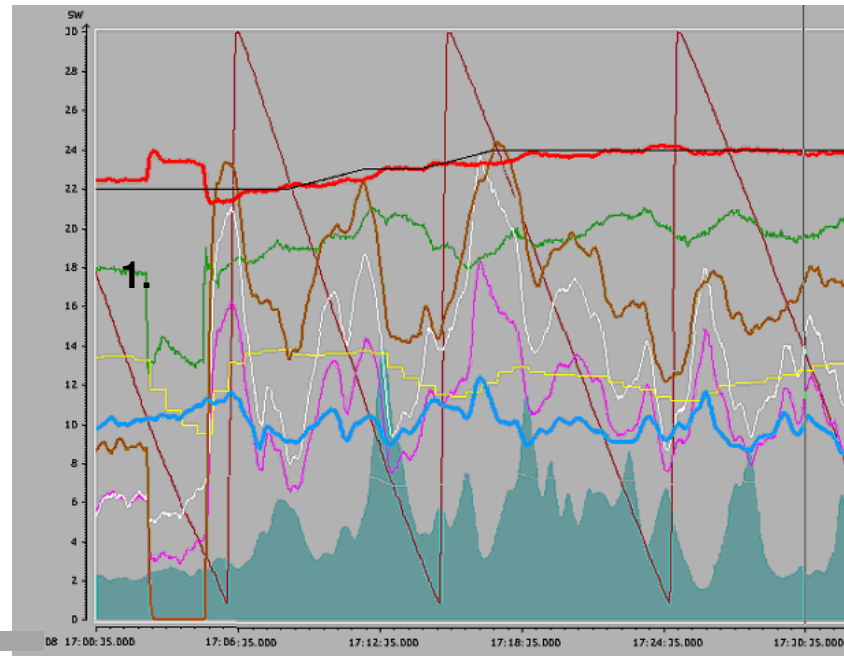
Dampf Sollwert	FD_SW	Dampf Istwert	FD_IW
Sauerstoff	O2	Geschwindigkeit Aufgabe	V_AUFG
Dampfdruck	FD_P	Geschwindigkeit Rost 1	V_ROST1
Aufgabebeweg	AUFG_WEG	Geschwindigkeit Rost 2	V_ROST2
		Geschwindigkeit Rost 3	V_ROST3

Zum Zeitpunkt 1 (siehe Abbildung 4.45) wurde der MPC eingeschaltet. Zu erkennen ist dies an dem stufigen Stellwert für die Aufgabegeschwindigkeit (gelbe Linie) bedingt durch die Zykluszeit des MPC von 40 s.

Das Überschwingen der Dampfmenge (rote Linie) im Zeitraum 2 ist bedingt durch das Schwanken des Dampfdruckes (grüne Linie).

Insgesamt zeigt der MPC in diesem Abschnitt ein gutes Verhalten. Der Istwert (rote Linie) folgt dem Sollwert (schwarze Linie) der Dampfmenge.

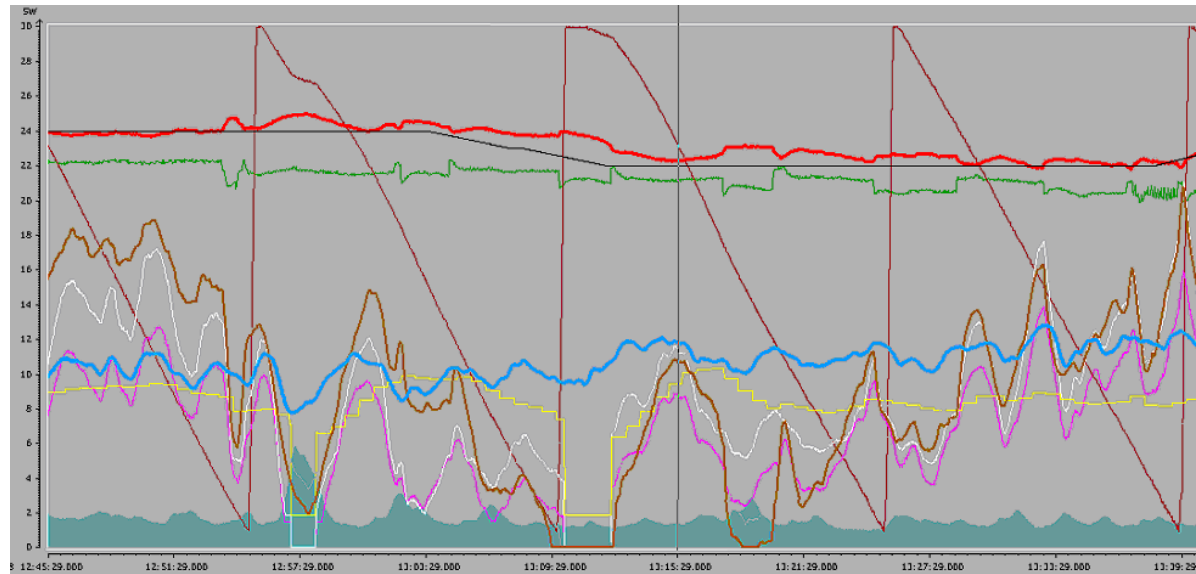
Das untenstehende Diagramm zeigt das Verhalten des MPC bei einer Sollwerterhöhung. Es ist schön zu erkennen wie der Istwert (rot) dem Sollwert (schwarz) folgt. Der Ausschlag der Dampfmenge nach oben zum Zeitpunkt 1 ist wieder auf das Schwanken des Dampfdruckes zurückzuführen (grüne Linie).



Dampf Sollwert	FD_SW	Dampf Istwert	FD_IW
Sauerstoff	O2	Geschwindigkeit Aufgabe	V_AUFG
Dampfdruck	FD_P	Geschwindigkeit Rost 1	V_ROST1
Aufgabeweg	AUFG_WEG	Geschwindigkeit Rost 2	V_ROST2
		Geschwindigkeit Rost 3	V_ROST3

Abbildung 4.46: Probetrieb MPC Sollwert Anhebung

Während dieser Testreihe wurden auch Probleme des MPC-Modells festgestellt. Eines wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.



Dampf Sollwert	FD_SW	Dampf Istwert	FD_IW
Sauerstoff	O2	Geschwindigkeit Aufgabe	V_AUFG
Dampfdruck	FD_P	Geschwindigkeit Rost 1	V_ROST1
Aufgabeweg	AUFG_WEG	Geschwindigkeit Rost 2	V_ROST2
		Geschwindigkeit Rost 3	V_ROST3

Abbildung 4.47: Fehlverhalten des MPC

In Abbildung 4.46 ist der Verlauf der Größen vor einem Einbruch der Dampfmenge zu sehen. Dieser wurde verursacht durch das so genannte Leerziehen des Ofens. Das bedeutet, dass die aufgegebene Müllmenge nicht mehr ausreicht, um den benötigten Dampf zu erzeugen. Mögliche Ursachen dafür könnten sein, dass im MPC-Regler die Sauerstoffmenge bis jetzt noch nicht als Regelgröße implementiert ist, wie es bei dem bestehenden PI-Regelungskonzept vorhanden ist. Eine weitere Ursache könnte sein, dass die Kopplung zwischen der Aufgabe und den Rostzonen hier nicht gegeben ist.

Wie in Abbildung 4.47 zu erkennen, steigt der Sauerstoffgehalt (blaue Linie) langsam an. Die Aufgabegeschwindigkeit bleibt im Mittel jedoch nahezu konstant. Bei der vorhandenen Regelung würde ein Anstieg des Sauerstoffs, einen Anstieg der Aufgabegeschwindigkeit hervorrufen. Da diese Regelgröße beim MPC hier nicht vorhanden ist, kann man so das Leerziehen des Ofens erklären.

4.4.4.7 MPC im Bereich Luft (Versuchsreihe 5.1)

Im vorigen Kapitel wurden Sprungantworten auf die Müllaufgabe gegeben. Im folgenden Kapitel werden die Versuche an der Regelstrecke Luft beschrieben. Dazu wurde ein Versuchsprogramm aufgestellt. Dies ist in

Abbildung 4.48 aufgelistet.

Bereich	NR.	Bezeichnung	Verlauf
Luft	5	Versuche Luft (Anlage)	
	5.1	MPC	
27.7.2010	5.1.1	Primärluft	-Erhöhung gesamte Primärluft -Regler Luft werden auf Hand genommen -> Sollwertvorgabe erfolgt über Dampfreger -Es wird je eine Veränderung der Dampfmenge im Bereich von +-5 t/h erwartet -Dauer pro Sprung ca. 30min
27.7.2010	5.1.1.1	Primärluft	-Variante von 5.1.1 -Sprungdauer ca. 10 min
27.7.2010	5.1.1.2	Primärluft	-Variante von 5.1.1, Wie 5.1.1.1, Absicherung Sprungantwort -Sprungdauer ca. 10 min
27.7.2010	5.1.2	Primärluft	-Zusätzlich zu 5.1.1 werden die Strecken Aufgabe und Rost auf Hand genommen
27.7.2010	5.1.2.1	Primärluft	-Variante von 5.1.2 -Sprungdauer ca. 10 min

Abbildung 4.48: Versuchsprogramm Luft

Im Folgenden werden die Versuche an der Regelstrecke Luft beschrieben. Diese wurden vom 27.07.2010 bis zum 28.07.2010 im GKS Schweinfurt durchgeführt. Dabei soll der Regler „Dampf“ durch einen MPC ersetzt bzw. mit dem PID-Tuner optimiert werden. Dieser ist in Abbildung 4.50 rot markiert.

In der untenstehenden Tabelle ist die Legende für die Trends aufgeführt. Die Zeitachse ist immer auf 1 Stunde skaliert.

Dampf Sollwert	FD_SW	Dampf Istwert	FD_IW
Sauerstoff	O2	Kohlenmonoxid	CO
Stellgröße Regler Luft	LMN_FD	Frischdampf Temperatur	FT

Abbildung 4.49: Legende für wichtige Größen der Versuchsreihe Luft

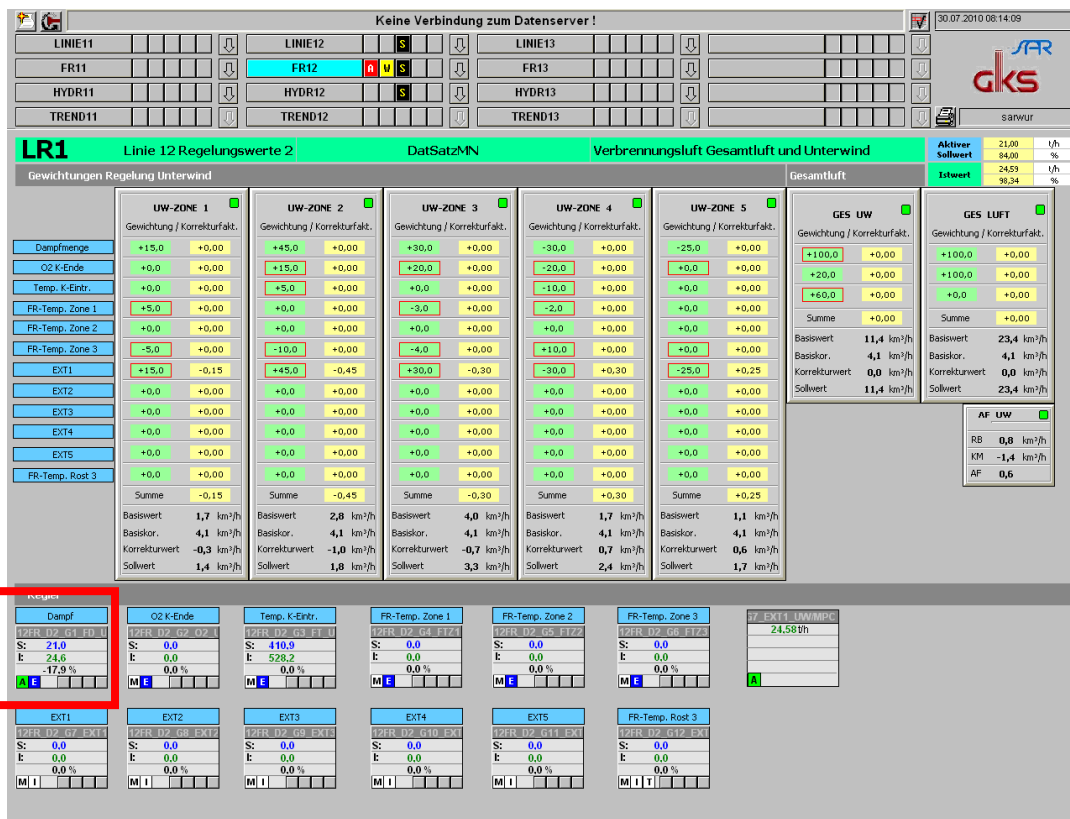


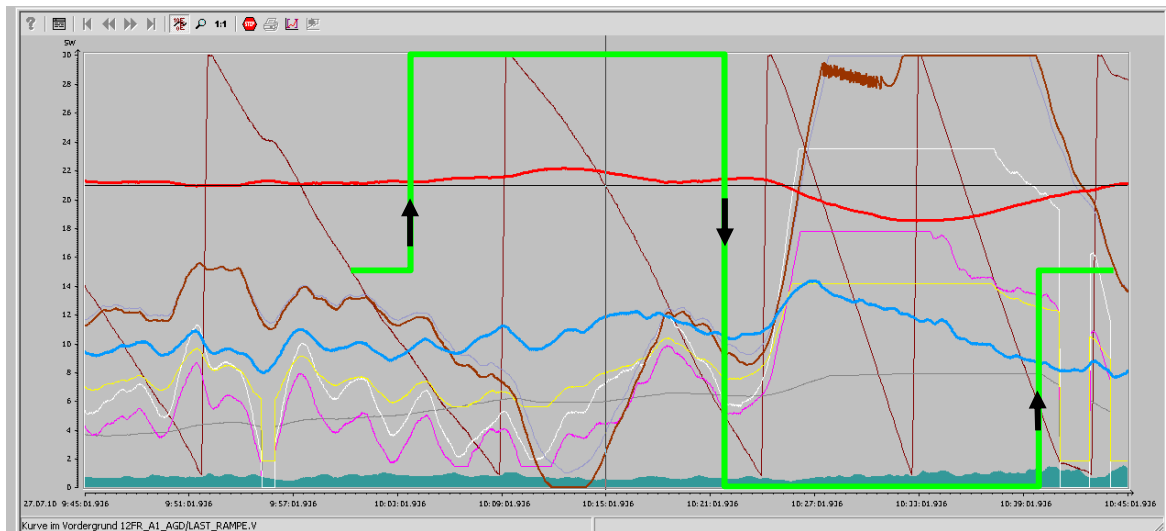
Abbildung 4.50: Regelung Luft

Für den MPC-Entwurf ist eine Sprungantwort der Regelstrecke notwendig. Die Anregung sollte dabei symmetrisch um den Arbeitspunkt erfolgen. Im nächsten Abschnitt werden die durchgeführten Versuche beschrieben.

4.4.4.7.1 Sprungantworten Regler Rost und Aufgabe aktiv (Versuchsreihe 5.1.1)

In diesem Versuchsteil sind die Strecken für Müllaufgabe und Rost aktiv. Die Regler für die Strecke Luft sind ausgeschaltet.

Beim ersten Versuch 5.1.1 (Erhöhung der Gesamt-Primärluft - hellgrün) hat die Strecke grundsätzlich das erwartete Verhalten gezeigt. Jedoch zeigte sich beim Sprung nach oben nach einiger Zeit, dass die Dampfmenge wieder abfällt. Ebenso beim Sprung nach unten, dass die Dampfmenge wieder ansteigt. Grund dafür sind vermutlich die aktiven Strecken von Rost und Aufgabe. Das Verhalten der Strecke Rost und Aufgabe ist in Abbildung 4.51 dargestellt (die hellgrüne Linie kennzeichnet den Versuchsbereich).



Dampf Sollwert	FD_SW	Dampf Istwert	FD_IW
Sauerstoff	O2	Geschwindigkeit Aufgabe	V_AUFG
Dampfdruck	FD_P	Geschwindigkeit Rost 1	V_ROST1
Aufgabeweg	AUFG_WEG	Geschwindigkeit Rost 2	V_ROST2
		Geschwindigkeit Rost 3	V_ROST3

Abbildung 4.51: Verhalten Regelstrecke Rost und Aufgabe bei Versuch 5.1.1 - Geschwindigkeiten (weitere Farben: siehe Abbildung 4.49)

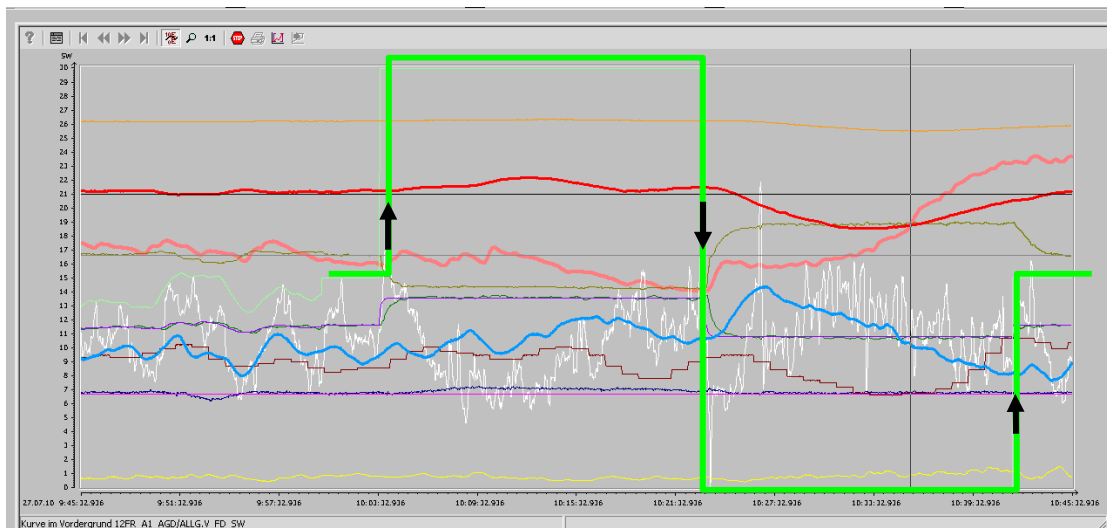


Abbildung 4.52: Sprungantwort Versuch 5.1.1.1 – Luftmengen

Für einen weiteren Versuch sollte die Sprungdauer so gelegt werden, dass der Richtungswechsel vor dem Abfall bzw. Anstieg erfolgt, d. h. Richtungswechsel nach ca. 10 min.

In Abbildung 4.53 ist der Versuchsverlauf 5.1.1.1 dargestellt. Der Richtungswechsel wurde nach ca. 10 min durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass kein Einbruch bzw. Anstieg wie bei Versuch 5.1.1 erfolgt.

Im Versuch 5.1.1.2 sollen die Daten aus 5.1.1.1 überprüft werden. Der Verlauf ist in Abbildung 4.54 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass beide Sprungantworten in etwa das gleiche Verhalten zeigen.

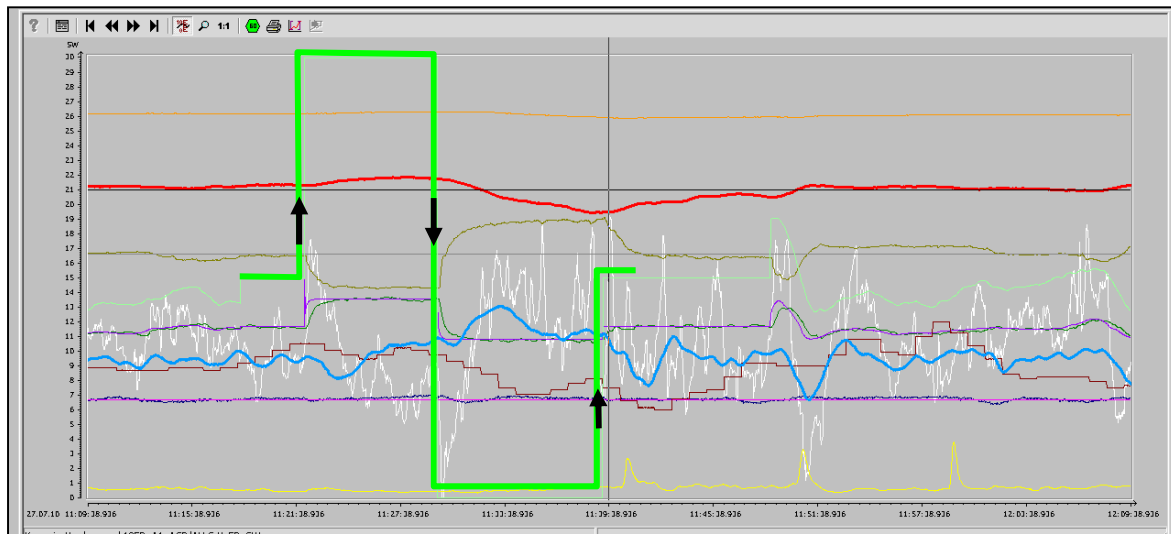


Abbildung 4.53: Sprungantwort Versuch 5.1.1.1 (Farben: siehe Abbildung 4.49)

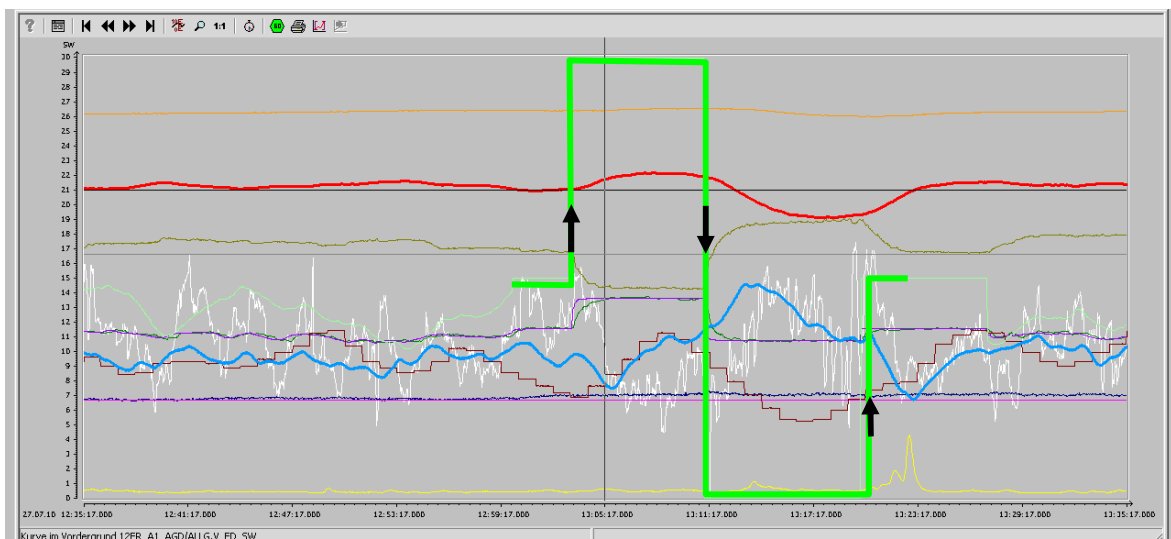


Abbildung 4.54: Sprungantwort Versuch 5.1.1.2

4.4.4.7.2 Sprungantworten Regler Rost und Aufgabe inaktiv (Versuchsreihe 5.1.2)

In den folgenden Versuchsreihen sind alle Regler für die Strecken Luft, Rost und Aufgabe ausgeschaltet. In Abbildung 4.55 ist der Versuchsverlauf für 5.1.2 dargestellt. Der Verlauf zeigt beim Sprung nach oben das erwartete Verhalten, nämlich einen Anstieg der Dampf-

menge. Beim Sprung nach unten sinkt zwar die Dampfmenge, jedoch nicht im erwarteten Ausmaß.

Bei dem Versuch 5.1.2.1 in Abbildung 4.56 ist das erwartete Verhalten besser zu sehen. Die Sprungantwort der Dampfmenge ist nahezu symmetrisch um den Arbeitspunkt. Der Anstieg der Dampfmenge ist bei den Versuchen mit inaktiven Reglern für Aufgabe und Rost deutlich höher, da kein „Gegenregeln“ stattfindet.

