

Schlussbericht für den Zeitraum : 1.09.2005 — 30.06.2008

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Vergleich und Entwicklung innovativer Regelungskonzepte für Rostfeuerungen am Beispiel der Müllverbrennung

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigelegt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Clausthal-Zellerfeld, den 31. Juli 2008

Ort, Datum

ppa S. Voelgel

Unterschrift ~~der~~ des Projektleiter(s)

***Vergleich und Entwicklung innovativer Regelungs-
konzepte für Rostfeuerungen am Beispiel der
Müllverbrennung***

Fördermittelgeber:

**AiF - Arbeitsgemeinschaft industrieller
Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (Köln)**

Projekt-Nr.: 1 63 1992

VGB-Nr 271

Förderkennzeichen AiF: 14557 N

31. Juli 2008



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Aufgabenstellung	7
3	Änderungen gegenüber der Antragsstellung	7
3.1	Änderungen im Projektbegleitenden Ausschuss	7
3.2	Laufzeitverlängerung	7
3.3	Vorversuche	7
3.4	Prädiktives Modul	8
4	Vorgehensweise	9
4.1	Allgemeine Vorgehensweise	9
4.2	Leistungsberechnung	9
4.3	Eingesetzter Brennstoff	11
4.4	Beurteilung des Reglerverhaltens	12
5	Veränderungen in der Anlagentechnik	13
5.1	Feuerraummodernisierung	13
5.2	Sensorik	13
5.2.1	Infrarotkamera	13
5.2.2	Radarmessgerät zur Bestimmung der Brennbetthöhe	15
5.2.3	IR-Pyrometer zur schnellen Abgastemperaturmessung	16
5.2.4	Messung Volumenstrom Ende 1. Zug	17
5.2.5	Wägezellen für die Brennstoffwaage	17
5.2.6	Sonstiges	17
6	Audits / Übergeordnetes Regelungskonzept	18
7	PID-Regelung	25
7.1	Regelungskonzept	25
7.1.1	Beschickungsregelung	25
7.1.2	Regelung Rostantriebe	25
7.1.3	Luftmengen und -verteilung	25
7.2	Versuchsergebnisse	26

8	Fuzzy-Regelung	29
8.1	Berechnung Brennstoffumsatz	29
8.2	Beschickungsregelung	30
8.3	Regelung Rost.....	30
8.4	Regelung Luftmengen und Verteilung (vereinfacht)	31
8.5	Ergebnisse.....	34
9	Adaptive Regelung	40
9.1	Erweiterung der PID-Regelung.....	40
9.2	Änderung der Regelung zur Rostfreigabe	41
9.3	Ergebnisse.....	42
10	Neuronale Netze als Prozessmodell	47
10.1	Aufbau eines neuronalen Klassifikators	48
10.1.1	Aufgabe der selbstorganisierenden Karte	48
10.1.2	Aufgabe des Backpropagation-Netzes	50
10.2	Datenverwaltung / -bereitstellung	51
10.3	Prädiktives Verhalten des KNN	52
10.4	Seltenheitsanalyse der Daten.....	54
10.5	Ergebnisse: Versuchsbetrieb und Simulation	56
10.5.1	Technikumsanlage CU TEC	57
10.5.2	Simulation mit Daten aus Großanlagen	58
10.6	Verbesserung des prädiktiven Verhaltens	61
11	Modellgestützte Regelung	62
11.1	KNN als Modell	62
11.1.1	Nutzung einer zukünftigen (berechneten) Regelabweichung	62
11.1.2	Totzeitkompensation	63
11.2	Einsatz des Rostmodells im Prozessleitsystem der GKS	65
12	Ansätze zur Ergebnisverbesserung	73
13	Industrielle Anwendbarkeit der Ergebnisse	74
14	Danksagung	75

15	Unterschrift	75
16	Projektspezifische Veröffentlichungen	76

1 Zusammenfassung

Die Audits an den untersuchten Großanlagen zeigten, dass die Regelungskonzepte einige Rostart- und anlagenbauerspezifische Unterschiede aufwiesen. Es ergaben sich aber auch viele Gemeinsamkeiten durch den Umstand, dass die Gesetze der Naturwissenschaften der Müllverbrennung in allen Anlagen gleich sind. Es war möglich, auf den Erkenntnissen aufbauend ein PID-Regelungskonzept für die Technikumsanlage zu entwickeln.