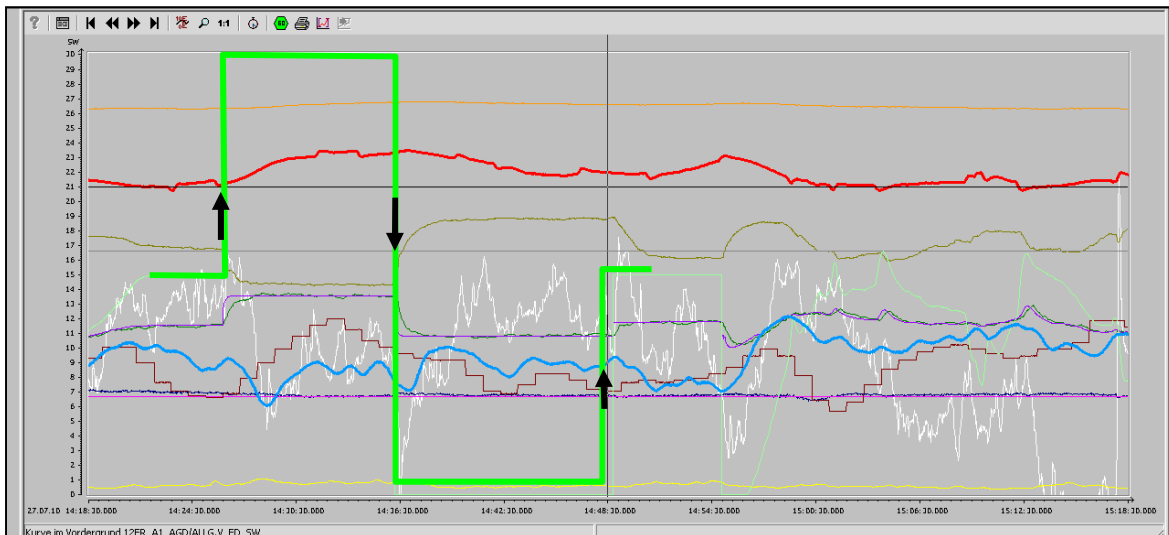


Abbildung 4.55: Sprungantwort Versuch 5.1.2

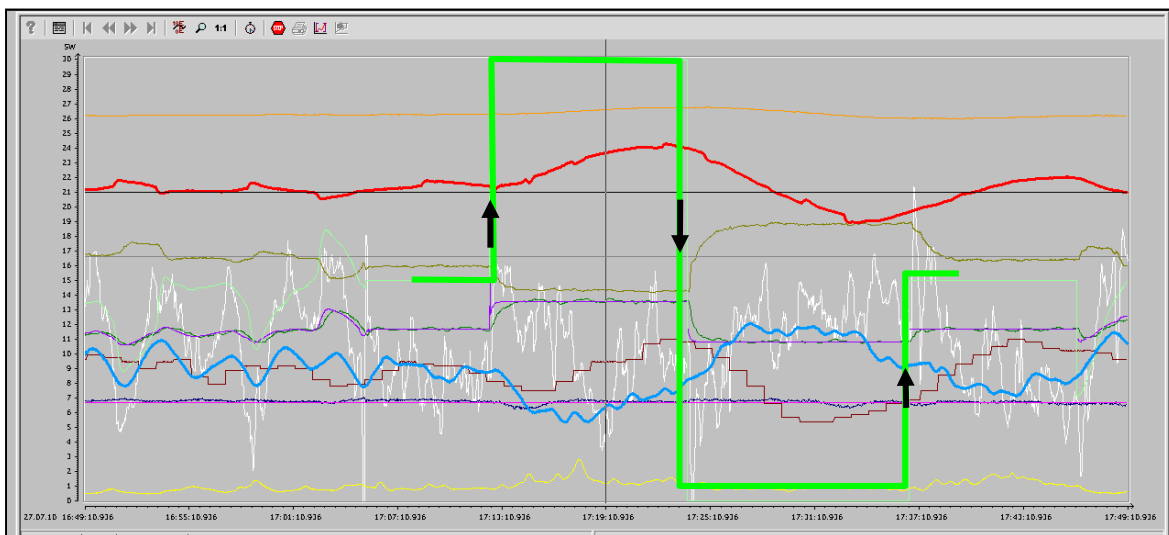


Abbildung 4.56: Sprungantwort Versuch 5.1.2.1

4.4.4.7.3 Entwurf MPC Regler 1

Aus den im vorgehenden Kapitel aufgenommenen Sprungantworten sollen nun Regler entworfen werden. Dies wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Für den ersten Regler werden die Datensätze aus den Versuchen 5.1.1.1 und 5.1.1.2 verwendet. Bei diesen Versuchen ist die Strecke Rost aktiv. Die Stellgröße des Reglers Dampf Rost wird als Störgröße verwendet.

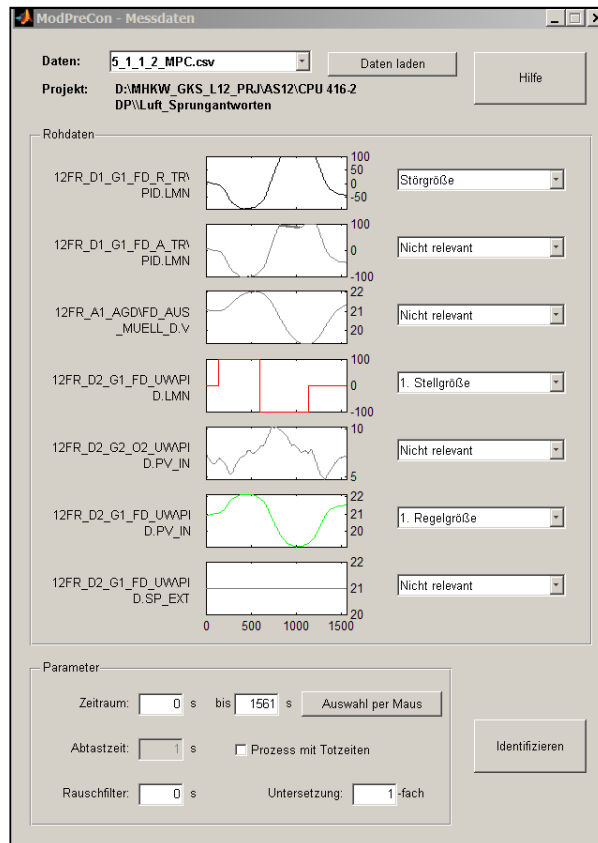


Abbildung 4.57: Messdaten

In Abbildung 4.58 ist zu sehen, dass eine Modellgüte von 84% erreicht wird. Positiv beeinflusst hat die Modellgüte die Verwendung der Stellgröße des Rostreglers als Störgröße. In Abbildung 4.59 ist die Verifikation des Prozessmodells dargestellt. Es wird eine Güte von 67% erzielt. Dabei werden Daten aus dem Prozess verwendet, welche beim normalen Betrieb aufgezeichnet wurden.

Als nächster Schritt wird der Regler an der Anlage getestet.

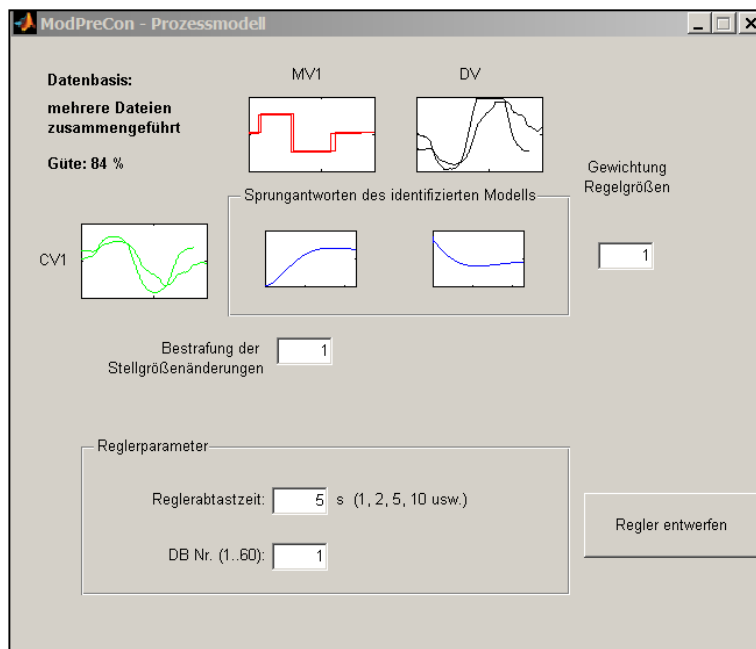


Abbildung 4.58: Prozessmodell, Modellgüte

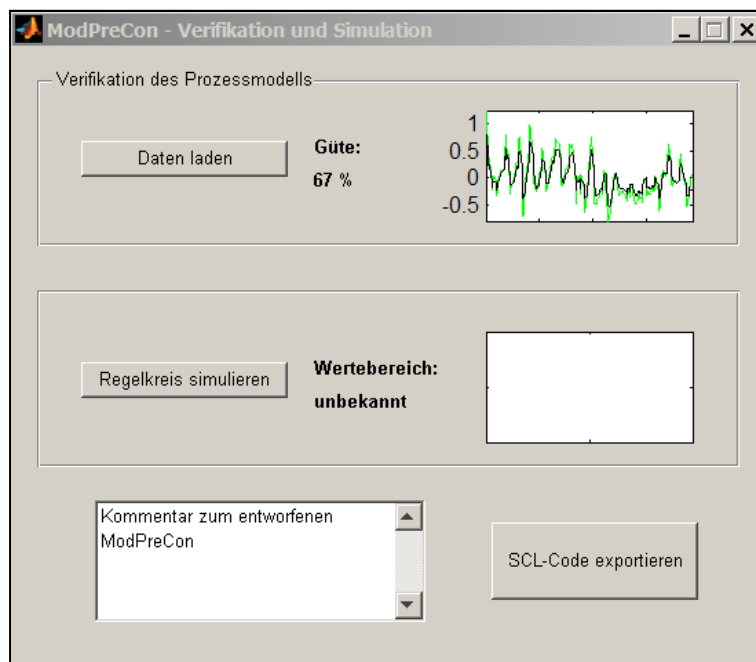


Abbildung 4.59: Verifikation des Modells

4.4.4.7.4 Entwurf MPC Regler 2

Beim zweiten Regler werden die Datensätze aus den Versuchen 5.1.1.1, 5.1.1.2 und 5.1.2.1 verwendet. Bei der Versuchsreihe 5.1.2.1 ist die Regelstrecke Rost inaktiv. Die Stellgröße des Reglers Dampf Rost wird wieder als Störgröße verwendet. Mit diesen Messreihen kann eine Modellgüte von 60% erreicht werden. Die Verifikation der Prozessdaten mit dem Modell ergibt nur eine Güte von 2%. Für den Regler 1 konnte im Vergleich eine Güte von 67% erreicht werden, wie in Abbildung 4.59 zu sehen war.

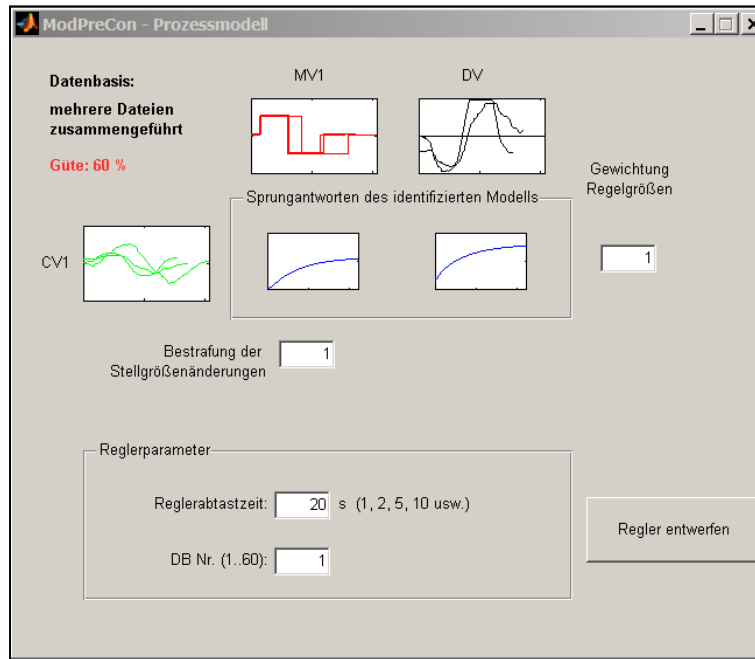


Abbildung 4.60: Regler 2, Prozessmodell

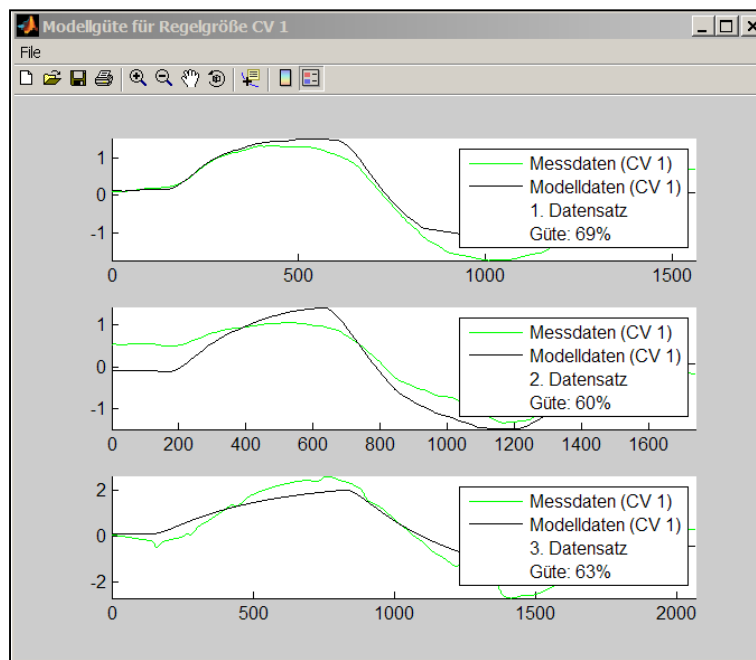


Abbildung 4.61: Regler 2, Modellgüte für Regelgröße

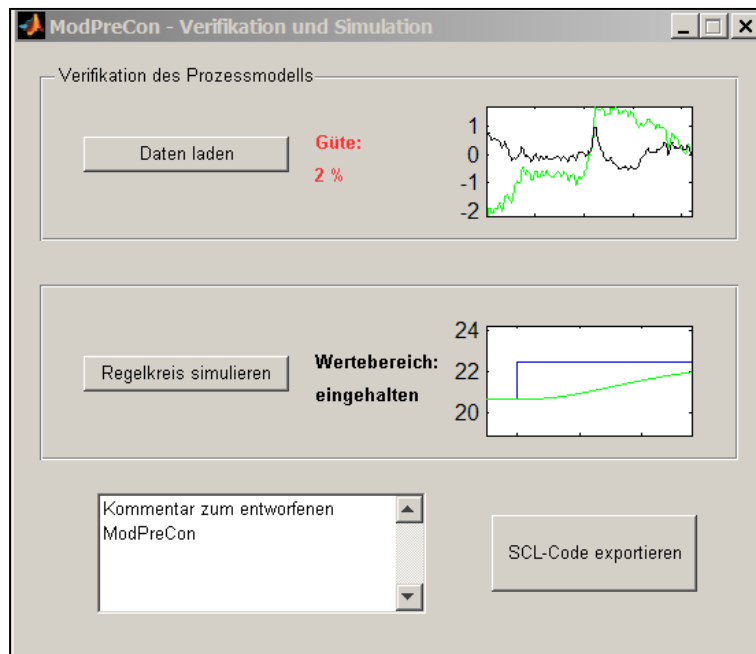


Abbildung 4.62: Regler 2, Verifikation und Simulation

4.4.4.7.5 Validierung des MPC Luft

Im Dezember 2010 wurde der MPC, welcher unter 4.4.4.7.3 entworfen wurde, im GKS Schweinfurt aktiv geschaltet. Der Regler wurde wie in Abbildung 4.63 dargestellt integriert. Mit einem Umschalter kann zwischen dem bestehenden PID und dem MPC Dampfreger umgeschaltet werden.

Während der Testphase von Dezember 2010 bis September 2011 war das Wartpersonal angewiesen, bei Unregelmäßigkeiten in der Regelung den MPC zu deaktivieren.

Während der Versuchsphase war dies jedoch nicht notwendig. Somit wurde die grundsätzliche Funktion des MPC erfolgreich nachgewiesen.

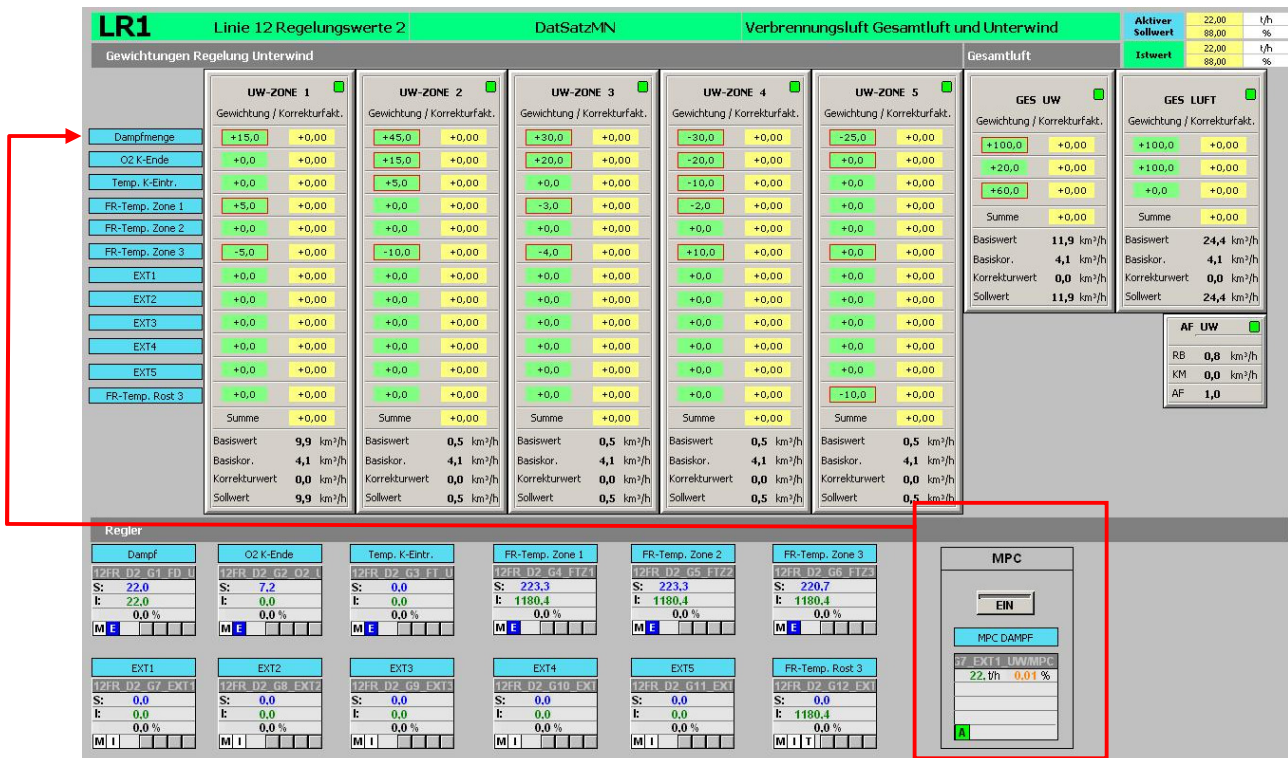


Abbildung 4.63: Bild Integration MPC Luft

Nun soll bewertet werden, wie sich der MPC im Vergleich zum PID-Regler bezüglich Dampfmengenschwankungen verhalten hat. In Abbildung 4.64 ist die Häufigkeitsverteilung der beiden Regler dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass es nur marginale Unterschiede im Verlauf der Häufigkeitsverteilung gibt. Somit kann gesagt werden, dass zumindest keine deutliche Verbesserung mit dem MPC gegenüber dem PID erzielt werden konnte.

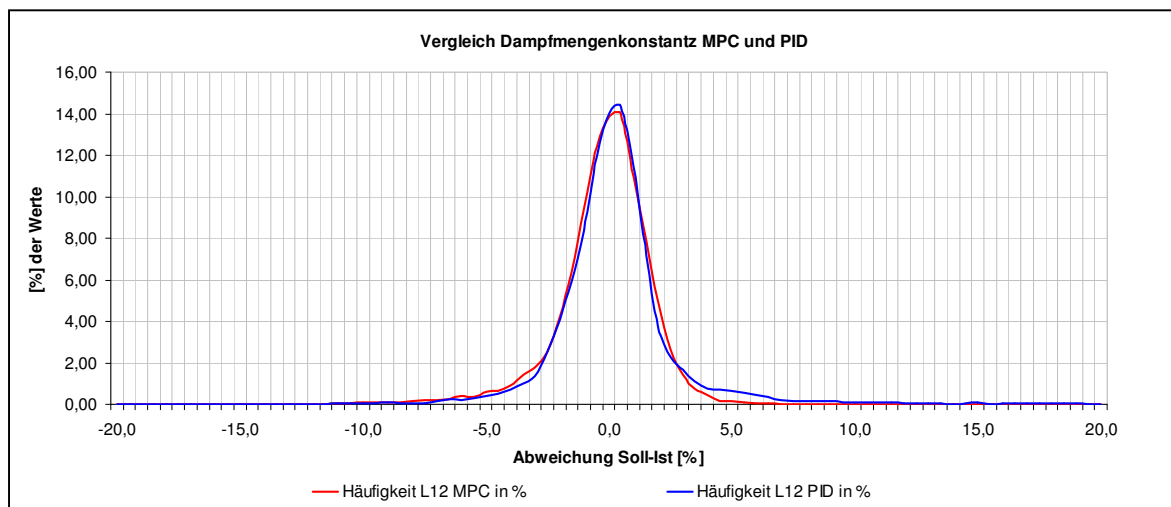


Abbildung 4.64: Vergleich Dampfmengenkonstanz MPC und PID

Der MPC weist eine geringfügig bessere Performance in Bereichen auf, die über dem Sollwert liegen. Der PID-Regler ist geringfügig besser in Phasen in denen die Dampfmenge unter dem Sollwert liegt. Aber diese Unterschiede sind de facto marginal.

Abbildung 4.61 zeigt die Verteilung der Stellbereiche der beiden Regler. Die Stellgröße des PID Reglers (blau) ist monomodal verteilt um den 0% Punkt. Beim MPC ist deutlich zu sehen, dass knapp 25% der Stellgrößen bei 100% liegen. In diesem Bereich befindet sich der MPC also am oberen Anschlag bei maximaler Aussteuerung. Interessanterweise liegt hier eine bimodale Verteilung der Stellgrößen vor. Dies war so nicht zu erwarten.

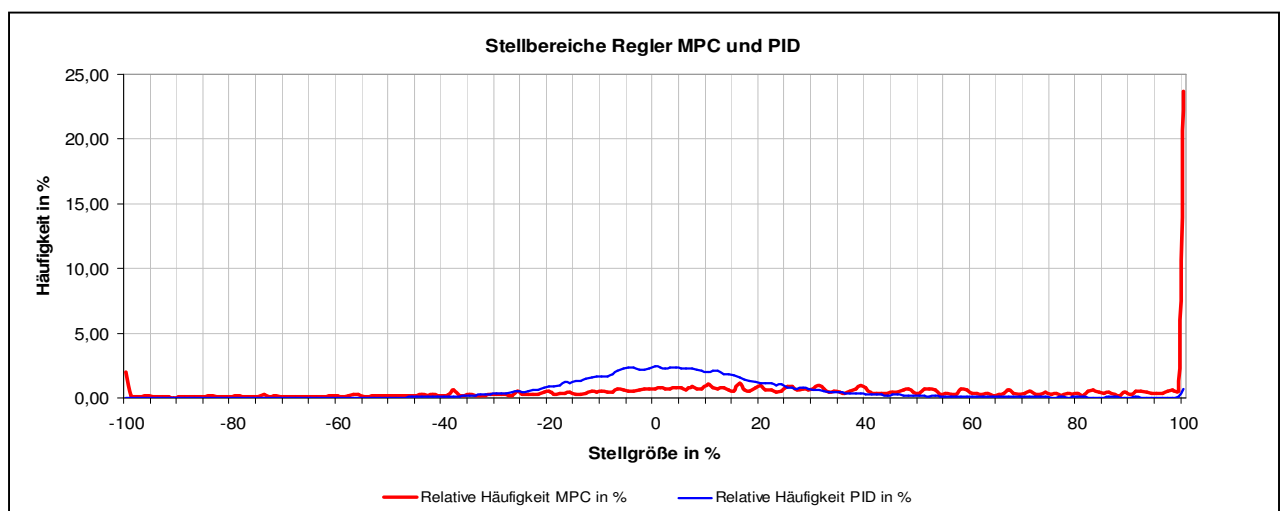


Abbildung 4.65: Vergleich Stellbereiche MPC und PID

Nun soll geprüft werden, welchen Einfluss die Stellgrößen der Regler auf die Luftmengen haben. Hierzu werden die Zonen 2 und 3 herangezogen, da diese Unterwindzonen in der Regel mit den größten Luftmengen beaufschlagt sind und daher die Hauptbrandzone repräsentieren. In Abbildung 4.66 und Abbildung 4.67 sind die entsprechenden Verläufe dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass beim MPC-Regler die Luftmengen anders als beim PID-Regler verteilt sind. Es ist eine deutliche Verschiebung zu höheren Luftmengen zu erkennen.

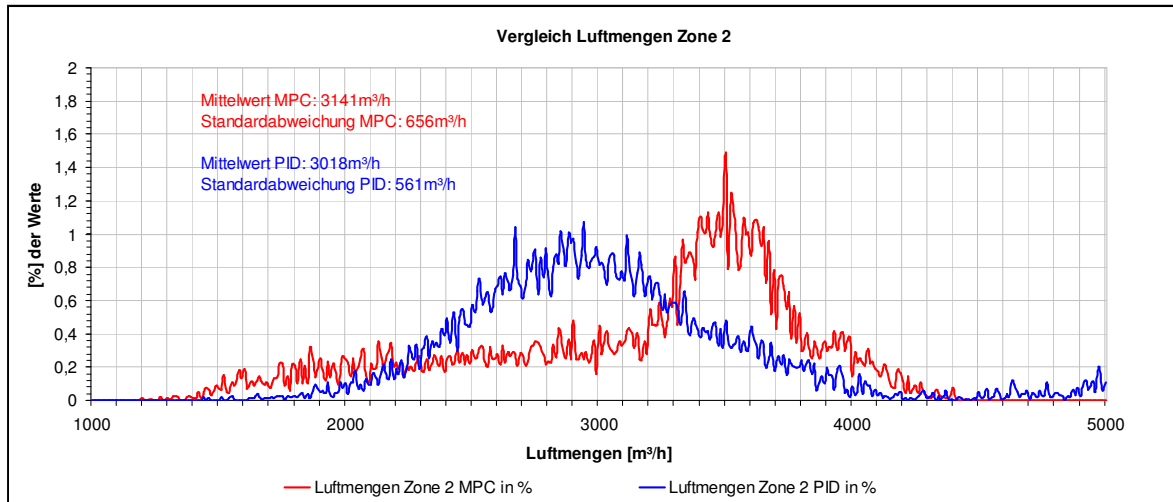


Abbildung 4.66: Luftverteilung Zone 2

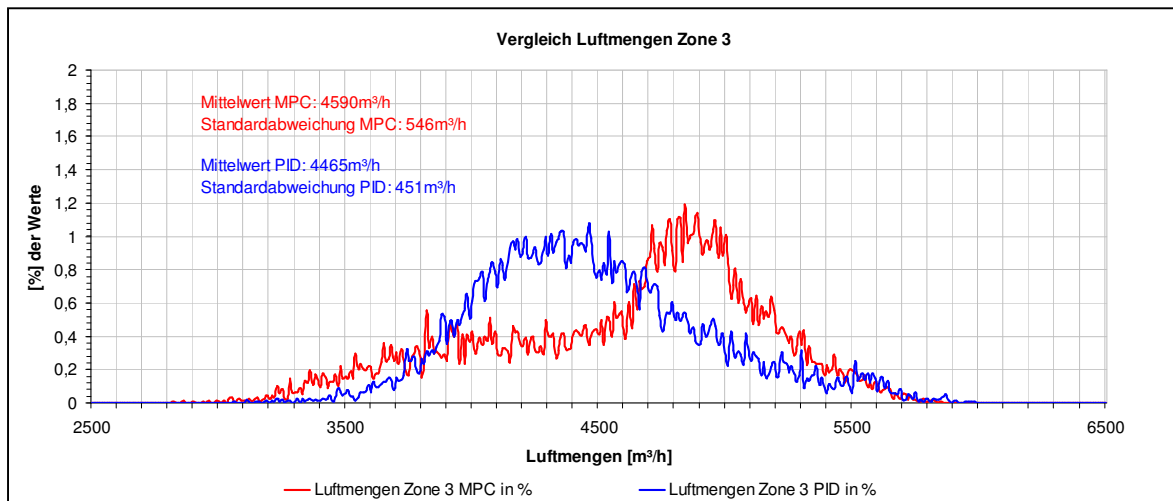


Abbildung 4.67: Luftverteilung Zone 3

4.4.4.8 MPC im Bereich Rost (Versuchsreihe 6.1)

Bereich	NR.	Bezeichnung	Verlauf
Rost	6	Versuch Rost (Anlage)	
	6.1	MPC	
24.11.2010	6.1.1	Rostgeschwindigkeit	-Erhöhung Rostgeschwindigkeiten (Zone 1-5) -Regler Rost werden auf Hand genommen -Sollwertsprünge im Bereich von 20% und -20% -Es wird je eine Veränderung der Dampfmenge im Bereich von +5 t/h erwartet -Dauer pro Sprung ca. 30min
24.11.2010	6.1.1.1	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.1. -Erhöhung Rostgeschwindigkeiten (Zone 1-5) -Regler Rost werden auf Hand genommen -Sollwertsprünge im Bereich von 50% und -50% -Es wird je eine Veränderung der Dampfmenge im Bereich von +5 t/h erwartet -Dauer pro Sprung ca. 30min
24.11.2010	6.1.2	Rostgeschwindigkeit	-Zusätzlich zu 6.1.1 wird die Strecken Luft auf Hand genommen
24.11.2010	6.1.2.1	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.2 -Zusätzlich zu 6.1.1 werden die Strecken Aufgabe und Luft auf Hand genommen
25.11.2010	6.1.2.2	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.2.1 -Zusätzlich zu 6.1.1 werden die Strecken Aufgabe und Luft auf Hand genommen -Sprunghöhe im Bereich von 100% und -100%
09.11.2011	6.1.3	Rostgeschwindigkeit	-NEUE VERSUCHSREIHE 2011 -Erhöhung Rostgeschwindigkeiten (Zone 1-5) -Regler Rost werden auf Hand genommen -Sollwertsprünge im Bereich von 80% und -80% -Es wird je eine Veränderung der Dampfmenge im Bereich von +5 t/h -Dauer pro Sprung ca. 30min
09.11.2011	6.1.4	Rostgeschwindigkeit	-NEUE VERSUCHSREIHE 2011 Variante von 6.1.3 -Dauer pro Sprung ca. 30min -Zusätzlich zu 6.1.3 werden die Strecken Aufgabe und Luft auf Hand genommen
09.11.2011	6.1.4.1	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.4 -Dauer pro Sprung ca. 30min
09.11.2011	6.1.4.2	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.4 -Dauer pro Sprung ca. 30min
09.11.2011	6.1.4.3	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.4 -Dauer pro Sprung ca. 30min
10.11.2011	6.1.4.4	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.4 -Sprung auf -80% -Dauer pro Sprung ca. 30min
17.11.2011	6.1.4.5	Rostgeschwindigkeit	Variante von 6.1.4 -Sprung auf -80% -Dauer pro Sprung ca. 30min

Im Folgenden werden die Versuche an der Regelstrecke Rost beschrieben. Diese wurden vom 23.11.2010 bis zum 25.11.2010 im GKS Schweinfurt durchgeführt wurden. Dabei soll der Regler Dampf durch einen MPC ersetzt werden, bzw. mit dem PID-Tuner optimiert. Dieser ist in untenstehender Abbildung rot markiert.

In der untenstehenden Tabelle ist die Legende für die Trends aufgeführt. Die Zeitachse ist immer für 1 Stunde skaliert, falls nichts anderes angegeben ist.

Dampf Sollwert	FD_SW	Dampf Istwert	FD_IW
Sauerstoff	O2	Geschwindigkeit Aufgabe	V_AUFG
Dampfdruck	FD_P	Geschwindigkeit Rost 1	V_ROST1
Aufgabebeweg	AUFG_WEG	Geschwindigkeit Rost 2	V_ROST2
Stellgröße Regler ROST	LMN_ROST	Geschwindigkeit Rost 3	V_ROST3

Abbildung 4.68: Legende für wichtige Größen der Versuchsreihe Rost

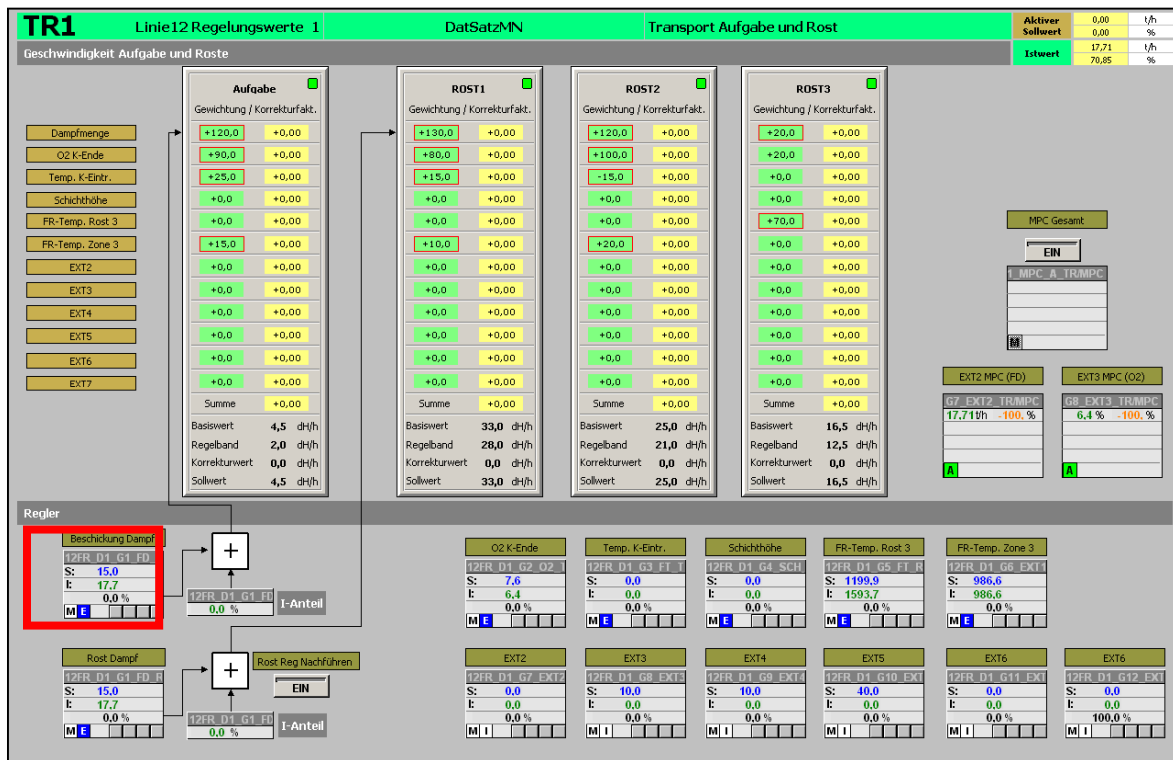


Abbildung 4.69: Regelung Rost

Für den MPC-Entwurf ist eine Sprungantwort der Regelstrecke notwendig. Die Anregung sollte dabei symmetrisch um den Arbeitspunkt erfolgen. Im nächsten Abschnitt werden die durchgeführten Versuche beschrieben.

4.4.4.8.1 Sprungantworten Regler Luft und Aufgabe aktiv (Versuchsreihe 6.1.1 und 6.1.3)

Im ersten Versuch wurde eine Sprunghöhe von $\pm 20\%$ gewählt. Dies entspricht einer Änderung der Rostgeschwindigkeiten von:

6.1.1	0	20%	-20%
Rost 1	33,9	41,4	26,4
Rost 2	25,7	30,9	20,5
Rost 3	17,2	17,7	16,7

Angaben in [dH/h]

Als Ergebnis zu diesem Versuch kann gesagt werden, dass kaum ein Einfluss in der Dampfmenge zu sehen ist. Die Zeitpunkte der Sprünge sind im Trend durch schwarze Pfeile gekennzeichnet.

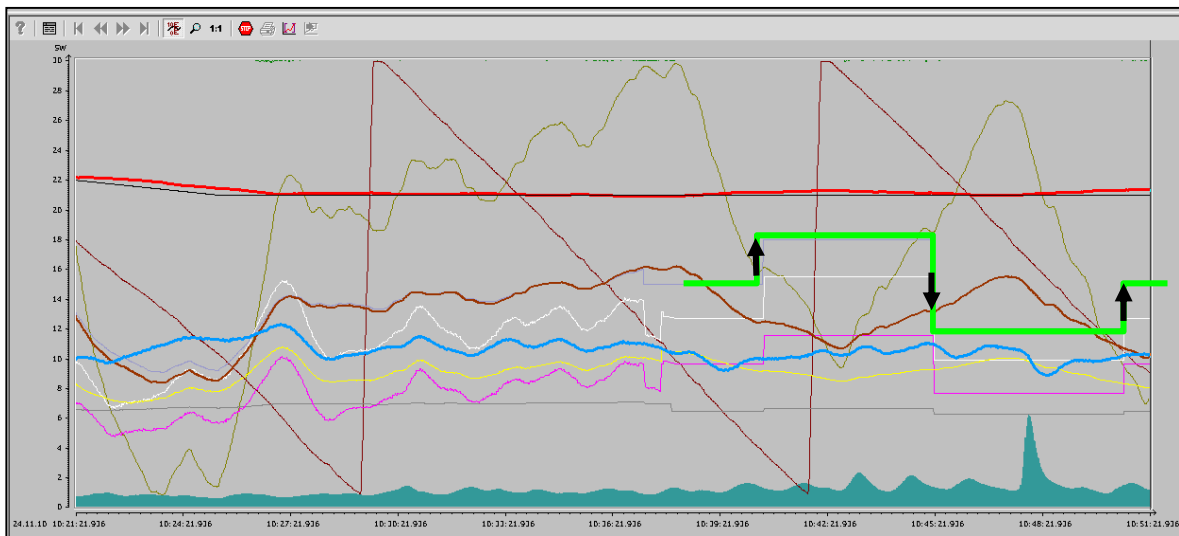


Abbildung 4.70: Sprungantwort Versuch 6.1.1 [30min]

Im Versuch 6.1.1.1 wurde die Sprunghöhe auf $\pm 50\%$ erhöht. Wie in Abbildung 4.71 zu sehen, ist hier ein vergleichsweise nur leicht erhöhter Einfluss auf die Dampfmenge zu sehen (ein starker Anstieg wäre eine Dampfmengenerhöhung um 10 % und mehr).

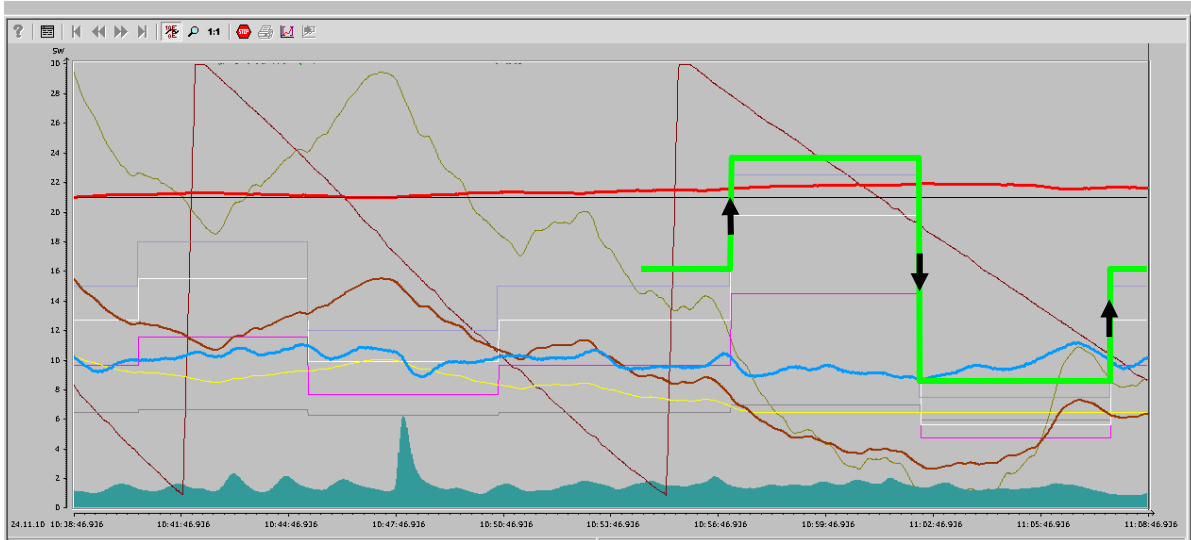


Abbildung 4.71: Trend Versuch 6.1.1.1 [30min]

Mit der Versuchsreihe 6.1.3 im Zeitraum vom 8.11.2011 bis 10.11.2011 wurde ein weiterer Versuch mit aktiven Luft und Aufgabe-Reglern durchgeführt. Die Sprunghöhe wurde auf 80% festgelegt. Wie in Abbildung 4.72 zu erkennen, erfolgt keine Reaktion auf den Sprung. Das kann vermutlich mit dem Gegenregeln der Luft erklärt werden. Der Verlauf ist in Abbildung 4.73 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Sprung nach oben die Luftmenge abgesenkt wird, beim Sprung nach unten wird die Luftmenge erhöht.

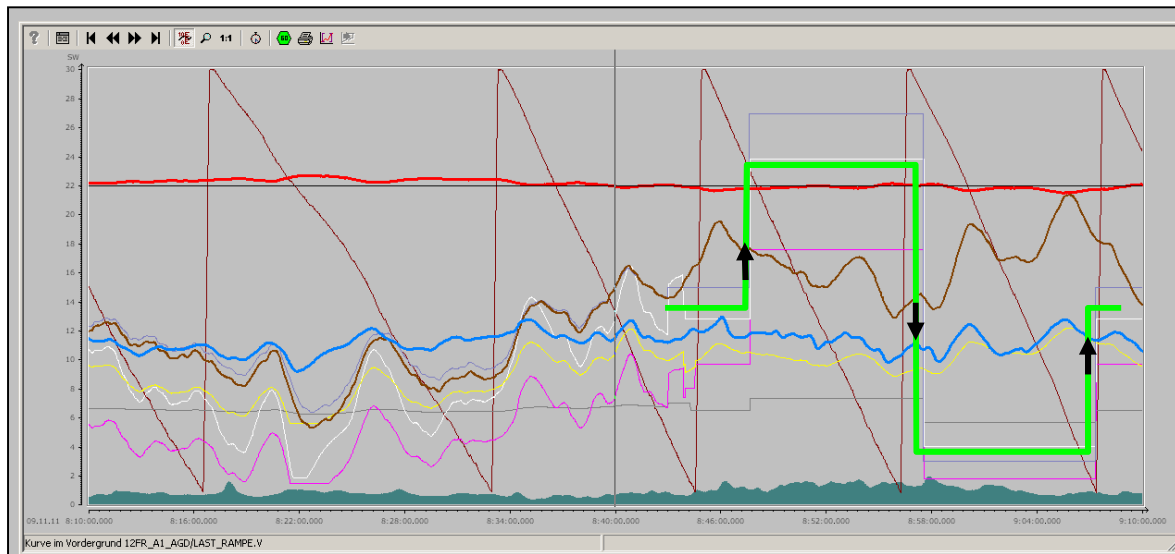


Abbildung 4.72: Trend Versuch 6.1,2, Verlauf Rost

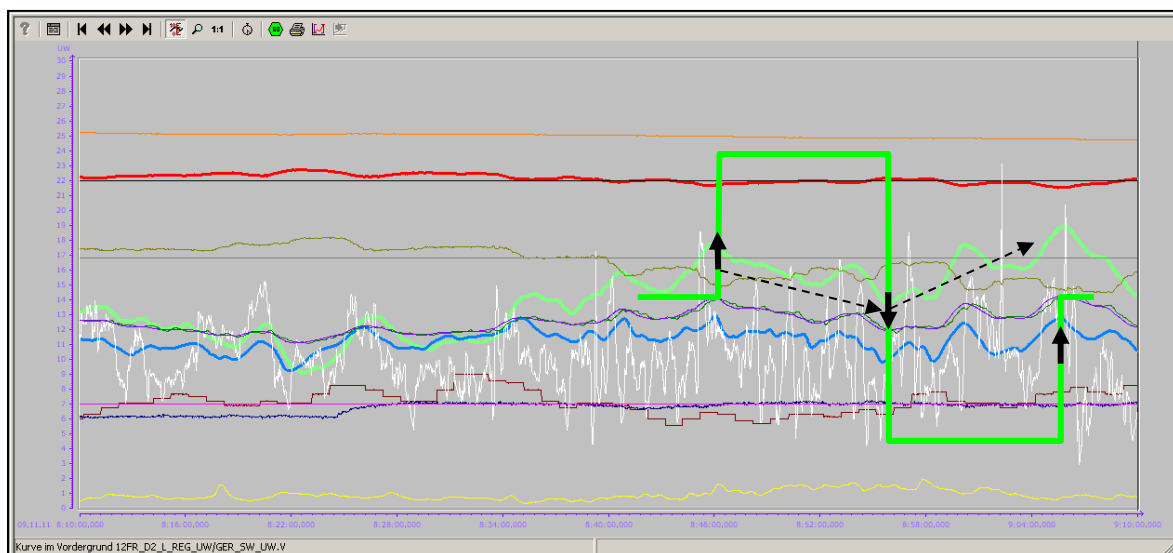


Abbildung 4.73: Trend Versuch 6.1,2, Verlauf Luft

4.4.4.8.2 Sprungantworten Regler Luft und Aufgabe inaktiv (Versuchsreihe 6.1.2 und 6.1.4)

In den folgenden Versuchsreihen sind alle Regler für die Strecken Luft, Rost und Aufgabe ausgeschaltet. In Abbildung 4.74 ist der Versuchsverlauf für 6.1.2 dargestellt. Für den ersten Sprung wurde eine Sprunghöhe von $\pm 20\%$ gewählt. Es ist kaum eine Reaktion zu erkennen.

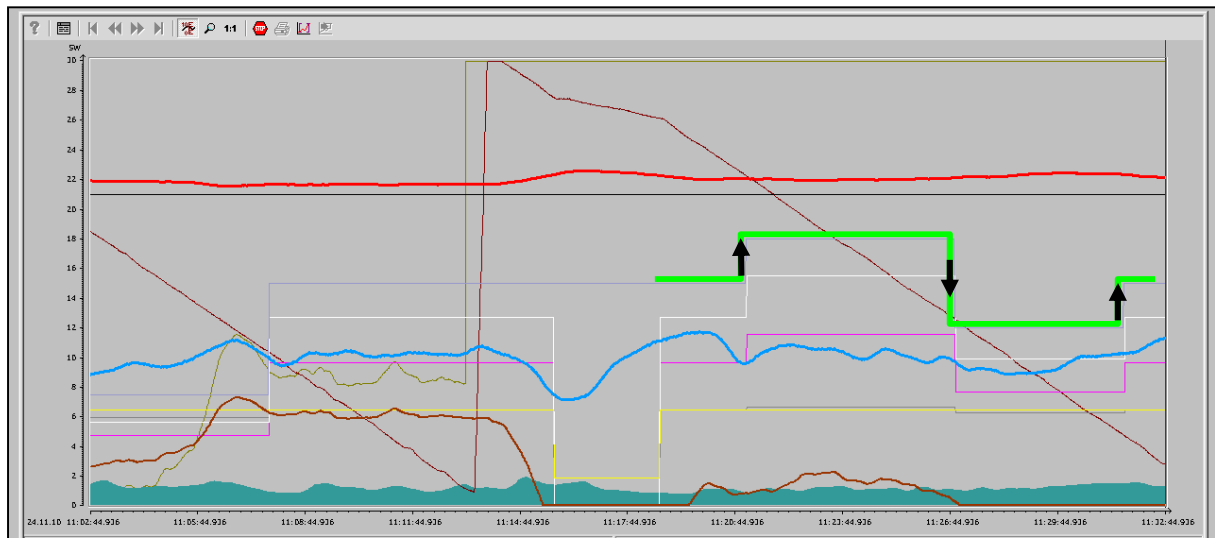


Abbildung 4.74: Sprungantwort Versuch 6.1.2

Im Versuch 6.1.2.2 wurde die Sprunghöhe auf $\pm 100\%$ erhöht. Wie in Abbildung 4.75 zu sehen steigt hier die Dampfmenge stark an.

Bei 24,5 t/h Frischdampf wurde der Sprung auf -100% genommen, um ein weiteres Ansteigen zu verhindern. Anschließend beginnt nach kurzer Verzögerung, die Dampfmenge zu fallen.

Als Ergebnis kann man festhalten, dass die Sprungantwort grundsätzlich dem erwarteten entspricht. Es sollten weitere Sprungantworten aufgenommen werden, um das Ergebnis zu bestätigen.