Zur Schaffung guter apparatetechnischer Voraussetzungen erfolgte die Ergänzung der vorhandenen Sensorik an der Versuchsanlage. Im Betrieb erwies sich die Radarmessung als zuverlässiges Signal, welches nicht Stand der Technik ist.

Die PID-Regelung an der Technikumsanlage funktionierte sehr gut. Die Anlage kann im sicheren Status gehalten werden. Damit war die Basis gelegt, um andere Regelungssysteme implementieren zu können. Verbesserungsmöglichkeiten sind in Kap. 12 aufgezeigt.

Auch die implementierte Fuzzy-Regelung lieferte für die Regelkreise Beschickung, Rost und Verbrennungsluft schon mit wenigen Regeln gute Ergebnisse.

Ein übergeordnetes Regelungskonzept in Form des Adaptiven Reglers, welcher mittels Fuzzy-Logic die Brennstoffqualität erfaßte und in die PID-Regelung einfließen ließ, verbesserte die Gleichmäßigkeit der Wärmefreisetzung auch bei plötzlichen Brennstoffwechseln. Ein Erlöschen des Feuers, wie es bei der Technikumsanlage schnell passieren kann bei nassem Müll, wurde durch das Konzept verhindert.

Der Vorsatz, das KNN als eigenverantwortliches Regelungssystem agieren zu lassen, mußte abgebrochen werden. Die Versuchswoche zeigte aufgrund der zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgereiften Netze, dass unbekannte Anlagenzustände zu Aktionen des Systems führen können, welche große Schäden verursachen würden. Dabei trat die Erscheinung auf, dass das KNN bei der Suche nach ähnlichen Aktivitätsmustern zwar Erfolge haben konnte, daraus aber völlig falsche Aktionen für die Aktorik ableitete. Dieser Systemfehler konnte im Rahmen des Projektes nicht behoben werden. Trotzdem war absehbar, dass das KNN in der Lage sein wird, den Anlagenzustand für eine gewisse Zeitspanne vorauszusagen.

Der notwendige Strategiewechsel teilte das KNN in zwei Netze auf, nämlich eine Variante für kurzfristige und eine Ausführung für langfristige Vorgänge.

Der Zusammenschluß der Ergebnisse zum Prädiktiven Regler in Form eines PID-Konzeptes mit einem KNN für den Blick in die Zukunft zeigte, dass über einen Horizont von ca. 3 Minuten in die Zukunft geschaut werden kann. Weiter darüber hinausgehend erscheint nicht möglich aufgrund des Umstandes, dass der Regler die Prädiktion verwendet, um die Aktorik zu verstellen. Damit aber stellt sich ein anderer (und zwar idealerweise ruhigerer) Anlagenzustand ein, als es bei einer Vorausschau in die Zukunft um z.B. 20 Minuten der Fall sein würde. Lange Horizonte sind nur möglich, wenn das KNN schon die Wirkung der Aktorikeinstellungen sowie den Brennstoff im Einfülltrichter kennen würde.

Die im Rahmen der vereinbarten Kooperation parallelen Arbeiten zum Einsatz eines Rostmodells am **Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt** (Abk.: GKS) führten zum Ziel, nämlich der Vorausberechnung wesentlicher Daten der Anlage durch das Modell aus Inputdaten des Prozessleitsystems.

Die Validierung des Prädiktiven Reglers anhand der Anwendung des KNN als vorausschauendes Modul mit Daten von Großanlagen des PA am Beispiel der GMVA Niederrhein zeigte, dass dort aufgrund der umfangreicheren Datenlage eine zumindest ebenso gute Voraussage der Dampfmenge möglich war. Jede Anlage erfordert ein eigens für sie programmiertes KNN aufgrund der unterschiedlichen Verbrennungssysteme, Sensorik und Aktorik. Das entwickelte System kann aber immer angewendet werden.