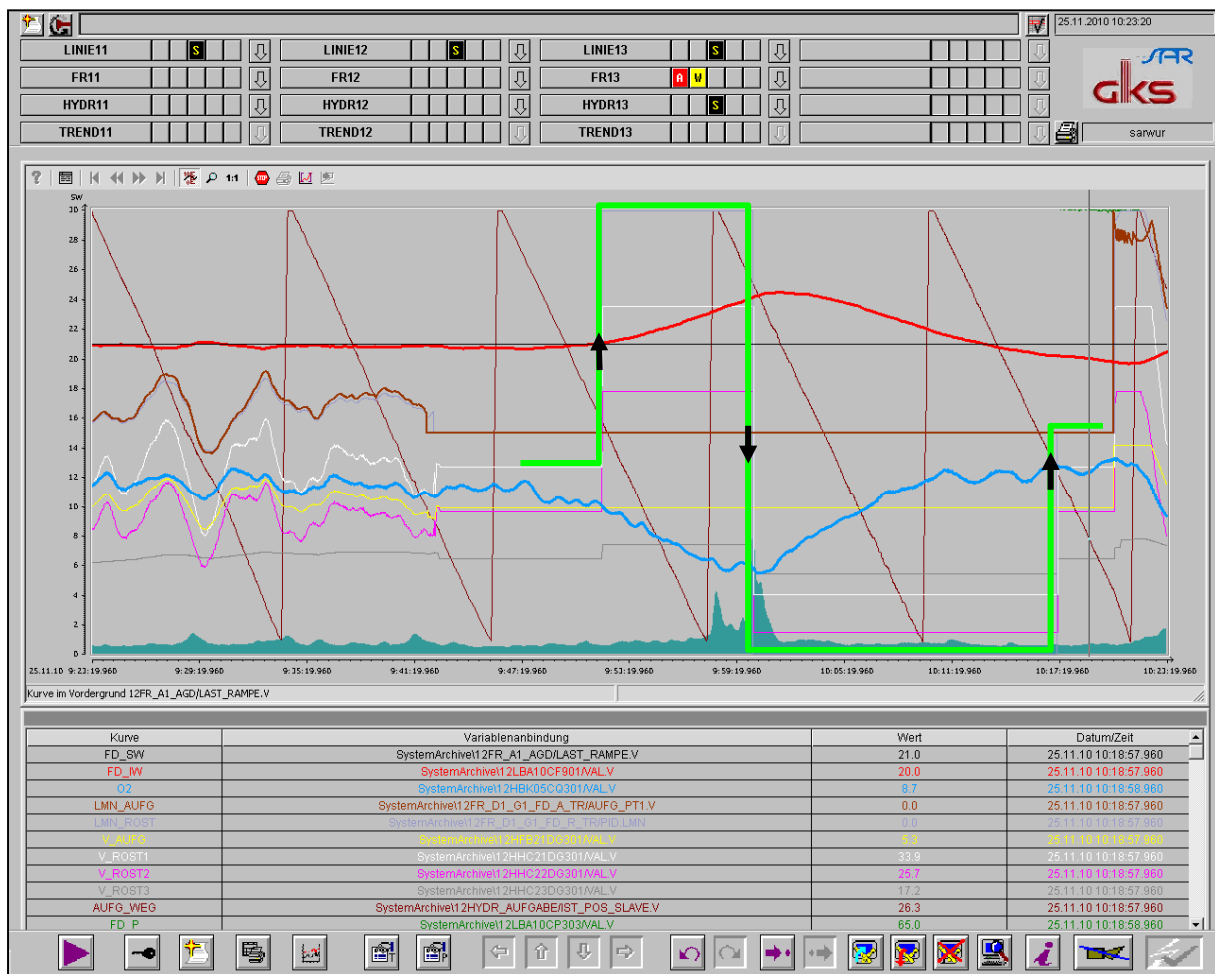


Abbildung 4.75: Sprungantwort Versuch 6.1.2.2

Mit der Versuchsreihe 6.1.4 wurden weitere Sprungantworten aufgenommen. Hierbei wurde bemerkt, dass die Reaktionen auf die Sprünge unterschiedlich sind. Bei einem Teil der Versuche wurde eine starke Reaktion erzielt, bei manchen Versuchen war keine Reaktion zu erkennen. Die aufgeprägte Sprunghöhe und die damit verbundene Rostgeschwindigkeit waren bei allen Versuchen gleich.

In den Versuchen 6.1.4 und 6.1.4.1 wurden als erstes die Stellgröße des Dampf-Rost Reglers auf 80% erhöht. Bei beiden Versuchen, siehe Abbildung 4.76 und Abbildung 4.77, ist kaum eine Reaktion zu erkennen. Nach ca. 10 Minuten wurde die Stellgröße auf -80% gestellt. In beiden Versuchen ist die Frischdampfmenge anschließend gefallen.

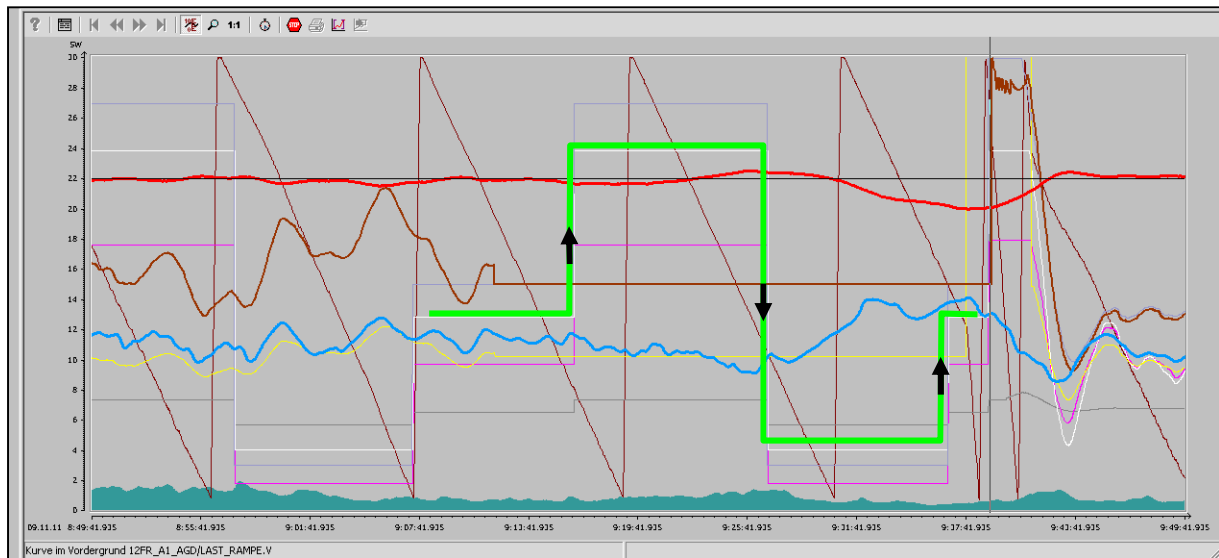


Abbildung 4.76: Versuch 6.1.4 Rost



Abbildung 4.77: Versuch 6.1.4.1 Rost

Im Versuch 6.1.4.2 erfolgt eine starke Reaktion der Frischdampfmenge auf die Erhöhung der Stellgröße des Reglers. Bei einer Dampfmenge von 24,5 t/h wurde der Versuch abgebrochen. Der Verlauf ist in untenstehender Abbildung 4.78 zu sehen.

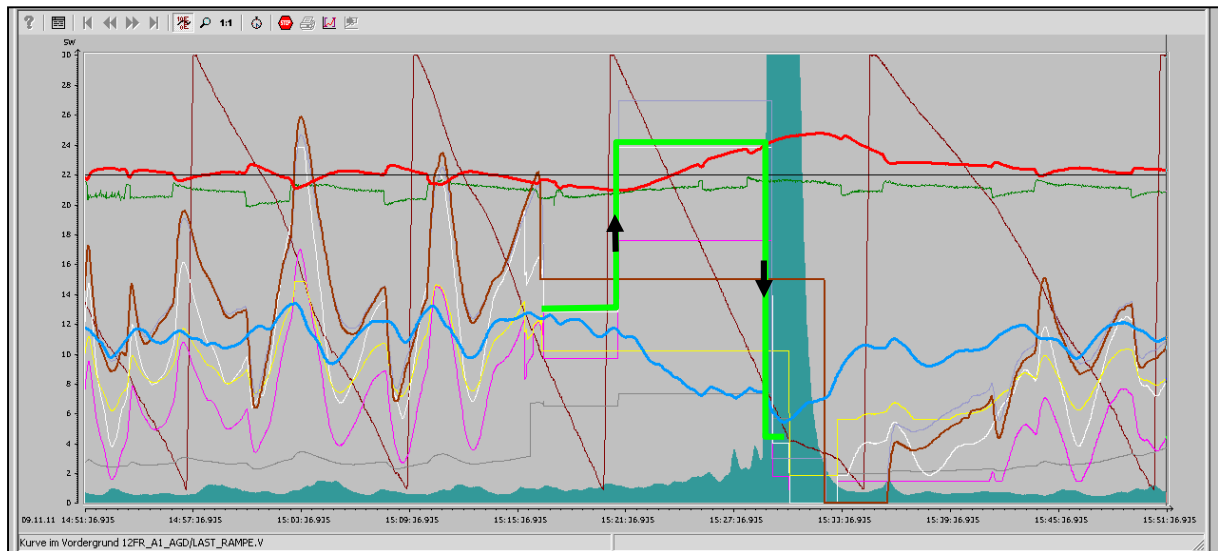


Abbildung 4.78: Versuch 6.1.4.2 Rost

Der Trend für den Versuch 6.1.4.3 ist in Abbildung 4.79 dargestellt. Es erfolgt eine Reaktion des Dampfes auf die Änderung der Stellgröße auf 80%. Nach 10 Minuten wird die Stellgröße auf -80% abgesenkt. Nach weiteren 5 Minuten wird der Versuch abgebrochen, da der Sauerstoff zu stark abgesunken ist.

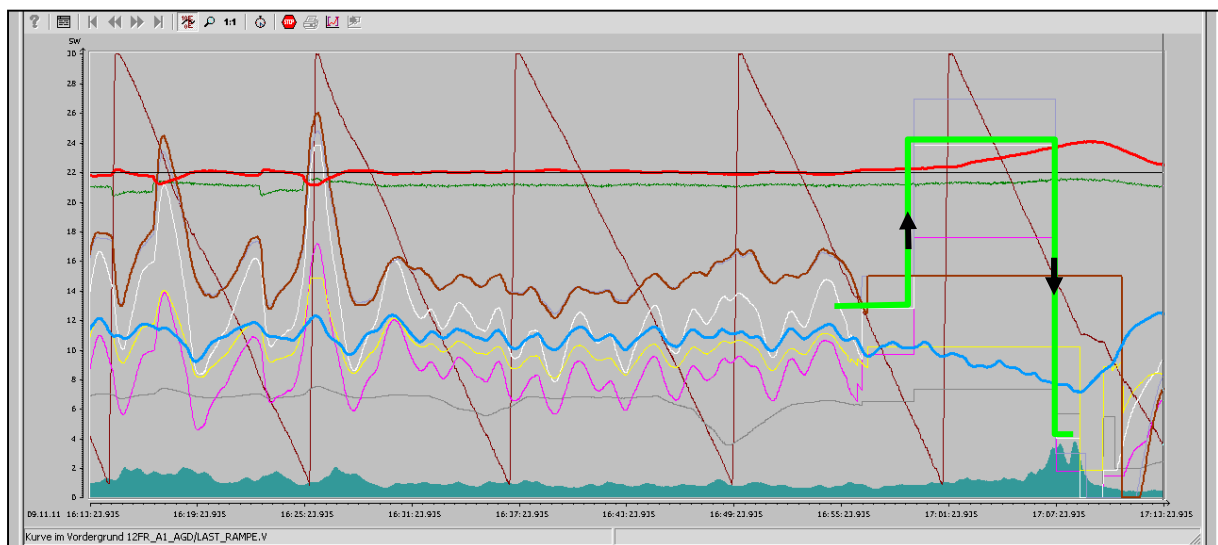


Abbildung 4.79: Versuch 6.1.4.3 Rost

Im Versuch 6.1.4.4, siehe Abbildung 4.80, soll versucht werden, ob mit einer umgedrehten Reihenfolge der Stellgröße O₂-Min und CO-Spitzen vermieden werden können. Die Stellgröße der Reglers Dampf-Rost wird auf -80% gestellt. Die Dampfmenge fällt stetig ab. Bei 19 t/h wird die Stellgröße auf 80% erhöht. Die Dampfmenge beginnt langsam zu steigen. Nach

knapp 20 Minuten ist der Sollwert immer noch nicht erreicht. Daher wurde der Versuch abgebrochen und die Regelung wieder auf Automatik-Betrieb zurückgeschaltet.

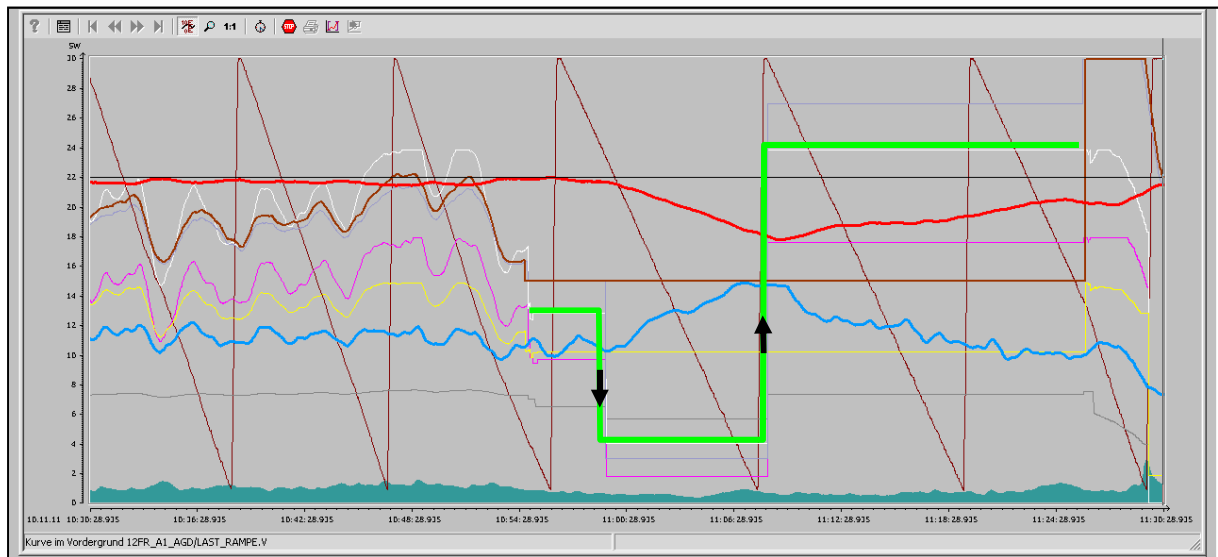


Abbildung 4.80: Versuch 6.1.4.4 Rost

Mit dem Versuch 6.1.4.5 konnte eine Sprungantwort mit guter Qualität erzielt werden. Die Dampfmenge steigt nach der Erhöhung Stellgröße an. Nach ca. 10 Minuten wird die Rostgeschwindigkeit wieder abgesenkt. Die Dampfmenge beginnt zu fallen. Mit dem Sprung auf 0% der Reglerstellgröße beginnt die Dampfmenge wieder zu steigen.

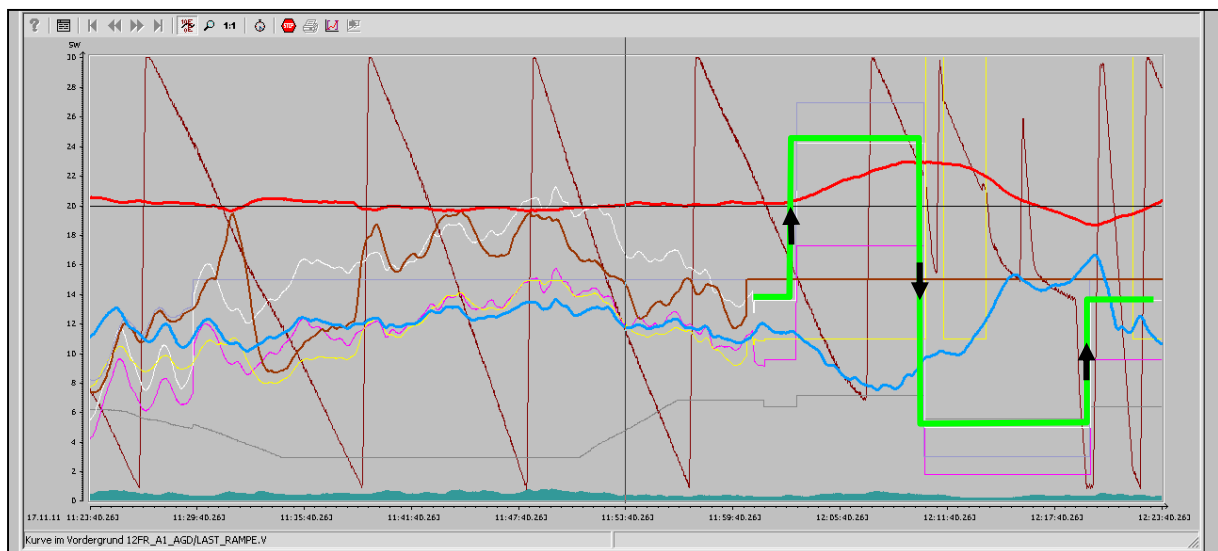


Abbildung 4.81: Versuch 6.1.4.5 Rost

Mit dem PID Versuch 6.2.2.1 konnte ebenfalls ein guter Parametersatz für den MPC-Entwurf generiert werden.

4.4.4.8.3 Entwurf MPC Regler

Basierend auf der Datenreihe aus den Versuch 6.1.4.5 soll ein MPC entworfen werden. Mit diesen Datenreihen kann ein Modell mit einer Güte von 77% identifiziert werden.

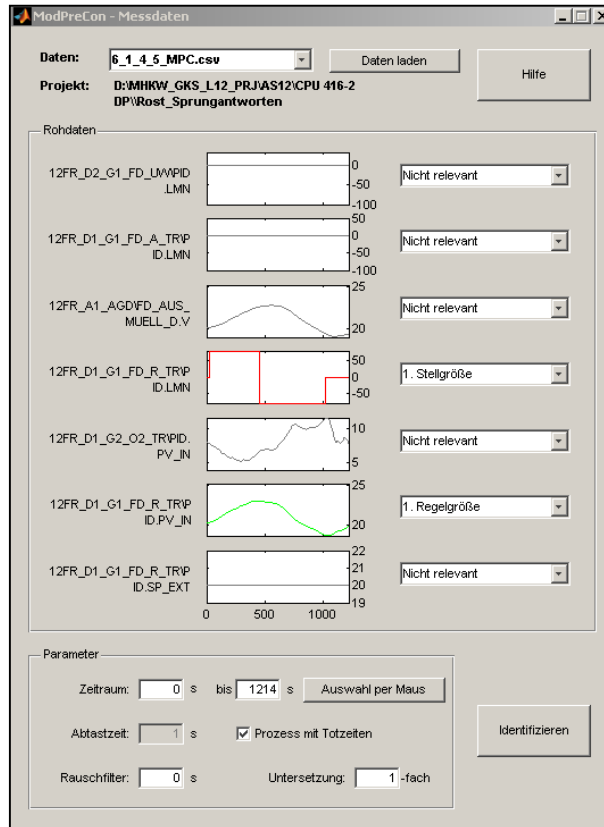


Abbildung 4.82: Messdaten MPC Rost

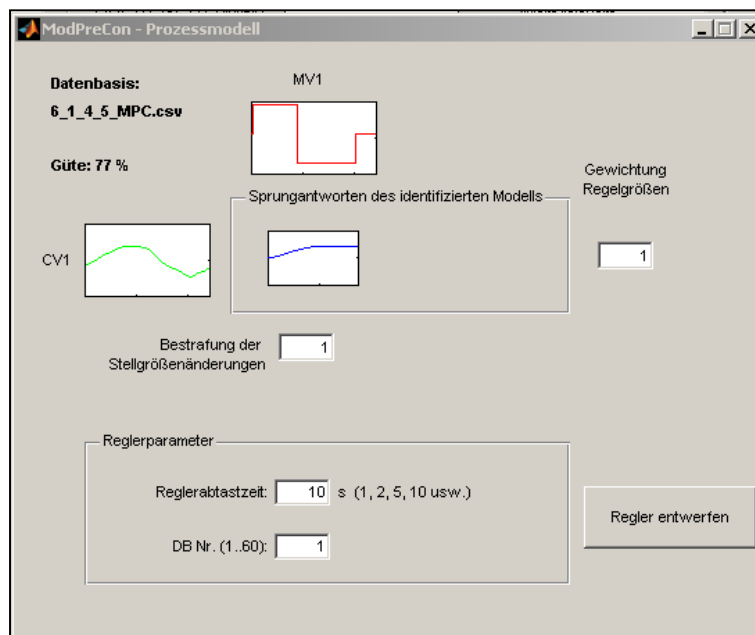


Abbildung 4.83: Prozessmodell MPC Rost

4.4.4.9 Untersuchung Zeitverhalten MPC

4.4.4.9.1 Parameter Entwurfsphase

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie durch die Parameter „Bestrafung der Stellgrößenänderungen“ und „Gewichtung Regelgrößen“ das Zeitverhalten beim Entwurf des MPC beeinflusst werden kann. Diese Parameter können nur während des Entwurfs verändert werden. Es wird der unter 4.4.4.7.3 entworfene Regler verwendet.

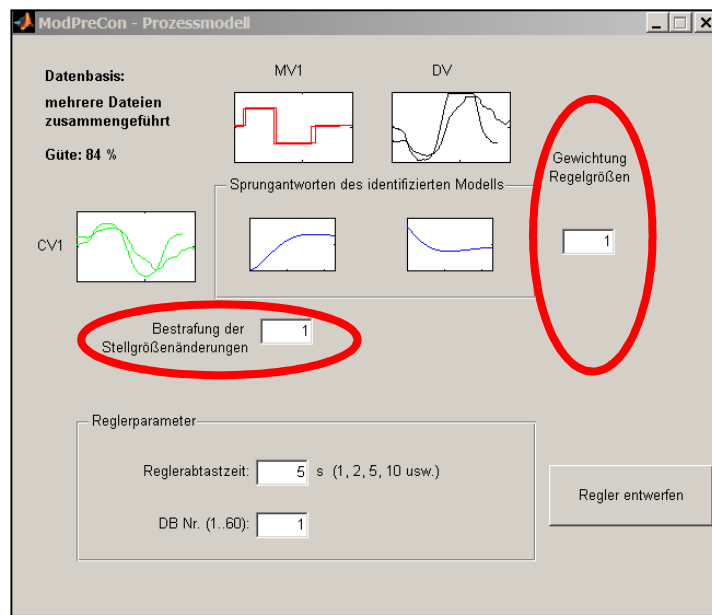


Abbildung 4.84: ModPreCon Parameter Entwurfsphase

Der dabei verwendete MPC basiert auf den Versuchsreihen 5.1.1.1 und 5.1.1.2. Zur Untersuchung werden zwei MPC Bausteine mit unterschiedlichen Datenbausteinen beschaltet, die aber auf denselben Datensätzen basieren. In Abbildung 4.85 und Abbildung 4.86 ist der Verlauf des ersten Versuches zu sehen. Dabei wurden folgende Parameter verwendet:

	MPC 1	MPC 2
Bestrafung der Stellgrößenänderungen	1	5
Gewichtung Regelgrößen	1	1

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Regler MPC_1 schneller als MPC_2 reagiert. Beim langsameren Regler wurde eine Bestrafung der Stellgrößenänderungen von 5 eingestellt.