Schlussfolgerung: Gemäß Antragstellung wurden drei Teilziele angestrebt. Sie wurden erreicht zu:

- TE 1:** Die drei Regelungsstrategien PID, Fuzzy Logic und KNN konnten nebeneinander gestellt werden, um Stärken und Schwächen herauszuarbeiten.
- TE 2:** Mit dem Adaptiven sowie dem Prädiktiven Regler war es möglich, Stärken der Einzelsysteme für übergeordnete Regelungsstrategien zu nutzen.
- TE 3:** Die Aufschaltung eines mathematischen Rostmodells zur Prädiktion wurde nicht erreicht. Die Aufschaltung eines impliziten Modells als Alternative gelang. Eine Voraussage wesentlicher verfahrenstechnischer Parameter über einen Zeithorizont von ca. 3 Minuten wurde möglich.

2 Aufgabenstellung

Müllverbrennungsanlagen arbeiten mit Regelungsverfahren auf einem hohen Stand der Technik. Für Entwicklungen hinderlich ist der Umstand, dass die Anlagen aufgrund ihres kommerziellen Status ohne Betriebsstörungen fahren müssen. Um diesen Umstand zu umgehen, setzte die Forschungsstelle einen vorhandenen Rückschubrost nach dem System MARTIN® einer thermischen Leistung von 0,9 MW Feuerungswärmeleistung ein. An der Anlage können im Versuchsbetrieb gezielt Störungen aufgegeben werden, welche auszuregeln sind.

Im Rahmen des Arbeitsplanes waren folgende Aufgaben zu bewältigen:

1. Erfassung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden kommerzieller Anlagen, exemplarisch an je einem Vertreter von Walzen-, Vorschub- und Rückschubrost.
2. Ermittlung der Stärken und Schwächen der Regelungssysteme PID, Fuzzy Logic und Künstliche Neuronale Netze (Abk.: KNN) durch Implementierung an der Technikumsanlage und Versuchsfahrten.
3. Analyse der Stärken und Schwächen → Zusammenschaltung der Stärken.
4. Entwicklung eines Modells und Nutzung im Regelungssystem zur Voraussage von Anlagenzuständen der Zukunft.
5. Validierung der Ergebnisse (soweit möglich) mit Daten kommerzieller Anlagen.

3 Änderungen gegenüber der Antragsstellung

3.1 Änderungen im Projektbegleitenden Ausschuss

Im projektbegleitenden Ausschuss (Abk.: PA) fanden sich im Stadium der Antragstellung Firmen der Regelungstechnik, des Anlagenbaus und der Betreiberschaft von Müllverbrennungsanlagen zusammen. Als assoziiertes Mitglied trat der *VGB Power Tech* (Essen) bei. Nach Bekanntgabe des Projektstarts kamen zwei weitere Betreiber hinzu, nämlich die *Kreis Weseler Abfallgesellschaft (KWA)* mit dem *AEZ Asdonkshof* sowie das **Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt** (Abk.: *GKS*). Aufgrund von Insolvenz ging die Fa. *AUTEV AG* aus Brandenburg verloren. Die Firma *T&M Engineering* wurde von der *bioenergy systems* gekauft, blieb aber im PA vertreten.

3.2 Laufzeitverlängerung

Die ursprüngliche Laufzeit betrug 01.09.2005 bis 31.08.2007 (24 Monate). Auf Antrag der Forschungsstelle bewilligte die VGB-Forschungstiftung mit Schreiben vom 1.12.2006 die für die AiF kostenneutrale Verlängerung bis zum 30. Juni 2008 (34 Monate).

3.3 Vorversuche

In Erweiterung des Arbeitsplanes des Antrags führte die Forschungsstelle vor den angesetzten Versuchswochen mit Müll Kurzversuche über ein bis zwei Tage mit Holzhackschnitzeln an der Technikumsanlage durch.

Diese dienten zunächst dazu, durch die Aufnahme von Sprungantworten die Eigendynamik des Systems Rückschubrost abzuschätzen. Im fortgeschrittenen Projektstadium wurden solche Versuche durchgeführt, um Fehler in der Implementierung der Regelung aufzuspüren und einen ersten Test der verschiedenen Reglersysteme durchzuführen.