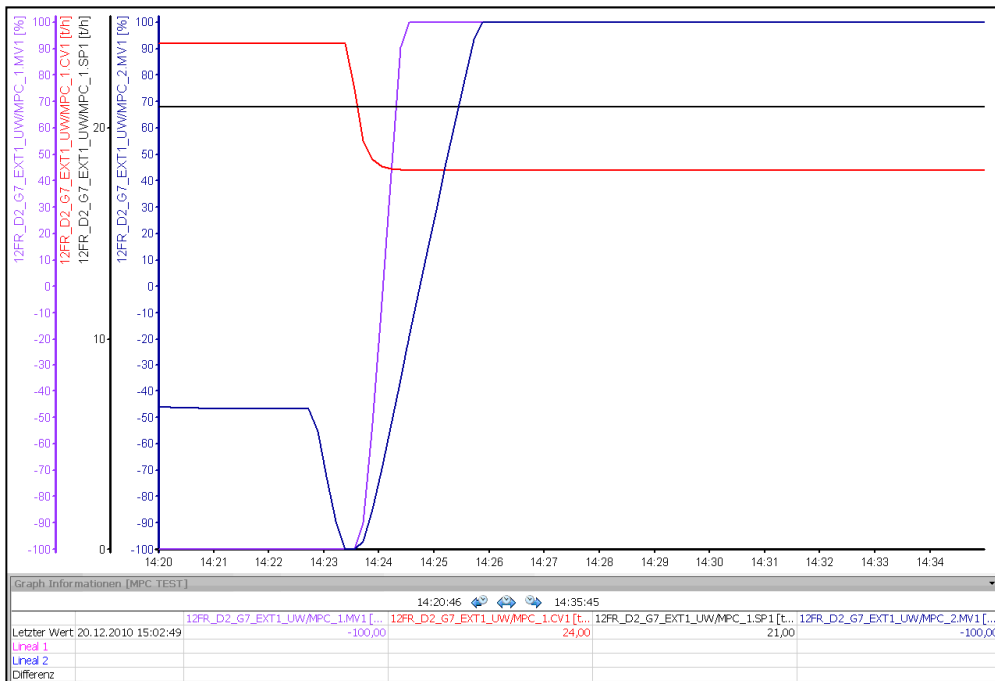


Abbildung 4.85: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Bestrafung der Stellgrößenänderungen

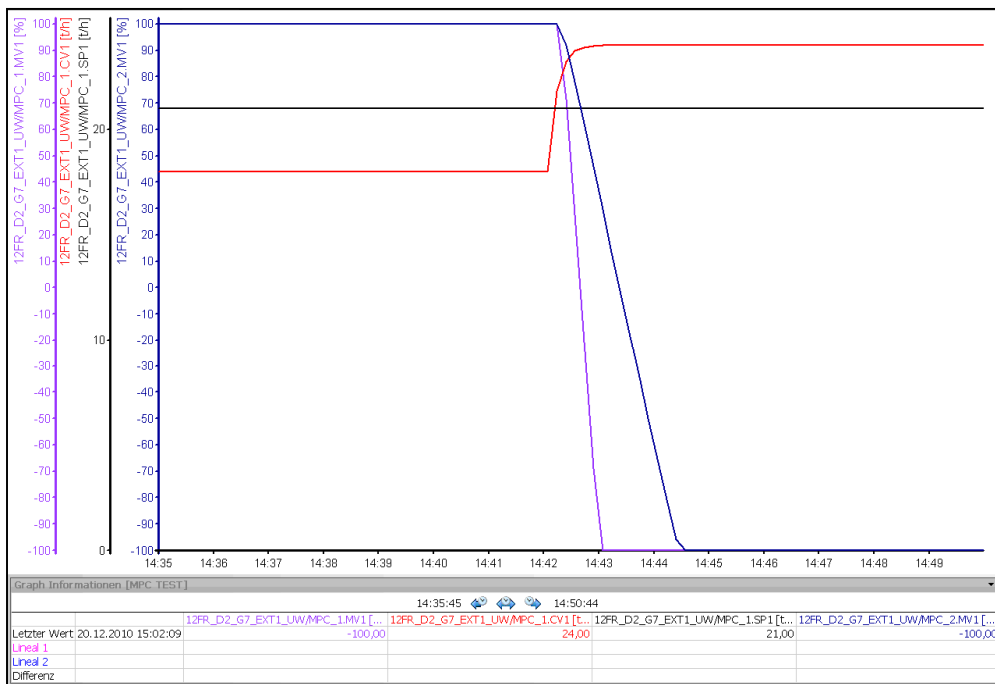


Abbildung 4.86: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Bestrafung der Stellgrößenänderungen

Als nächstes wird untersucht, wie die Gewichtung der Regelgrößen das Zeitverhalten beeinflusst. Wie in Abbildung 4.87 zu sehen, ist nun der MPC_2 schneller.

	MPC_1	MPC_2
Bestrafung der Stellgrößenänderungen	1	1
Gewichtung Regelgrößen	1	5

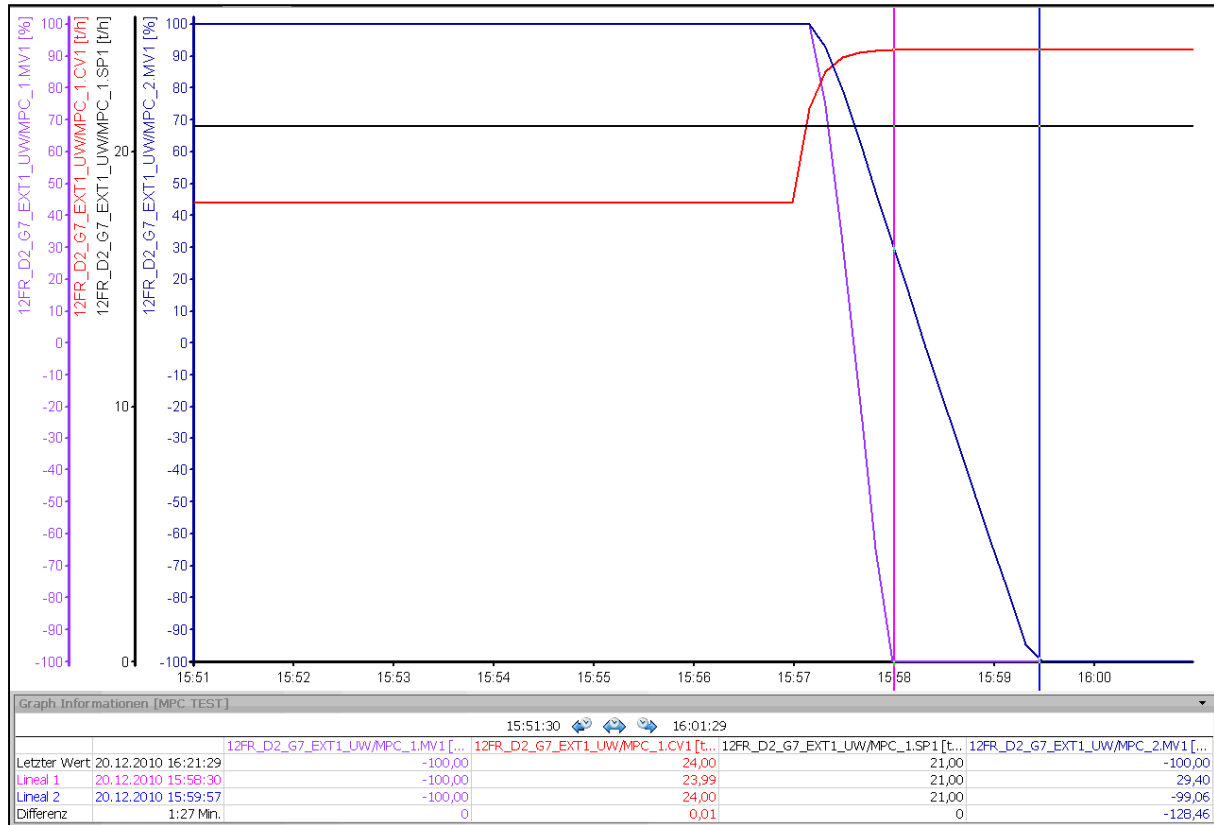


Abbildung 4.87: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Gewichtung Regelgröße

Wie bereits erwähnt, können diese beiden „Stellschrauben“ leider nur während der Entwurfsphase verändert werden. Somit ist eine Anpassung dieser Parameter immer mit einem gewissen Aufwand verbunden.

4.4.4.9.2 Parameter Online

Online kann das Verhalten mit dem Parameter PreFilt beeinflusst werden. Dieses Verhalten soll nun untersucht werden. Dazu werden beide MPC-Bausteine mit dem gleichen DB beschaltet, jedoch unterschiedliche Zeitkonstanten für PreFilt eingestellt.

	MPC_1	MPC_2
Versuch 1: PreFilt	1	10000
Versuch 2: PreFilt	1	1000
Versuch 3: PreFilt	1	5000

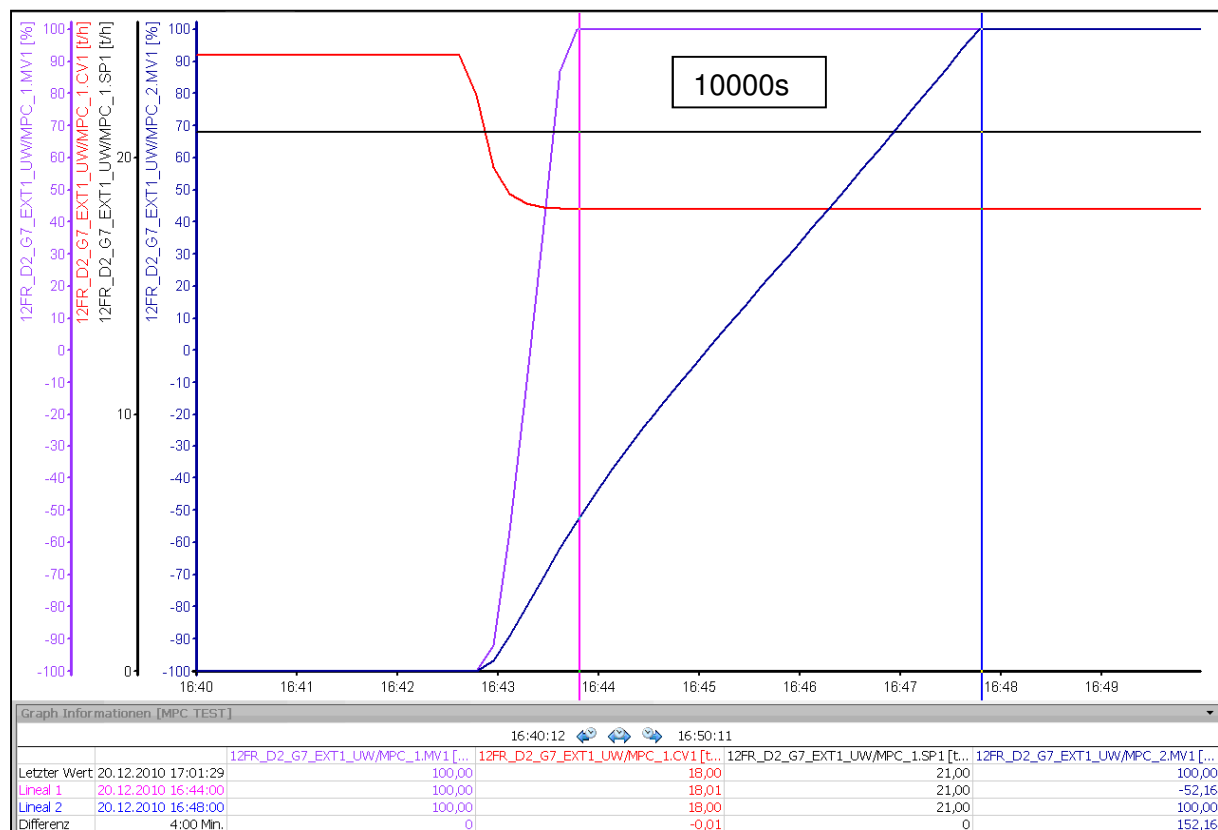


Abbildung 4.88: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Online Parameter PreFilt 10000s

In Abbildung 4.88 wurde der Parameter PreFilt beim MPC_2 auf 10000s gestellt. Dieser Regler ist nun deutlich langsamer. Zwei weitere Zeiten sind in Abbildung 4.89 zu sehen. Hier wurde die Zeit im ersten Versuch auf 1000s gestellt, im zweiten auf 5000s. Es kann festgestellt werden, dass die Verzögerung mit größeren Zeitkonstanten zunimmt. Allerdings ist im niedrigen Bereich, kleiner 1000s, kaum ein Einfluss zu sehen.

Hier sollte geprüft werden, ob dieses Verhalten auch bei anderen Modellen gezeigt werden kann.

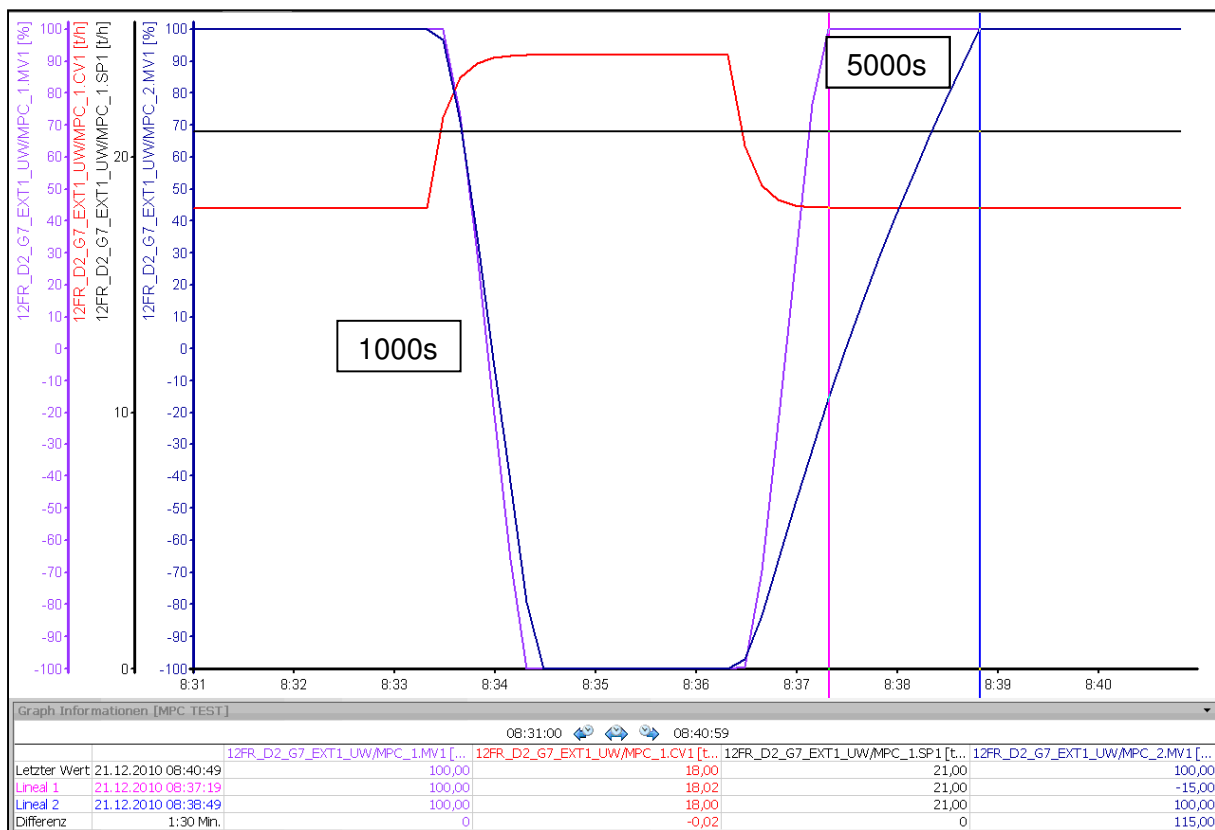


Abbildung 4.89: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Online Parameter PreFilt 1000s und 5000s

4.4.5 OPC-Modell-Kopplung und Vergleich mit Ist-Zustand bzw. MPC

Im Rahmen des Forschungsprojekts soll eine Validierung des Modells als Bestandteil einer Regelung durchgeführt werden. Als erster Schritt wurde das bestehende Feuerungsmodell dazu eingesetzt. Hier wurden Versuche im Zusammenhang der Schichthöhe durchgeführt.

4.4.5.1 Validierung Schichtdicke

Die Schichtdicke des Müllbetts in einer MVA kann bis heute nicht zuverlässig online gemessen werden. Jedoch stellt diese Größe eine elementare Information dar. Durch Integration dieser Größe in eine Feuerleistungsregelung wäre es möglich, Überschüttungen zu vermeiden und somit ungewünschte und gefährliche Betriebszustände zu verhindern.

Eine Möglichkeit, den Wert für die Schichthöhe dennoch zu erhalten, ist diesen mit Hilfe eines so genannten Softsensors zu berechnen. Das weiter oben bereits beschriebene Feuer-

rungsmodell kann diese Information zur Verfügung stellen. In Abbildung 4.90 ist der Verlauf der berechneten Schichthöhe über eine Zeit von zwölf Stunden dargestellt.

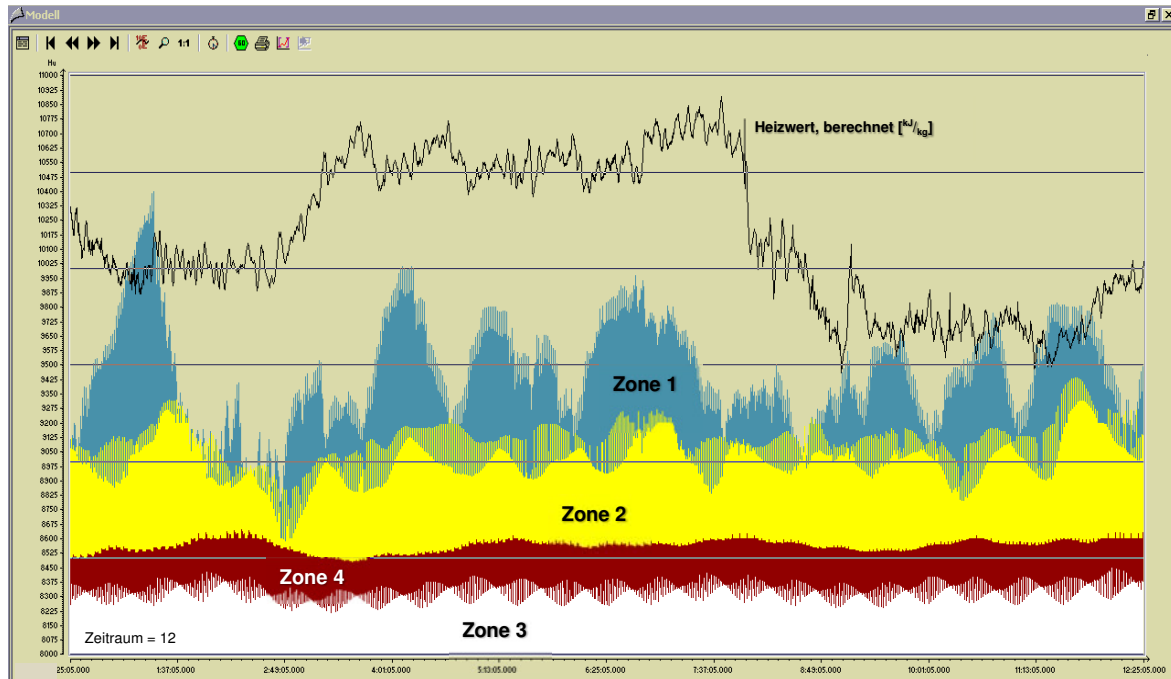
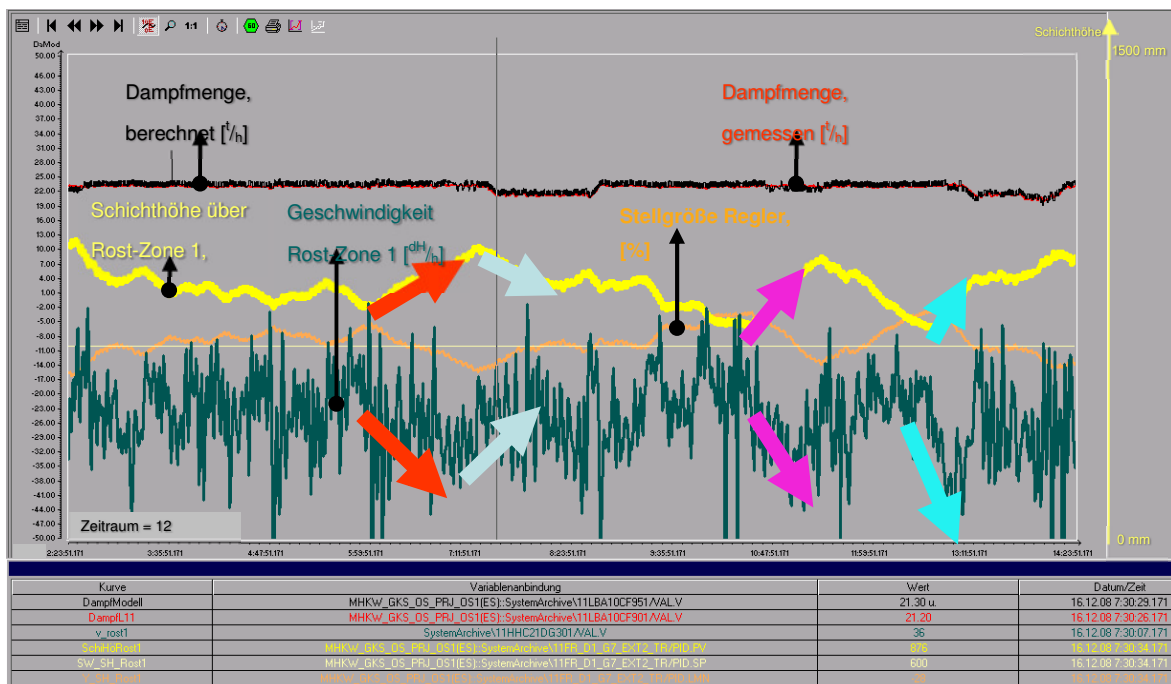


Abbildung 4.90: Schichthöhenverlauf über 12 Stunden (vom Modell gerechnet)

4.4.5.2 Schichtdicke als Softsensor

Die vom Modell berechnete Schichtdicke wurde in ersten Versuchen als Regelgröße eingesetzt. Bei dieser Methode spricht man von einem Softsensor oder im Gesamten von einem MBC, einem modellbasierten Regler (model based control). Im ersten Schritt wurde diese Größe zusammen mit einem PID-Regler eingesetzt.



Dampfmenge berechnet	DampfModell	Dampfmenge gemessen	DampfL11
Sollwert Schichthöhe Rost 1	SW_SH_Rost1	Schichthöhe Rost 1	SchiHöRost1
Geschwindigkeit Rost 1	v_rost1	Stellgröße Regler Schichthöhe	Y_SH_Rost1

Abbildung 4.91: Betrieb mit aktivem Schichthöhenregler Rost-Zone 1

In Abbildung 4.91 ist der Verlauf der aktiven Schichthöhenregelung, die auf die Rostgeschwindigkeiten wirkt, dargestellt. Die orange Linie ist die Reglerstellgröße des Schichthöhenreglers und man erkennt deutlich, dass sich bei einem tendenziellen Rückgang bzw. einer tendenziellen Verlangsamung der Rostgeschwindigkeiten, die natürlich von etlichen anderen Einflüssen überlagert sind, auch eine dementsprechende Schichthöhe im Modell einstellt.

Die Kopplung und die beschriebenen Versuche wurden für das bereits bestehende Modell getestet. Versuche mit dem neuen Modell werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

Dabei soll gezeigt werden, dass die Schichthöhe das erwartete Verhalten zeigt. So sollte eine Erhöhung der Geschwindigkeit vom Rost 1 dazu führen, dass die Schichthöhe in den vorderen Zonen sinkt und sich in den hinteren Zonen etwas anstaut, da hier die Rostgeschwindigkeit unverändert ist.

Genau dieses Verhalten konnte gezeigt werden. Wie in Abbildung 4.92 zu sehen, beginnen nach der Erhöhung der Rostgeschwindigkeit von Rost 1 die Schichthöhen 1 und 2 zu sinken. Die Schichthöhen 3 und 4 steigen an.



Abbildung 4.92: Verlauf Schichthöhe bei Erhöhung Rostgeschwindigkeit

Schichthöhe 1	Schichthöhe 4	Geschwindigkeit Rost 1
Schichthöhe 2	Schichthöhe 1	Geschwindigkeit Aufgabe
Schichthöhe 3		

In einem zweiten Versuch wird die Aufgabegeschwindigkeit erhöht. In Abbildung 4.93 ist zu sehen, dass die Schichthöhen in den ersten Zonen ansteigen.