3.4 Prädiktives Modul

Ursprünglich war beabsichtigt, für die Modellierung ein mathematisches Rostmodell einzusetzen. Es gibt in Deutschland verschiedene Entwicklungen, wobei je nach Ansatz meist die Rechengeschwindigkeit der für Regelungsaufgaben kritische Schritt ist. Um den Erfolg des Vorhabens sicherzustellen, wurde eine Strategie mit parallelen Arbeiten eingeschlagen, welche durch den PA-Beitritt des GKS ermöglicht wurde:

1. Nutzung und Weiterentwicklung des bei der CU TEC vorhandenen mathematischen Rostmodells durch die GKS für eigene Regelungsaufgaben. Im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung erfolgt die Einbringung zu veröffentlichender Ergebnisse in dieses Vorhaben.
2. Entwicklung des **K**ünstlichen **N**euronalen **N**etzes (Abk.: KNN) zu einem impliziten Modell, welches nicht mit Differentialgleichungen arbeitet, sondern mit Zusammenhängen.

Durch dieses Vorgehen stieg die Bedeutung des KNN im Projektverlauf stark an.

4 Vorgehensweise

4.1 Allgemeine Vorgehensweise

Das Vorgehen im Projekt wurde in mehrere Module eingeteilt.

- I. Das erste beinhaltete zunächst ein Audit und die Analyse der Feuerungsregelung an Großanlagen. Zur Kooperation bereit erklärten sich die drei Mitglieder des PA GMVA Niederrhein (Walzenrost), MHKW Nord (Kipp-Vorschubrost) und MARTIN mit der TBA Arnoldstein (Rückschubrost). Aus den Audits wurde ein allgemeines Konzept zur Regelung der Rückschubrost-Technikumsanlage abgeleitet.
- II. Im zweiten Schritt wurde versucht, das dynamische Verhalten der Technikumsanlage genauer zu beurteilen. Hierzu wurden Vorversuche mit einem homogenen Brennstoff (Holzhackschnitzel) durchgeführt. Diese dienten im Wesentlichen zur Aufnahme von Sprungantworten der verschiedenen Stellgrößen. Zusätzlich erfolgte eine Erweiterung von Mess- und Stellgliedern; außerdem wurden Modernisierungen um den Feuerraum durchgeführt.
- III. Als erstes Regelungskonzept wurde der PID-Regler an der Technikumsanlage implementiert. Nach der ersten Versuchsfahrt erfolgte ein komplettes Redesign des Regelungskonzeptes und ein erneuter Test des PID-Reglers.
- IV. Auf Basis des in I. erarbeiten und III. veränderten Regelungskonzeptes wurde eine Fuzzy-Regelung implementiert. Diese sollte offensichtliche Schwächen des PID-Systems aufheben.
- V. Ein Regler auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze wurde mit den Betriebsdaten aus III. und IV. trainiert und getestet.
- VI. Die PID-Regelung wurde durch dynamische Anpassung der Reglerparameter ergänzt (gesteuerte Adaption). Die Anpassung erfolgte über ein Fuzzy-Modul und diente dazu, offensichtliche Schwächen des Paketes III. zu ergänzen.
- VII. Auf Basis KNN wurde mit den Betriebsdaten von III. bis VI. ein Prozessmodell der Technikumsanlage trainiert. Dieses diente dazu, online Zukunftswerte des Prozesses zu berechnen und den PID-Regler auf diese Weise zu unterstützen. Die Grenzen und Möglichkeiten des *Prädiktiven Reglers* konnten aufgezeigt werden.

4.2 Leistungsberechnung

Da die Rückschubrost-Technikumsanlage über keinen Dampfkessel verfügt, muss die Leistung auf eine andere Weise bestimmt werden. Dies geschieht über die Abgaszusammensetzung bzw. -menge. Hierbei wird zunächst die Abgasmenge auf eine stöchiometrische Verbrennung ($\lambda=1$) zurückgerechnet. Unter Annahme eines konstanten Verhältnisses von Heizwert zu Mindestabgasmenge (trocken) (**s. Abb. 4.2-1**) kann schließlich die Leistung bestimmt werden.