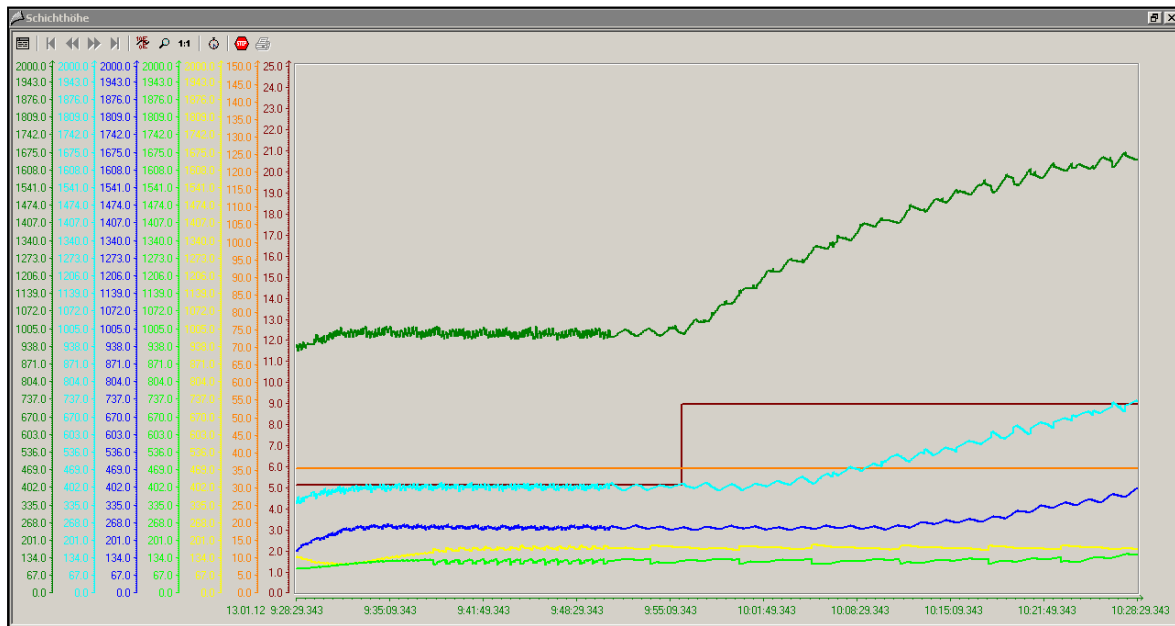


Abbildung 4.93: Verlauf Schichthöhe bei Erhöhung Aufgabegeschwindigkeit

4.4.6 Parametrierung, PID-Tuner

Die Analyse des Markts für automatische Parametrierung von PID-Reglern hat ergeben, dass im gegebenen Fall der Siemens PID-Tuner am besten geeignet ist. Dieser wurde bereits im Kapitel 3.2.6.2 näher beschrieben.

Um die Optimierung mit diesem Tool durchzuführen, ist es notwendig den Prozess anzuregen. Die Vorgehensweise zur Optimierung wird im Folgenden näher beschrieben.

4.4.6.1 Vorgehensweise zur Optimierung

Um die optimalen Regelparameter berechnen zu können, ist ein Modell der Regelstrecke notwendig. Das Modell wird durch Aufnahme einer Sprungantwort erstellt. Dazu muss erneut der echte Prozess angeregt werden. Dies erfolgt Schrittweise mit dem PID-Tuner:

- Schritt 1: Vorbereiten der Messwerterfassung
- Schritt 2: Prozess in den Startpunkt fahren
- Schritt 3: Am Startwert einschwingen lassen und Anregung aufschalten
- Schritt 4: Messwerterfassung
- Schritt 5: Prozessanregung zurücknehmen
- Schritt 6: Spezifikation des Reglerverhaltens
- Schritt 7: Auswahl des Reglertyps
- Schritt 8: Regelkreis-Simulation
- Schritt 9: Laden der Reglerparameter.

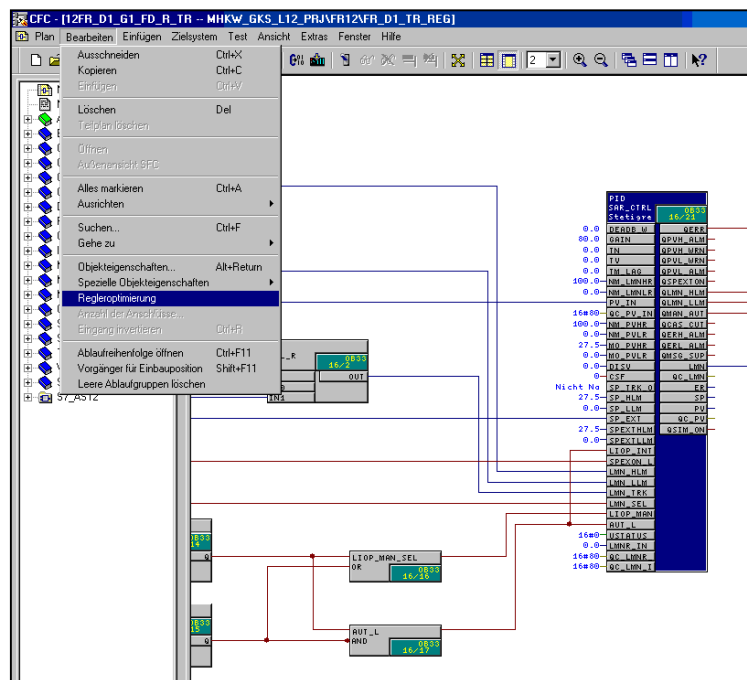
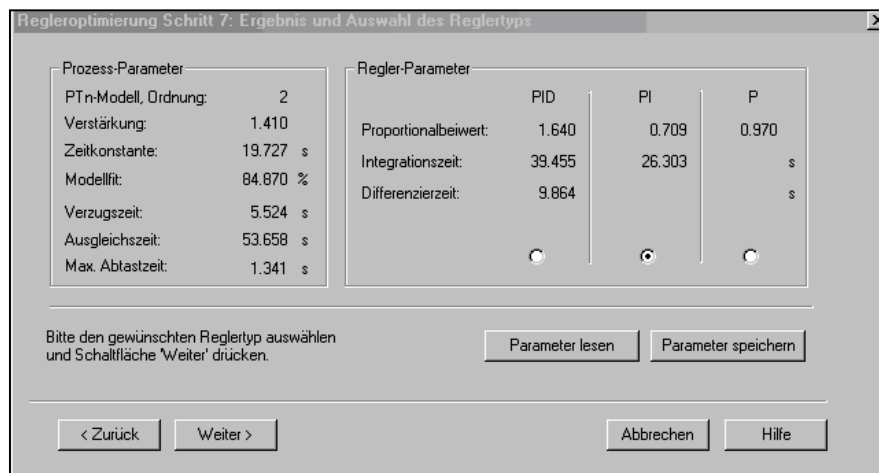


Abbildung 4.94: Regleroptimierung starten

Nach dem Markieren des zu optimierenden Reglers kann der PCS7 PID-Tuner wie in Abbildung 4.94 dargestellt gestartet werden. Im Schritt 1 wird angegeben, ob eine Strecke mit oder ohne Integralanteil vorliegt. Anschließend wird im Schritt 2 der Startpunkt für den Sprung festgelegt. Abhängig von der Betriebsart des Reglers wird ein Sollwert oder ein Stellwert vorgegeben. Im Schritt 3 wird der neue Wert ausgegeben und abgewartet bis sich der Prozess eingeschwungen hat. Anschließend wird der eigentliche Sprung auf die Strecke gegeben und die Messwerterfassung gestartet. Dies nimmt je nach Dynamik des Prozesses einige Zeit in Anspruch. Der PID-Tuner meldet, wenn die Datenerfassung abgeschlossen ist. Danach kann die Prozessanregung zurückgenommen werden.

Im Schritt 6 wird das Regelverhalten spezifiziert. Das heißt es wird festgelegt ob der Regler für optimales Störverhalten oder optimales Führungsverhalten entworfen werden soll. Anschließend werden im Schritt 7 die jeweiligen Prozess- und Regelparameter angezeigt. In der unten stehenden Abbildung 4.95 ist dieses Fenster dargestellt.



Prozess-Parameter		Regler-Parameter			
PTn-Modell, Ordnung:	2	PID	PI	P	
Verstärkung:	1.410	Proportionalbeiwert:	1.640	0.709	0.970
Zeitkonstante:	19.727 s	Integrationszeit:	39.455	26.303	s
Modellfit:	84.870 %	Differenzierzeit:	9.864		s
Verzugszeit:	5.524 s				
Ausgleichszeit:	53.658 s				
Max. Abtastzeit:	1.341 s				

Bitte den gewünschten Reglertyp auswählen und Schaltfläche 'Weiter' drücken.

Parameter lesen Parameter speichern

< Zurück Weiter > Abbrechen Hilfe

Abbildung 4.95: Schritt 7 Prozess- und Regelparameter

Für ein Modell zweiter Ordnung werden die Prozessparameter für untenstehende Übertragungsfunktion angegeben:

$$\frac{K}{1 + 2dT_s + T^2s^2} \quad \text{mit } T = \text{Zeitkonstante, } d = \text{Dämpfung, } K = \text{Verstärkung}$$

Für Modelle höherer Ordnung nach folgender Übertragungsfunktion

$$\frac{K}{(1 + Ts)^n} \quad \text{mit } T = \text{Zeitkonstante, } n = \text{Ordnung, } K = \text{Verstärkung}$$

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Parameter „Modellfit“. Dieser gibt an, wie gut der reelle Prozess mit dem Modell übereinstimmt. Im Feld Reglerparameter kann der gewünschte Regler (P, PI, PID) ausgewählt werden.

Im Schritt 8 kann der geschlossene Regelkreis mit dem ausgewählten Regler simuliert werden (Abbildung 4.96). So kann festgestellt werden, ob der entworfene Regler den gewünschten Ansprüchen genügt. In Abbildung 4.97 ist beispielhaft ein solcher Trend dargestellt.

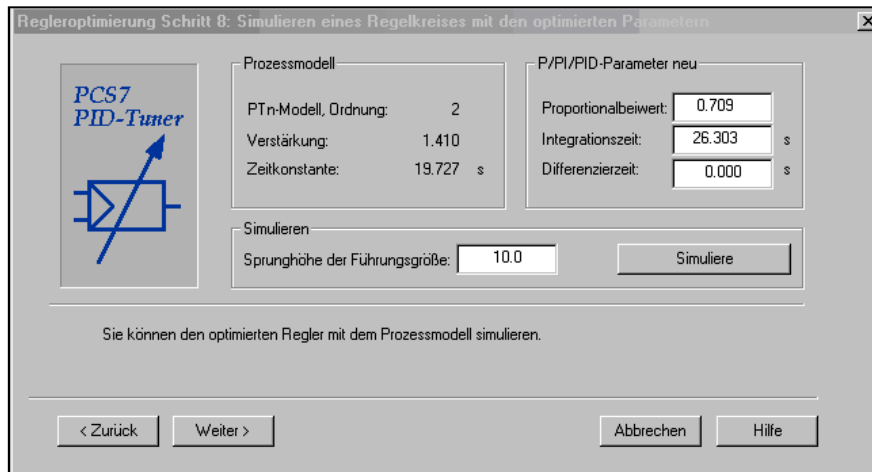


Abbildung 4.96: Simulation

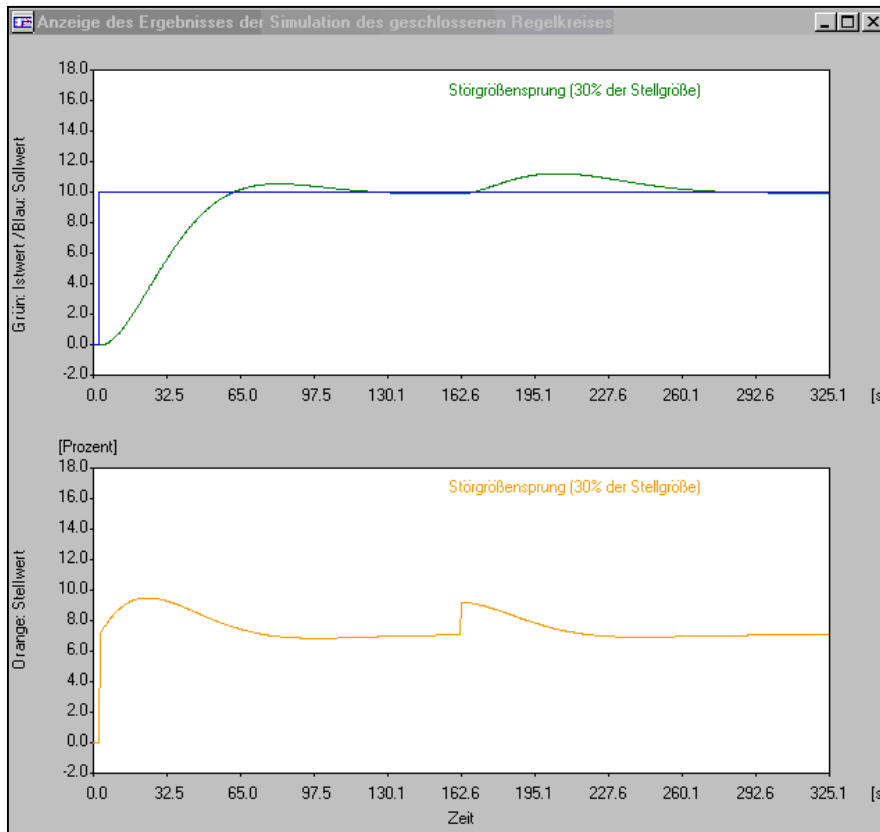


Abbildung 4.97: Trend Simulation

Im letzten Schritt 9 können die neuen Parameter in den Regler übertragen werden. Der optimierte Regler ist somit aktiv und muss nun validiert werden.

4.4.6.2 Optimierung bestimmter Regler

Mit dem im vorigen Kapitel beschriebenen Konzept sollen im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts einzelne PID-Regler der bestehenden FLR optimiert werden. Es wird dadurch mit einer weiteren Verbesserung der Regelgüte und damit einhergehend mit einer weiteren Verbesserung der Verbrennungsergebnisse gerechnet.

Konkret geplant ist dies an den Reglern:

- Regler Dampf Müllaufgabe
- Regler Dampf Roste
- Regler Dampf Unterwind

Je nach Erfolg der einzelnen Maßnahmen sind durchaus noch weitere Regelkreise denkbar.

4.4.6.3 PID im Bereich Luft (Versuchsreihe 5.2)

Bereich	NR.	Bezeichnung	Verlauf
Luft	5	Versuche Luft (Anlage)	
	5.2	PID-Tuner	
28.7.2010	5.2.1	Primärluft	-Erhöhung der gesamten Primärluft durch Sollwertsprung des Regler auf 100% -Sprung wird mit PID-Tuner durchgeführt -Strecke für Rost und Aufgabe aktiv
28.7.2010	5.2.2	Primärluft	-Zusätzlich zu 5.2.1 werden die Strecken Aufgabe und Rost auf Hand genommen Sprung von -100% auf 100%
28.7.2010	5.2.2.1	Primärluft	Variante von 5.2.2 Sprung von 0% auf 100%

Für die Optimierung der Regelstrecke mit dem PID-Tuner ist ebenfalls eine Sprungantwort notwendig. Anders als beim MPC wird hier nur ein Sprung nach oben benötigt.

4.4.6.3.1 Sprungantworten Regler Rost und Aufgabe aktiv (Versuchsreihe 5.2.1)

In diesem Versuchsteil sind nur die Regler für den Bereich Luft deaktiviert. Alle anderen Regler sind aktiv. Beim Versuch 5.2.1 ist ein Anstieg der Dampfmenge nach dem Sprung nach oben zu erkennen. Allerdings ist die Änderung der Regelgröße für den PID-Tuner zu gering.

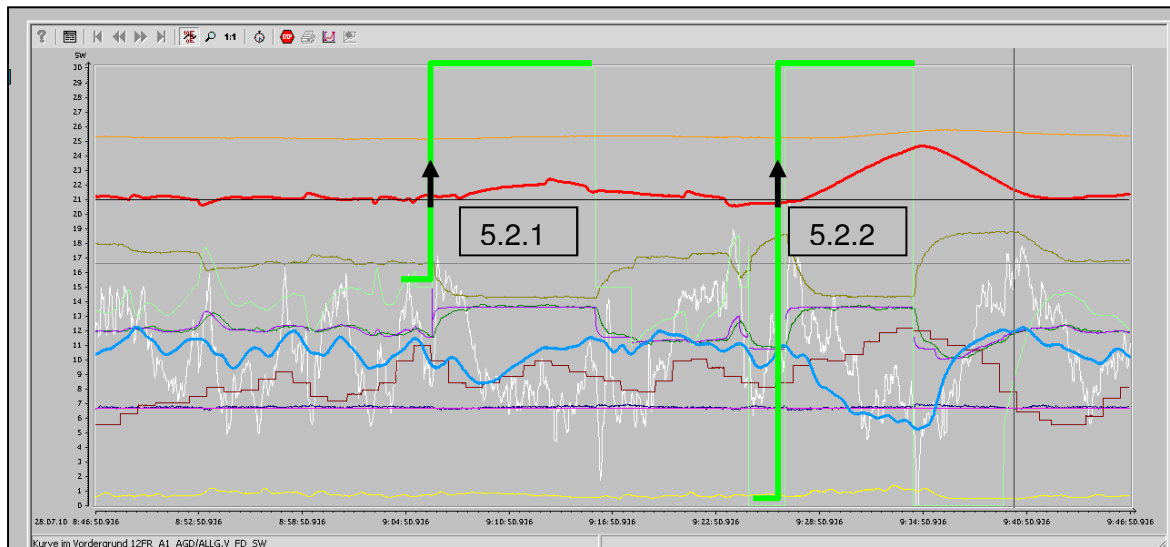


Abbildung 4.98: Sprungantwort Versuch 5.2.1 und 5.2.2

4.4.6.3.2 Sprungantworten Regler Rost und Aufgabe inaktiv (Versuchsreihe 5.2.2)

Für diesen Versuchsteil sind alle Regler deaktiviert. In Abbildung 4.98 ist der Verlauf vom Versuch 5.2.2 zu sehen. Man sieht einen schönen Anstieg der Dampfmenge. Anhand dieser Sprungantwort können Regelparameter ermittelt werden. Diese sind in Abbildung 4.99 dargestellt.

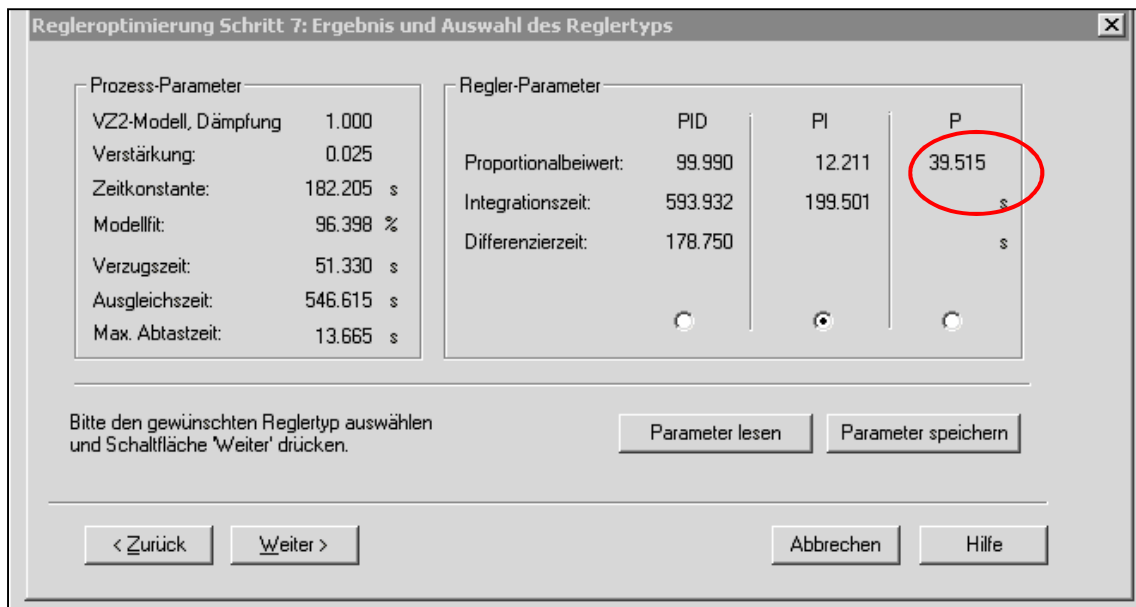


Abbildung 4.99: Reglerparameter Versuch 5.2.2

Im Versuch 5.2.2.1 wurden ebenfalls Regelparameter ermittelt. Diese sind in Abbildung 4.100 dargestellt. Der Versuchsverlauf ist in Abbildung 4.101 abgebildet.

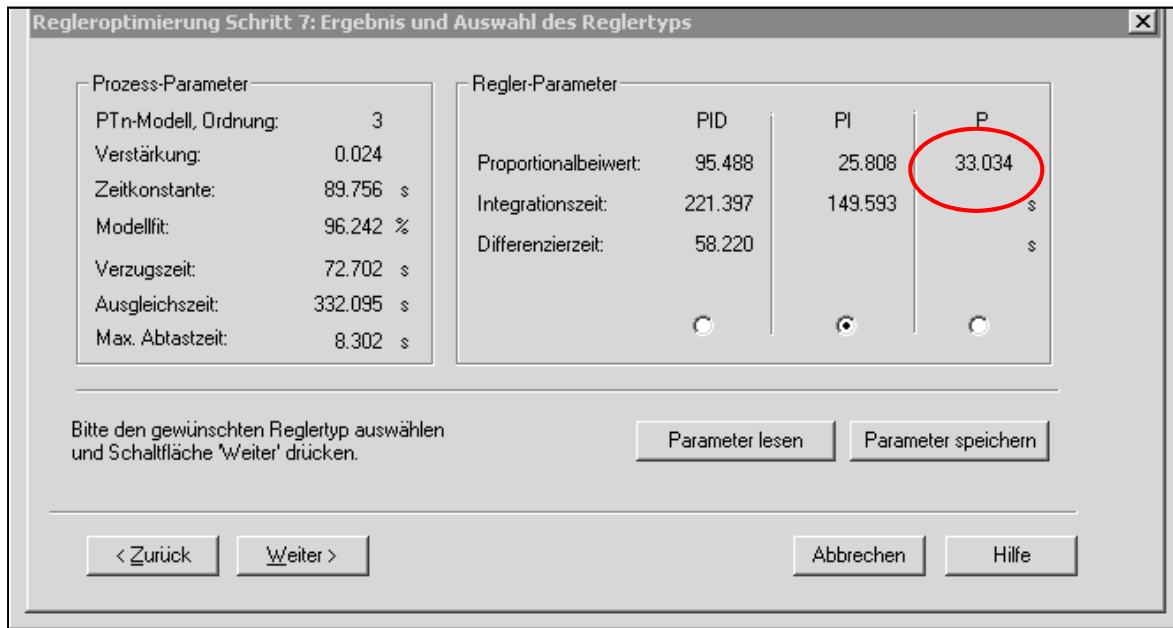


Abbildung 4.100: Regelparameter Versuch 5.2.2.1

In der bestehenden Regelung ist der Regler für die Regelgröße Dampf als P-Regler ausgeführt. Vergleicht man die im Versuch 5.2.2. und 5.2.2.1 ermittelten Regelparameter, so ist zu erkennen, dass beim ersten Versuch eine Verstärkung von 39 und im zweiten eine Verstärkung von 33 ermittelt wurde. Aktuell aktiv ist eine Verstärkung von 55.

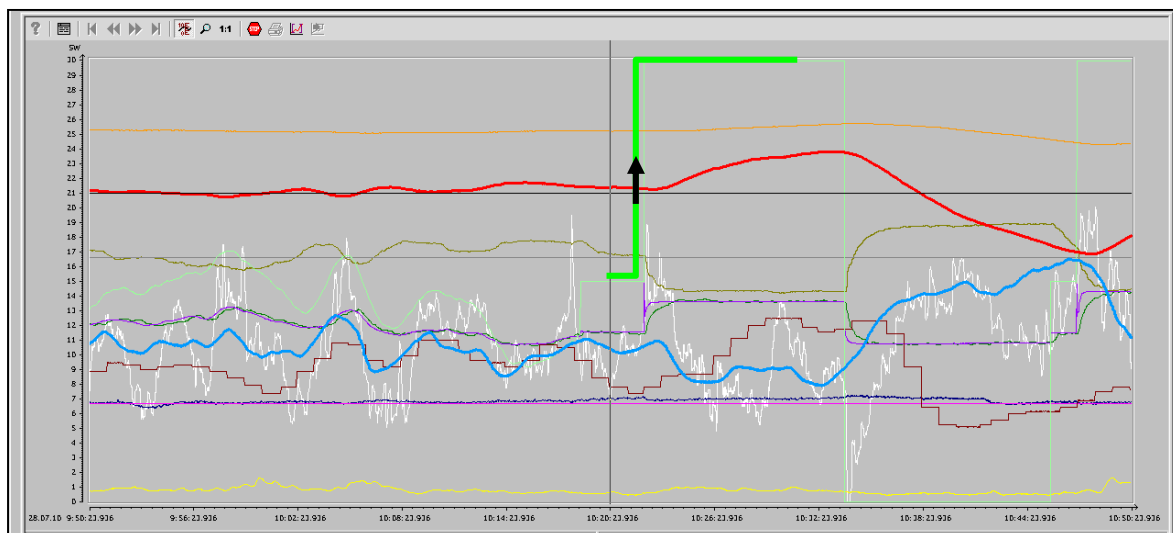


Abbildung 4.101: Sprungantwort Versuch 5.2.2.1

4.4.6.4 PID im Bereich Transport (Versuchsreihe 6.2)

Bereich	NR.	Bezeichnung	Verlauf
Rost	6	Versuch Rost (Anlage)	
	6.2	PID-Tuner	
09.11.2011	6.2.1	Rostgeschwindigkeit	-Erhöhung der gesamten Rostgeschwindigkeit durch Sollwertsprung des Regler -Sprunghöhe im ersten Versuchsteil 80%-100% -Sprung wird mit PID-Tuner durchgeführt -Strecke für Luft und Aufgabe aktiv
10.11.2011	6.2.2	Rostgeschwindigkeit	-Erhöhung der gesamten Rostgeschwindigkeit durch Sollwertsprung des Regler -Sprunghöhe im ersten Versuchsteil 80%-100% -Sprung wird mit PID-Tuner durchgeführt -Strecke für Luft und Aufgabe inaktiv
10.11.2011	6.2.2.1	Rostgeschwindigkeit	-Erhöhung der gesamten Rostgeschwindigkeit durch Sollwertsprung des Regler -Sprunghöhe im ersten Versuchsteil 80%-100% -Sprung wird mit PID-Tuner durchgeführt -Strecke für Luft und Aufgabe inaktiv

4.4.6.4.1 Sprungantworten Regler Luft aktiv

Beim Versuch 6.2.1 sind die Regelkreise Luft aktiv. Die Stellgröße des Reglers Dampf-Rost wird mit dem PID-Tuner von 0% auf 80% erhöht. Der Verlauf der Sprungantwort ist in Abbildung 4.102 zu sehen. Die Dampfmenge erhöht sich als Reaktion auf den Sprung der Rostgeschwindigkeit um 1 t/h. Diese Änderung ist für den PID-Tuner zu gering, um ein Modell zu identifizieren, wie in der Meldung in Abbildung 4.103 zu sehen ist.

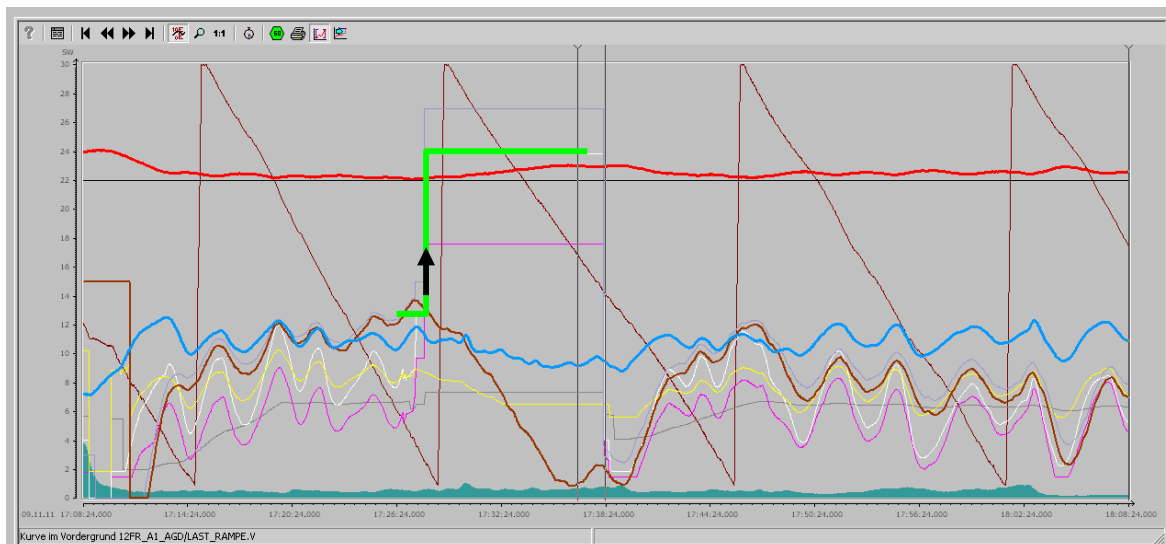


Abbildung 4.102: Sprungantwort Versuch 6.2.1

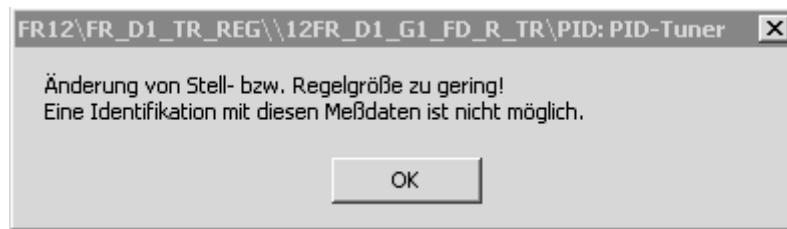


Abbildung 4.103: Meldung PID-Tuner

4.4.6.4.2 Sprungantworten Regler Luft inaktiv

In der Versuchsreihe 6.2.2 ist der Regelkreis Luft inaktiv. Die Stellgröße der Reglers Dampf-Rost wird auf 80% erhöht. Vor dem Sprung ist die Frischdampfmenge etwas unter dem Sollwert. Nach dem Sprung beginnt diese zu steigen. Die Sauerstoffmenge fällt kontinuierlich ab bis zu einem Wert von < 5 Vol.-%. Dies führt zu einem schnellen Anstieg der CO-Emissionen. Der Versuch wird daher abgebrochen.

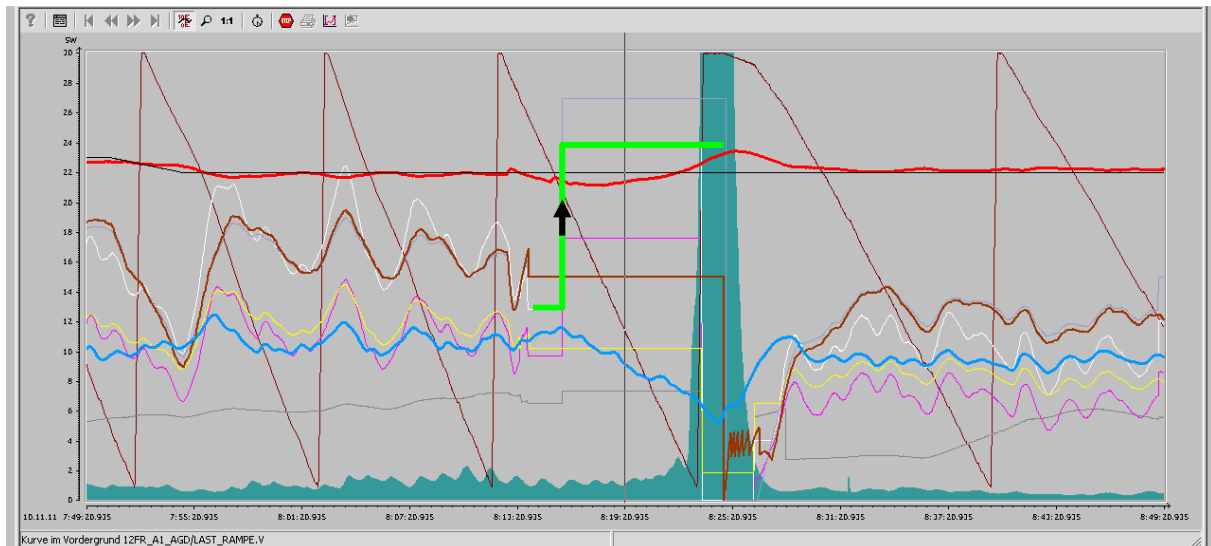


Abbildung 4.104: Sprungantwort Versuch 6.2.2

Der PID-Tuner konnte anhand dieser Sprungantwort dennoch Regelparameter bestimmen. Diese sind in Abbildung 4.105 abgebildet. Für einen P-Regler wird eine Verstärkung von 1.241 ermittelt. Im Vergleich dazu wurde bei der Inbetriebnahme eine Verstärkung von 80 parametrisiert.

Regleroptimierung Schritt 7: Ergebnis und Auswahl des Reglertyps

Prozess-Parameter		Regler-Parameter		
PTn-Modell, Ordnung:	6	PID	PI	P
Verstärkung:	0.191	Proportionalbeiwert:	4.745	2.094
Zeitkonstante:	172.911 s	Integrationszeit:	668.588	461.095 s
Modellfit:	83.207 %	Differenzierzeit:	187.817	s
Verzugszeit:	485.879 s			s
Ausgleichszeit:	985.590 s			
Max. Abtastzeit:	24.640 s			

Bitte den gewünschten Reglertyp auswählen und Schaltfläche 'Weiter' drücken.

< Zurück
Weiter >
Parameter lesen
Parameter speichern
Abbrechen
Hilfe

Abbildung 4.105: Reglerparameter Versuch 6.2.2

Im Versuch 6.2.2.1 sollen nochmals Reglerparameter ermittelt werden. Um eine CO-Spitze zu vermeiden, wird ein Sprung auf -80% vorgenommen. Nach dem Sprung nach unten beginnt die Dampfmenge zu sinken. Nach einer Zeit von 15 Minuten ist die Dampfmenge um 3 t/h abgefallen. Die Aufzeichnung ist an dieser Stelle beendet. Anschließend wird die Stellgröße auf 80% erhöht, um noch Daten für den MPC-Entwurf aufzuzeichnen.

Für diesen Sprung konnten mit dem PID-Tuner Reglerparameter ermittelt werden. Diese sind in Abbildung 4.107 dargestellt.

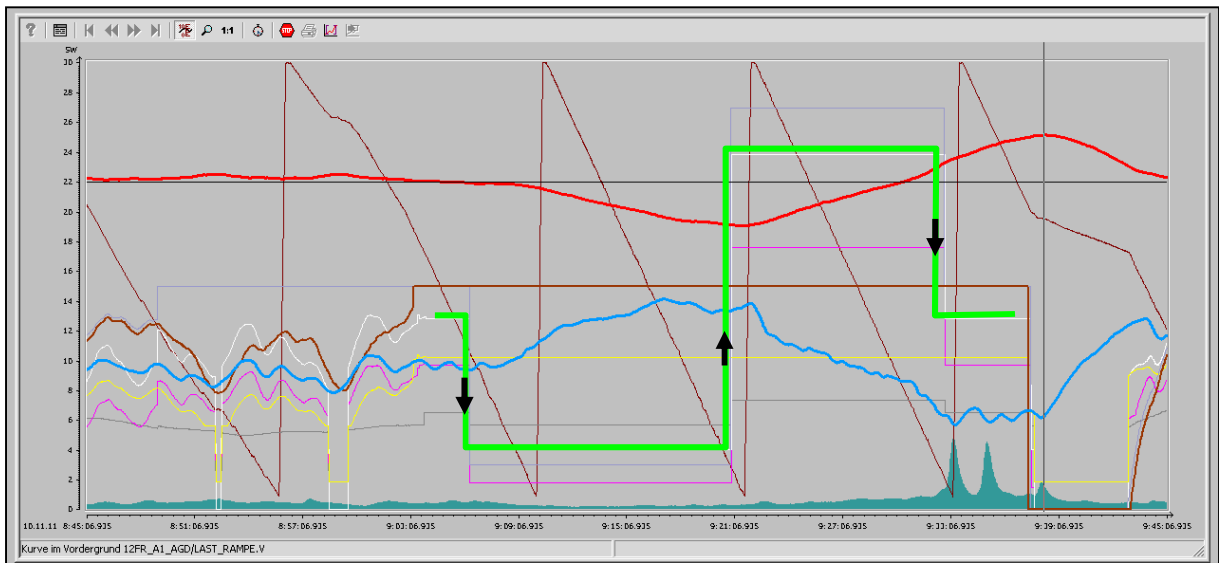


Abbildung 4.106: Sprungantwort Versuch 6.2.2.1

Regleroptimierung Schritt 7: Ergebnis und Auswahl des Reglertyps

Prozess-Parameter		Regler-Parameter			
PTn-Modell, Ordnung:	4	PID	PI	P	
Verstärkung:	0.042	Proportionalbeiwert:	32.809	11.931	9.544
Zeitkonstante:	138.589 s	Integrationszeit:	406.529	277.179	s
Modellfit:	94.484 %	Differenzierzeit:	110.241		s
Verzugszeit:	198.183 s				
Ausgleichszeit:	618.108 s				
Max. Abtastzeit:	15.453 s				

Bitte den gewünschten Reglertyp auswählen und Schaltfläche 'Weiter' drücken.

Buttons: Parameter lesen, Parameter speichern, < Zurück, Weiter >, Abbrechen, Hilfe

Abbildung 4.107: Regelparameter Versuch 6.2.2.1

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die an den drei Anlagen ermittelten Messergebnisse unabhängig voneinander kurz dargestellt. Sie werden in Kapitel 6 vergleichend diskutiert.

5.1 Modell

Das Projekt verfolgt hinsichtlich des Programmpaketes 2 wesentliche Aufgaben:

- Erweiterung des Modells und
- Ankopplung an Feuerungsregelung.

Hinsichtlich der Modellerweiterung konnten die Arbeiten abgeschlossen werden. Die Validierungen zeigten eine Verbesserung gegenüber dem bisherigen Modell. Allerdings zeigte sich eine immer noch recht schnelle Wärmeübertragung in das Partikel. Dies ist offensichtlich durch die nicht realistisch hohe Wärmeübertragung durch Strahlung auf die große Masse der äußersten Schicht und die daraus resultierende hohe Wärmeleitung bedingt. Somit muss entweder eine unsymmetrische Aufteilung der Schichtstärken erfolgen oder noch mehr Schichten vorgesehen werden. Eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Partikelschichten wird allerdings eine erhebliche Beeinträchtigung der Rechenzeit mit sich bringen. Somit ist eine Erhöhung der Schichtanzahl auf 5 vorgesehen und eine praktikable dynamische Anpassung der Schichtdicken. Diese konnte aber nicht mehr im Rahmen dieses Projektes realisiert werden. Obwohl eine immer weitergehende Optimierung der Teilmodelle möglich ist, sind die aktuellen Ergebnisse bereits sehr gut in Einklang mit der realen Anlage.

Die Vorgänge auf dem Rost lassen sich in einem Struktogramm darstellen, anhand dessen die Validierung erfolgen kann.

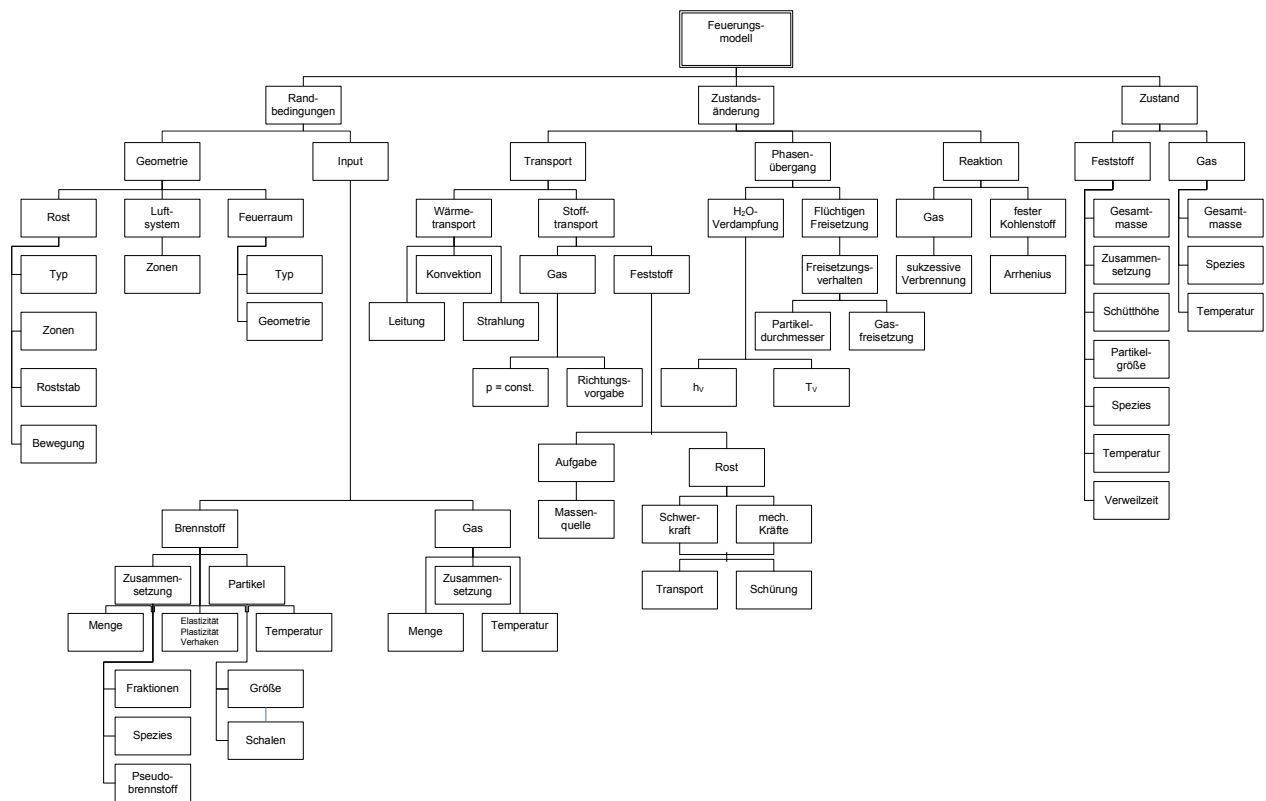


Abbildung 5.1 / Organigramm / Vorgänge auf dem Rost

Das Struktogramm gliedert sich in 3 Bereiche:

- Randbedingungen,
- Zustandsänderung und
- Zustand.

Die Randbedingungen drücken sich in der Beschreibung der Geometrie und der zugeführten Stoffe aus. Das Programmpaket basiert, wie als Ziel definiert, auf praxisrelevanten Parametern. So wird z. B. eine Rostzone nicht nur über die Länge und Neigung, sondern auch über die geometrische Beschreibung der Roststäbe und deren Bewegungsablauf definiert.

Die Beschreibung der zugeführten Stoffe, also Feststoff und Luft, erfolgt auch in praxisrelevanten Größen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der 1. Ast des Struktogramms „Randbedingungen“ den Anforderungen entspricht und validiert ist.

Grundlage für den mittleren Ast „Zustandsänderung“ ist der rechte Ast „Zustand“, der den Zustand auf dem Rost beschreibt. Die Modellbeschreibung für den Ist-Zustand des Feststoffs gibt zunächst alle praxisrelevanten Daten wie z. B. Masse, Wassergehalt, Freisetzungverhalten oder Temperatur wieder. Weiterhin sind zusätzliche Informationen verfügbar. So kann

z. B. die Verteilung des Wassers innerhalb der Feststoffe oder die mittlere Verweilzeit an einem Ort dargestellt werden.

Somit kann auch dieser Ast (Zustand) als validiert gekennzeichnet werden.

Das größte Feld nimmt der mittlere Ast, die Zustandsänderung in Anspruch. Dieser Ast untergliedert sich nochmal in die Bereiche Transport, Phasenübergang und Reaktion.

Das Transportmodell zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Effekten in der realen Anlage. Die Verweilzeit, als ein relativ gut zu messender Wert, kann mit dem Modell bestätigt werden. Sekundäre Effekte wie die Schütthöhe bestätigen die Beobachtungen an realen Anlagen. Daraus, dass mehrere Beobachtungen mit dem Modell wiedergegeben werden können, kann geschlussfolgert werden, dass das gesamte Transportmodell die Realität gut abbildet.

Der nächste Punkt in diesem Ast ist der Phasenübergang. Dies kann wesentlich mit dem Trocknungsprozess validiert werden. Die Ausdehnung der Trocknungszone, aber vor allem erste Flammen oberhalb des feuchten Brennstoffs kurz nach der Aufgabe belegen das praxisgerechte Modell. Feuerlage und Ausbrand bestätigen das implementierte Reaktionsmodell. Hinsichtlich der tatsächlichen Temperaturen im Brennbett gibt es derzeit noch keine Möglichkeit der Validierung. An der Entwicklung einer Messmethode wird momentan noch gearbeitet.

Aus jetziger Sicht kann festgestellt werden, dass das Gesamt-Modell die Vorgänge auf dem Rost sehr gut wiedergibt.

Nichtsdestotrotz verbleiben weitere Validierungsanstrengungen, um in den Teilmodellen noch zuverlässigere Aussagen realisieren zu können.

5.2 Feuerungsregelung

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Bereich Feuerungsregelung erläutert. Für die Bereiche MPC und OPC-Kopplung wurden bereits erste, durchaus als gut zu bewertende Ergebnisse erzielt.

5.2.1 Ergebnisse von MPC

Der MPC konnte erfolgreich in das PCS7 Leitsystem der Feuerleistungsregelung integriert werden. Es konnten auch erste Erfolge mit dem MPC erzielt werden. Allerdings ist die Aufnahme von Sprungantworten im Bereich der Müllaufgabe nicht trivial, sondern mit hohem Aufwand, starken Betriebsbeeinträchtigungen, erhöhten Emissionen und reduzierter Effizienz der Anlage verbunden. Bedingt durch die langen Totzeiten bei der Müllaufgabe und durch die wesentlich kürzeren Totzeiten bei den Regelkreisen Luft und Rost, konnten diese die Dampfmenge relativ lange konstant halten und somit die Sprungantwort verfälschen. In Abbildung 4.40 ist zu erkennen, dass sich z. B. die Rostgeschwindigkeiten für Rost 1 und 2 bereits in voller Aussteuerung bei max. Geschwindigkeit befinden.

Der MPC-Regler, welcher durch Analyse von Kennlinien erstellt wurde, konnte erfolgreich an der Anlage GKS eingesetzt werden. Dieser zeigte in weiten Bereichen ein gutes Verhalten und war für einige Stunden in Betrieb. Jedoch wurden auch Probleme an dem Modell festgestellt. Da der Regler wie unter 4.4.4.2 beschrieben, als unabhängiger Regler in die FLR integriert wurde, führte vermutlich die fehlende O_2 -Regelgröße zu dem unter 4.4.4.6.4 beschriebenen Problem. Das Integrieren der weiteren Regelgröße für den O_2 -Gehalt scheiterte im ersten Schritt an den unterschiedlichen Totzeiten.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurden Sprungantworten an den Strecken Luft und Rost aufgenommen. Die Integration ist dabei nach Methode 2 erfolgt, wie unter 4.4.4.2 beschrieben.

Für den Bereich Luft konnten Sprungantworten mit guter Qualität erstellt werden. Mit diesen Sprungantworten wurde ein MPC-Regler entworfen. Dieser wurde über 9 Monate aktiv und ohne Probleme an der Linie 12 des GKS Schweinfurt betrieben. Im Anschluss an die Versuchsphase folgte die Auswertung. Im Bezug auf die Dampfmengenschwankungen konnte keine Verbesserung erzielt werden. Die Abweichungen liegen im Bereich der PID-Regelung.

Im Bereich Rost konnten ebenfalls verwertbare Sprungantworten erstellt werden. Bei diesen Versuchen gab es allerdings sehr unterschiedliche Reaktionen auf die Sprünge. Teilweise erfolgte kaum eine Reaktion, in anderen Fällen wieder eine sehr starke Abweichung Folge des Eingriffs.

Als Ergebnis kann postuliert werden, dass gegenüber dem PID Regelungskonzept keine Verbesserung erzielt werden konnte. Grund dafür kann auch sein, dass die Dampfmengenschwankungen im GKS mit der PID-Regelung bereits auf niedrigem Niveau sind. Daher wären auch Versuche an einer Anlage mit größeren Dampfmengenschwankungen denkbar. Jedoch stellt sich dann die Frage, ob dort gute Sprungantworten erzielt werden können. Wie sich ja bereits im GKS gezeigt hat, ist für das Erzielen einer verwertbaren Sprungantwort ein einigermaßen stabiler Anlagenzustand, auch ohne Regelung, erforderlich.

Der MPC Verbrennungsluft hat sich während der Versuchsphase immer wieder am oberen Anschlag bei maximaler Aussteuerung befunden, also Stellgröße bei 100%. Grund dafür kann sein, dass die Sprungantworten immer nur für einen Arbeitspunkt erstellt werden. Bei einer Müllverbrennung ist es aber so, dass verschiedene Arbeitspunkte, d.h. Leistungs- bzw. Dampfsollwerte gefahren werden müssen. Um dieses Problem zu umgehen wäre es notwendig, für mehrere Arbeitspunkte Sprungantworten zu erstellen. Diese können dann in einer so genannten Multi-Modell-Regelung miteinander verknüpft werden.

Man kann es aber durchaus als Erfolg werten, dass der Einsatz des MPC zu keiner Verschlechterung geführt hat. Jedoch zeigt es auch, dass ein optimal und professionell eingestelltes PID-Regelungskonzept einem MPC immer noch mindestens gleichwertig wenn nicht sogar überlegen ist.

5.2.2 OPC-Modul-Kopplung

Die OPC-Kopplung wurde erfolgreich mit dem bestehenden Modell in Betrieb genommen. Dabei wurden Versuche mit einer Schichthöhenregelung durchgeführt. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde das „neue“ Feuerungsmodell ebenfalls mittels OPC an die FLR angekoppelt werden. Dabei war es wichtig, dass die Verbindung betriebssicher ist. Dafür wird ein „Life Bit“ verwendet. Dies wird vom FLR System überwacht. So kann sichergestellt werden, dass für den Fall eines Ausfalls der Verbindung dies erkannt wird und die entsprechenden Maßnahmen getroffen werden können.

5.2.3 Ergebnisse von automatisierter PID-Parametrierung

Die Analyse des Markts für PID-Entwurfswerkzeuge hat ergeben, dass mittlerweile von mehreren Herstellern solche Werkzeuge angeboten werden. Nach Diskussion der verschiedenen Vor- und Nachteile der einzelnen Konzepte, hat man sich für den Siemens PID-Tuner entschieden. Dieser hat den großen Vorteil, dass er bereits mit dem PCS7 Leitsystem mitgeliefert wird. Er ist somit voll in das Leitsystem integriert, was von großem Vorteil ist, da somit ein aufwendiger Signalaustausch entfällt.

Es wurde ein Konzept zur Optimierung der bestehen PID-Regler entwickelt. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts wurden die dafür notwendigen Versuche durchgeführt.

Dabei konnten verbesserte Regelparameter ermittelt werden. Wie im Kapitel 4.4.6.3 beschrieben wurden für den Bereich Luft Regelparameter ermittelt. Diese Werte liegen etwa bei 60% bis 70% der Verstärkung, welche bei der Inbetriebnahme der Regelung eingestellt wurde.

Im Kapitel 4.4.6.4 werden die Versuche und die dabei ermittelten Regelparameter im Bereich Transport beschrieben. Die dabei ermittelten Regelparameter für die Verstärkung liegen etwa bei 1% bis 10% des Wertes, welcher bei der Inbetriebnahme eingestellt wurde.

Da die ermittelten Regelungsparameter relativ großen Schwankungen unterliegen und in einem Bereich liegen, in dem der Regelungstechniker skeptisch wird, wurde auf eine Versuchsphase mit den ermittelten Parametern verzichtet, um eventuellen Schaden von der Anlage abzuwenden. Man vertraut hier weiter auf die bei der Inbetriebnahme ermittelten Parameter.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnte das Feuerungsmodell in wesentlichen Punkten verbessert und konsolidiert werden.

Die Umsetzung nach Java bringt 2 grundsätzliche Vorteile. Java Programme sind unabhängig von der Computer-Architektur auf nahezu allen verfügbaren und zukünftigen Systemen lauffähig. Schaut man die vielen Programmentwicklungen an, die auf Codes basieren, welche für moderne Rechnerarchitekturen nicht mehr verfügbar sind (z. B. Delphi, C++ etc.), ist der entstandene Schaden immens, da einerseits die reine Investition aber andererseits vor allem das in dem Programm gebündelte Know-how verloren ist. Die Umsetzung mit Java steht für Langlebigkeit.

Ein weiterer wesentlicher Punkt, der durch die Java-Implementierung erreicht wurde, ist die Unabhängigkeit von zugekauften Produkten. Als Beispiel kann hier z. B. die Programmierung der grafischen Benutzerschnittstelle angeführt werden. Bei den „alten“ Hochsprachen wurden hier Module eingebunden, die von Externen programmiert und nur in verschlüsselter Form zur Verfügung gestellt wurden. War das Modul nicht mehr verfügbar, weil z. B. die Ersteller nicht mehr am Markt agieren, bestand keine Möglichkeit, das alte System weiterhin pflegen zu können. Die Umsetzung mit Java stellt sämtliche Quellcodes bereit, so dass auch hinsichtlich der Wartung und Weiterentwicklung keine Einschränkungen bestehen.

Der wissenschaftlich und technisch interessantere Punkt ist aber das zugrundeliegende Modell. Erstmalig ist es gelungen, die komplexen Vorgänge auf dem Rost umfassend zu beschreiben. Anders als die bisher verfügbaren Ansätze, die im wesentlichen spezielle Effekte abbilden und somit selten die Übertragbarkeit auf ähnliche Systeme erlauben, beschreibt das vorliegende Modell die Phänomene derart, dass durch reine Angabe der geometrischen Verhältnisse und Betriebsweise das System für alle Feuerräume anwendbar ist.

Hervorzuheben ist die Implementierung weiterer Sub-Modelle. Um mechanische Einflüsse auf den Brennstoff besser abbilden zu können, wurde beim Partikelmodell des Feststoffes eine zusätzliche Schicht ergänzt, die als Interface zwischen Feststoff und Umgebung agiert. Stellvertretend kann hier z. B. der konvektive Wärmetransport mit dem umgebenden Gas genannt werden, der über dieses Interface behandelt wird. Vollkommen neu ist aber die Berücksichtigung der mechanischen Effekte. Das sogenannte Schüren ist ein mechanisches Mittel, um den Umsatz des Feststoffes zu beschleunigen. Dies geschieht u.a. durch Aufbrechen der aktiven Oberfläche und Abreinigen von Reaktionsprodukten an der Oberfläche des Feststoffes, welche den Umsatz behindern. Fortwährendes Schüren führt aber nicht zu kon-

tinuierlich steigendem Umsatz, sondern kann auch zum Umkehren des Effektes führen. Dies wird von dem neuen Interface berücksichtigt. Auch bei dieser Implementierung wurde wieder die Philosophie umgesetzt, dass nicht ein spezieller Effekt wie z. B. das Schüren modelliert wird, sondern ein übergreifender Effekt. Auch wenn kein Schüren stattfindet, kann sich der Umsatz verstärken, wenn andere mechanische Kräfte wie z. B. ein Herunterfallen von einem Sturz oder Abrutschen entlang des Schüttwinkels vorliegt.

Ein weiterer Punkt war die Erweiterung des Wärmehaushaltes des Feststoffes. Der Wärmeübergang in das Partikel wurde überarbeitet. Weiterhin wurde auch der Wärmetransport in die Schüttung über Leitung und Strahlung implementiert. Letzterer spielt in der bewegten Schüttung eine untergeordnete Rolle. Aber durch den Ansatz der systemunabhängigen Umsetzung wurde dieser Punkt interessant. So wurde es erst durch diese Implementierung möglich, Laborversuche mit einer unbewegten Schüttung zur Validierung nachrechnen zu können.

Ein einfaches Kesselmodul wurde implementiert, um für den Praktiker relevante Daten wie z. B. die Dampfproduktion bereitstellen zu können und einen weiteren Plausibilitätscheck, d.h. Energie- und Massenbilanzen, zu ermöglichen.

Mit der Veröffentlichung einer online verfügbaren Version von CombAte war es erforderlich, einen vom „Laien“ benutzbaren Konfigurator zur Verfügung zu stellen. Dieser wurde als Assistent konzipiert, der menügestützt den Benutzer durch die Konfiguration des Systems führt. Der komplette Umfang der modellierbaren Systeme ist nur durch Experten beim GKS zugänglich.

Im anstehenden Projektfortschritt wird die Ankopplung an die vorhandene Feuerungsregelung umgesetzt.

Die weitere Validierung und Dokumentation des Programmpakets CombAte schließen dann den programmtechnischen Teil des Projektes ab. Trotz der sehr guten Ergebnisse zeigten sich auch noch Verbesserungspotentiale, die im Rahmen des Projektes nicht mehr umgesetzt werden konnten. Dazu gehört im Wesentlichen die nochmalige Erweiterung der Schalenanzahl auf 5 und die notwendige dynamische Anpassung der Schalen-Schichtdicken.

Im Bereich Feuerungsregelungstechnik wurde im ersten Teil des Forschungsprojekts beginnend eine umfangreiche Marktanalyse durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, was aktuell an sogenannten APC Regelungsmethoden verfügbar ist. Man ist zu dem Schluss gekommen, dass für den Einsatz an der bestehenden FLR des GKS am besten die Produkte von Siemens geeignet sind. Diese sind bereits im PCS7-System enthalten und voll integriert.

Im weiteren Verlauf wurde der MPC von Siemens in die bestehende FLR integriert. Es wurden Sprungantworten erstellt und Modelle entworfen. Dabei wurden mittels umfangreicher

Versuche an der Anlage im GKS Sprungantworten an den Regelstrecken Aufgabe, Luft und Rost aufgenommen und in sehr aufwendigen Auswertungen analysiert.

Das bestehende Feuerungsmodell wurde über OPC an die FLR gekoppelt. Es wurden vielversprechende Versuche mit einem neuen, zusätzlichen Regelkreis durchgeführt. Dabei wurde die vom Modell berechnete Schichthöhe als neue Regelgröße in die FLR integriert. In diesem Zusammenhang spricht man auch vom Softsensor. In einem zweiten Schritt wurde das neue Modell an die FLR angekoppelt.

Für den PID-Tuner wurde ein Konzept erstellt, wie Versuche durchgeführt und bestimmte Regler optimiert werden können. Anhand dieses Konzepts wurden umfangreiche Versuche an den Regelstrecken Luft und Rost durchgeführt.

Im Hinblick auf die Effizienzsteigerung und Emissionsminderung zeigen der Einsatz von MPC und PID-Tuner einerseits und die Anwendung des Feuerungsmodells als Softsensor andererseits neue Optimierungsmöglichkeiten. Durch eine nun mögliche Berücksichtigung der Schichthöhen kann eine Überschüttung des Rostes potentiell vermieden werden. Die damit verbundenen CO-Spitzen können so reduziert werden. Gerade der Einsatz des PID-Tuners, aber auch des MPC zeigen, auch wenn das bestehende System schon ein sehr gutes Verhalten zeigt, die grundsätzliche Möglichkeit die Leistung der Anlage durch schärferes Anfahren der Maximalleistung besser auszunutzen. Beide Aspekte tragen zum Klimaschutz insgesamt bei. Selbstverständlich sind weitere Optimierungsaktivitäten notwendig und geplant, um die Standfestigkeit des Systems alltagstauglich zu machen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem Rostmodell ein deutlicher Schritt in Richtung noch realerer Anlagenbeschreibung gegangen werden konnte. Ferner konnte gezeigt werden, dass es nun als Softsensor in Echtzeit für die Feuerungsregelung der Anlage nutzbar ist und diese auch gut unterstützen kann. Das Programm steht auf der GKS-Website (www.gks-sw.de) für jedermann zur Nutzung zur Verfügung. Die Feuerungsregelungsoptionen MPC und PID-Tuning wurden intensiv untersucht und zeigten gute Ergebnisse. Es kann festgestellt werden, dass eine sehr gut ausgelegte Advanced-PID-Regelung (APC-PID), auch wenn diese Technik schon älter ist, den modernen Verfahren mindestens ebenbürtig, wenn nicht überlegen ist.

7 Literatur

- [Abel 2008] Abel, D., Epple, U., Spohr, G., Integration von Advanced Control in der Prozessindustrie, Weinheim, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008
- [Act 2010] Homepage Firma ACT, <http://www.act-control.com/ZN.HTM>
- [Brunberg, 2007] Brunberg, A., Enning, M., Abel, D., TIAC – Totally Integrated Advanced Control, Mehrgrößenregelung, Institut für Regelungstechnik, Aachen, 2007
- [CUTEC 2008] Fördermittelgeber: AiF - Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (Köln), Projekt-Nr.: 163 1992, VGB-Nr 271, Förderkennzeichen AiF: 14557 N, Vergleich und Entwicklung innovativer Regelungskonzepte für Rostfeuerungen am Beispiel der Müllverbrennung
- [Dannerbeck, 2008] Dannerbeck, F., Evaluierung eines modellbasierten prädiktiven Reglers an einer Feuerleistungsregelung im Bereich thermische Abfallbehandlung, Diplomarbeit, Hochschule Landshut, 2008
- [Dittmar 2004] Dittmar R., Pfeiffer, B., Modellbasierte prädiktive Regelung, Oldenburg Verlag, München, Wien, 2004
- [Gierend 2000a] Gierend, Chr.: Analyse der verfahrenstechnischen Entwicklungsmöglichkeiten thermischer Abfallbehandlungs- und Abfallverwertungsanlagen (Feuerung und Rauchgasreinigung) für den Einsatz von Fuzzy Logic und Beherrschung der Inkonsistenzen beim Betrieb; Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 11592 B/1; VGB-Forschungsprojekt 181; Essen; August 2000
- [Gierend 2000b] Gierend, Chr.: Fuzzy Control in der Thermischen Abfallbehandlung; Dissertation, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, TU Bergakademie Freiberg; Freiberg, 7. September 2000 "Sächsisches Informations- und Demonstrationszentrum Abfallsbehandlungstechnologien" Freiberg (SIDAF) Schriftenreihe 2000, SIDAF, Freiberg 11.2000
- [INP 2010] Homepage Firma INP, <http://www.inp-e.com/>
- [Keller 1994] Keller, H. B.: Prozessführung in Müllverbrennungsanlagen mit neuronalen Netzen; 38. Darmstädter Seminar Abfalltechnik: Modellbildung und intelligente

- Steuersysteme in der Umwelttechnik, 24. Februar 1994, TH Darmstadt; In: Schriftenreihe WAR, Nr. 78, Institut WAR - Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt, Darmstadt, 1994
- [Keller 1998] Keller, H. B.; Müller, B.; Kugele, E.; Fick, A.; Fuzzy Control und Neuronale Netze in der thermischen Abfallbehandlung. GMA Kongress '98: Mess - und Automatisierungstechnik, Ludwigsburg, 18. - 19. Juni 1998, VDI- Berichte 1397, S.637-643; 1998
- [Kozmiensky 1991] Thomé-Kozmiensky, K., Rostfeuerungen zur Abfallverbrennung, Berlin, 1991
- [Kozmiensky 2008] Thomé-Kozmiensky, K., Beckmann, M., Energie aus Abfall Band 4, Volker Müller, Martin H. Zwiellehner, Artikel Modernisierung einer Feuerungsregelung, TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky, 2008
- [Krüll 2001] Krüll, F.: Verfahren zur numerischen Simulation von Müllrostfeuerungen, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Bochum, 2001
- [Nakamura2004] Nakamura, M.; Themelis: N.J.: Modeling of Solid Waste Flow and Mixing on the Traveling Grate of a Waste-to-energy Combustion Chamber. In: 12th North American Waste To Energy Conference (NAWTEC 12), New York, 2004
- [Reimann 1991] 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
- [Rückert 2005] Rückert, F. U.: Simulation von Festbettreaktoren zur technischen Verbrennung mit der Euler/Euler-Methode, Dissertation an der Universität Stuttgart, Fakultät Maschinenbau, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart, 2005
- [Siemens 2008a] Siemens, White Paper, SIMATIC PCS 7 APC-Portfolio, 2008
- [Siemens a] Siemens, Dokumentation APC Library V7.0, Dokument: Modellbasierte prädiktive Regelung
- [Wolf 2005] Wolf, C.: Erstellung eines Modells der Verbrennung von Abfall auf Rostsystemen unter besonderer Berücksichtigung der Vermischung – ein Beitrag zur Simula-

tion von Abfallverbrennungsanlagen, Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Maschinenwesen, Campus Essen, Essen, 2005

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Kopplung der Feuerungsregelung mit dem Feuerungsmodell	12
Abbildung 3.1: Zuordnung bekannter Modellvorstellungen [Wolf 2005].....	18
Abbildung 3.2: Wärmefreisetzungsprofil nach KLASSEN	20
Abbildung 3.3: Diskretisierung der Brennkammer nach Jaworski	21
Abbildung 3.4: Diskretisierung des Brennbetts nach AHMED	21
Abbildung 3.5: Modellkonzept nach ROVAGLIO et al.	23
Abbildung 3.6: Reaktormodell nach APPEL-WARNECKE	24
Abbildung 3.7: Reaktordiskretisierung und -bilanzierung nach STAUDT	25
Abbildung 3.8: Reaktoreinteilung nach KRÜLL	25
Abbildung 3.9: Kräftebilanzen am Einzelpartikel nach PETERS	26
Abbildung 3.10: Allgemeiner Regelkreis	29
Abbildung 3.11: Übersicht über die wichtigsten Werkzeuge für APC.....	31
Abbildung 3.12: Übertragungsfunktion eines künstlichen neuronalen Netzes	32
Abbildung 3.13: Übertragungsfunktion einer Fuzzy Logic	33
Abbildung 3.14: Übertragungsfunktion eines modellprädiktiven bzw. modellbasierten Reglers	34
Abbildung 3.15: Vergleich Autofahren und MPC	35
Abbildung 3.16: Grundprinzip der modellbasierten, prädiktiven Regelung	36
Abbildung 3.17: Systemintegration TIAC-BOX [Brunberg,2007]	38
Abbildung 3.18: Ziegler Nichols Test.....	40
Abbildung 3.19: Vergleich Sprungantworten PID	41
Abbildung 3.20: Rechnergestützte Regleroptimierung (PID-Tuning).....	44
Abbildung 4.1: Aufbau Müllverbrennungsanlage GKS Schweinfurt.....	46
Abbildung 4.2: Geplanter Zeitplan Forschungsprojekt	48
Abbildung 4.3: Kirschholz-Stamm nach 5 min. in intensivem Grillfeuer; links: von außen, rechts: aufgeschnitten.....	53
Abbildung 4.4: CombAte mit neuem Rückschubrost-Modell	55
Abbildung 4.5: CombAte mit neuem Walzenrost-Modell	56
Abbildung 4.6: Labor-Festbettreaktor KLEAA	57
Abbildung 4.7: Anordnung der Thermoelemente.....	58
Abbildung 4.8: Temperaturen.....	59
Abbildung 4.9: Versuch FZK in CombAte.....	60

Abbildung 4.10: Versuch FZK in CombAte / Beginn.....	61
Abbildung 4.11: Versuch FZK in CombAte / 15 min und Versuchsende	62
Abbildung 4.12: Versuch GKS / Verweilzeit in realer Anlage	63
Abbildung 4.13: Versuch GKS / Verweilzeit und Schichthöhe (eine Zelle hat 10 cm Höhe) im Modell.....	63
Abbildung 4.14: Versuch GKS / Schütthöhe auf Rost 2	64
Abbildung 4.15: Kopplung FLR und Modell.....	66
Abbildung 4.16: Input und Output Variablen OPC bestehendes Modell	67
Abbildung 4.17: Aufbau Kopplung GKS	67
Abbildung 4.18: Eingangsvariablen OPC Modell	68
Abbildung 4.19: Ausgangsvariablen OPC Modell.....	69
Abbildung 4.20: Übersicht Feuerleistungsregelung.....	71
Abbildung 4.21: Basistabelle Müllaufgabe	72
Abbildung 4.22: Mittelwerte aus Basistabelle.....	72
Abbildung 4.23: Vertrimmung Aufgabe	72
Abbildung 4.24: Regler Aufgabe und Rost.....	73
Abbildung 4.25: Bedienfenster des Reglergewichtungsbausteins.....	74
Abbildung 4.26: Übersicht Stellgrößen	75
Abbildung 4.27: Übersicht Verbrennungsluft.....	76
Abbildung 4.28: Übersicht der einzelnen Stellgrößen	77
Abbildung 4.29: Integration MPC Transport.....	79
Abbildung 4.30: Trendanzeige im CFC	81
Abbildung 4.31: Aufbau der CSV-Datei.....	82
Abbildung 4.32: Messdaten einlesen	83
Abbildung 4.33: Regler entwerfen	84
Abbildung 4.34: Verifikation und Simulation.....	85
Abbildung 4.35: Schematischer Aufbau der Strecke [Siemens a]	86
Abbildung 4.36: Übertragungsfunktionen [Siemens a]	86
Abbildung 4.37: Strecke und Regler im CFC Plan	87
Abbildung 4.38: Sprung MV1 nach 09:15 Uhr ohne Regler	88
Abbildung 4.39: Sprung SP1 gegen 11:13 Uhr mit Regler	89
Abbildung 4.40: Verlauf Versuch 1	91
Abbildung 4.41: Sprung Aufgabe-Dampf	92

Abbildung 4.42: Tool ModPreCon Messdaten	93
Abbildung 4.43: Tool ModPreCon Prozessmodell	94
Abbildung 4.44: Modellgüte CV1	95
Abbildung 4.45: Probetrieb des MPC Modells (DB21)	96
Abbildung 4.46: Probetrieb MPC Sollwert Anhebung	97
Abbildung 4.47: Fehlverhalten des MPC.....	98
Abbildung 4.48: Versuchsprogramm Luft.....	99
Abbildung 4.49: Legende für wichtige Größen der Versuchsreihe Luft.....	99
Abbildung 4.50: Regelung Luft	100
Abbildung 4.51: Verhalten Regelstrecke Rost und Aufgabe bei Versuch 5.1.1 - Geschwindigkeiten (weitere Farben: siehe Abbildung 4.49)	101
Abbildung 4.52: Sprungantwort Versuch 5.1.1.1 – Luftmengen	102
Abbildung 4.53: Sprungantwort Versuch 5.1.1.1 (Farben: siehe Abbildung 4.49).....	103
Abbildung 4.54: Sprungantwort Versuch 5.1.1.2	103
Abbildung 4.55: Sprungantwort Versuch 5.1.2.....	104
Abbildung 4.56: Sprungantwort Versuch 5.1.2.1	104
Abbildung 4.57: Messdaten	105
Abbildung 4.58: Prozessmodell, Modellgüte	106
Abbildung 4.59: Verifikation des Modells	106
Abbildung 4.60: Regler 2, Prozessmodell.....	107
Abbildung 4.61: Regler 2, Modellgüte für Regelgröße	108
Abbildung 4.62: Regler 2, Verifikation und Simulation.....	108
Abbildung 4.63: Bild Integration MPC Luft	109
Abbildung 4.64: Vergleich Dampfmengenkonstanz MPC und PID	110
Abbildung 4.65: Vergleich Stellbereiche MPC und PID	110
Abbildung 4.66: Luftverteilung Zone 2	111
Abbildung 4.67: Luftverteilung Zone 3	111
Abbildung 4.68: Legende für wichtige Größen der Versuchsreihe Rost	113
Abbildung 4.69: Regelung Rost	113
Abbildung 4.70: Sprungantwort Versuch 6.1.1 [30min]	114
Abbildung 4.71: Trend Versuch 6.1.1.1 [30min]	115
Abbildung 4.72: Trend Versuch 6.1,2, Verlauf Rost.....	116
Abbildung 4.73: Trend Versuch 6.1,2, Verlauf Luft	116

Abbildung 4.74: Sprungantwort Versuch 6.1.2.....	117
Abbildung 4.75: Sprungantwort Versuch 6.1.2.2.....	118
Abbildung 4.76: Versuch 6.1.4 Rost.....	119
Abbildung 4.77: Versuch 6.1.4.1 Rost.....	119
Abbildung 4.78: Versuch 6.1.4.2 Rost.....	120
Abbildung 4.79: Versuch 6.1.4.3 Rost.....	120
Abbildung 4.80: Versuch 6.1.4.4 Rost.....	121
Abbildung 4.81: Versuch 6.1.4.5 Rost.....	121
Abbildung 4.82: Messdaten MPC Rost.....	122
Abbildung 4.83: Prozessmodell MPC Rost.....	123
Abbildung 4.84: ModPreCon Parameter Entwurfsphase.....	124
Abbildung 4.85: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Bestrafung der Stellgrößenänderungen.....	125
Abbildung 4.86: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Bestrafung der Stellgrößenänderungen.....	125
Abbildung 4.87: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Gewichtung Regelgröße.....	126
Abbildung 4.88: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Online Parameter PreFilt 10000s .	127
Abbildung 4.89: Zeitverhalten: MPC_1 und MPC_2, Online Parameter PreFilt 1000s und 5000s.....	128
Abbildung 4.90: Schichthöhenverlauf über 12 Stunden (vom Modell gerechnet).....	129
Abbildung 4.91: Betrieb mit aktivem Schichthöhenregler Rost-Zone 1.....	130
Abbildung 4.92: Verlauf Schichthöhe bei Erhöhung Rostgeschwindigkeit.....	131
Abbildung 4.93: Verlauf Schichthöhe bei Erhöhung Aufgabegeschwindigkeit.....	132
Abbildung 4.94: Regleroptimierung starten.....	134
Abbildung 4.95: Schritt 7 Prozess- und Regelparameter.....	135
Abbildung 4.96: Simulation.....	136
Abbildung 4.97: Trend Simulation.....	136
Abbildung 4.98: Sprungantwort Versuch 5.2.1 und 5.2.2.....	138
Abbildung 4.99: Regelparameter Versuch 5.2.2.....	138
Abbildung 4.100: Regelparameter Versuch 5.2.2.1.....	139
Abbildung 4.101: Sprungantwort Versuch 5.2.2.1.....	139
Abbildung 4.102: Sprungantwort Versuch 6.2.1.....	140
Abbildung 4.103: Meldung PID-Tuner.....	141

Abbildung 4.104: Sprungantwort Versuch 6.2.2.....	141
Abbildung 4.105: Regelparameter Versuch 6.2.2.....	142
Abbildung 4.106: Sprungantwort Versuch 6.2.2.1.....	143
Abbildung 4.107: Regelparameter Versuch 6.2.2.1.....	143
Abbildung 5.1 / Organigramm / Vorgänge auf dem Rost.....	145