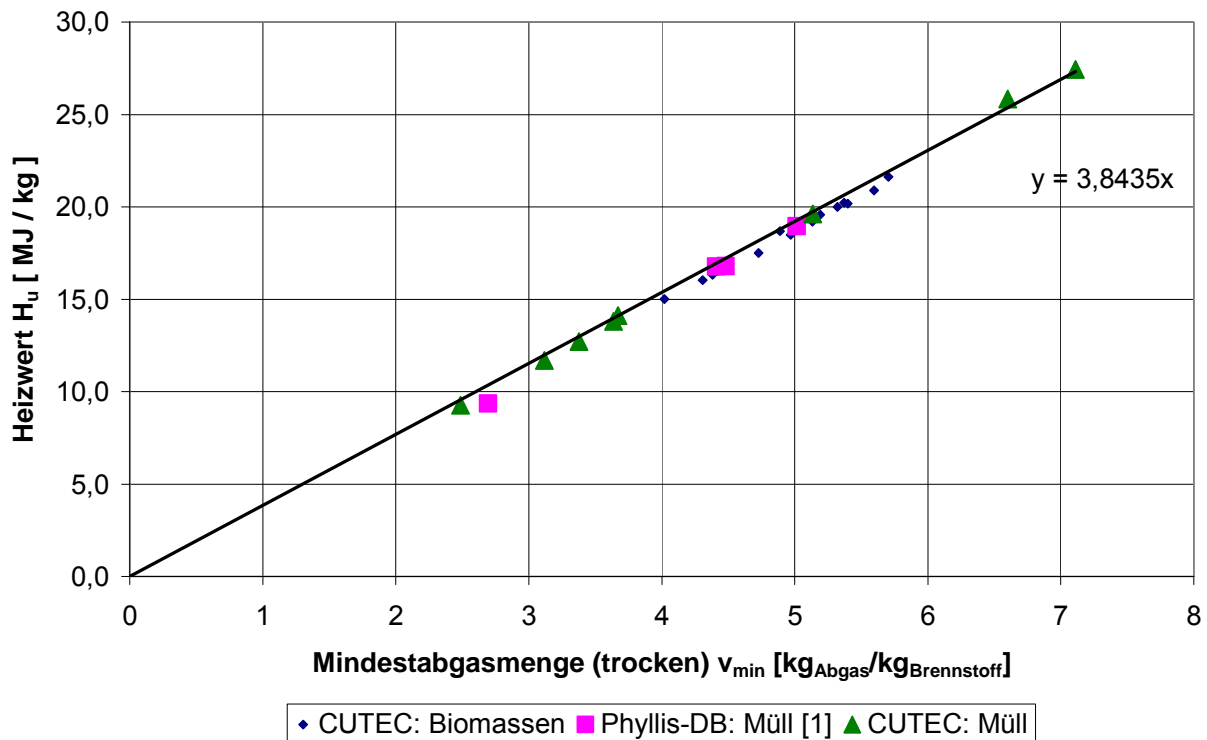


Abb. 4.2-1: Verhältnis von Heizwert zu Mindestabgasmenge für Müll und Biomassen

Die aus diesem Verfahren folgende Berechnung (thermische Leistung) ist jedoch nicht direkt mit der Dampfmenge einer Großanlage vergleichbar. Vielmehr spiegelt diese Berechnung den momentanen Brennstoffumsatz auf dem Rost wieder. Zur Erzeugung einer vergleichbaren dynamischen Größe wird das Verfahren zur Leistungsberechnung auf o.g. Großanlagen des PA angewendet und mit der erzeugten Dampfmenge verglichen. Damit beide Größen miteinander vergleichbar sind, werden beide durch ihren zeitlichen Mittelwert geteilt, sodass ein gemeinsamer Bezugspunkt entsteht.

In **Abb. 4.2-2** sind diese Größen im zeitlichen Verlauf für eine exemplarische Anlage aufgetragen. Es fällt auf, dass die Dampfkurve (blau) einen geglätteten Verlauf des berechneten Brennstoffumsatzes (grün) darstellt. Zur Glättung der Kurve wird ein Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1) verwendet. Bei zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten ($t_1=5\text{min}$; $t_2=30\text{min}$) stellt sich ein unterschiedliches Glättungsverhalten ein. Bei $t_2=30\text{min}$ (gelb) wird die Kurve wesentlich zu stark geglättet. Bei $t_1=5\text{min}$ (rot) stellt sich ein sehr ähnlicher Verlauf wie bei der Dampfkurve ein. Bei zwei der drei untersuchten Großanlagen bestätigte sich die Zeitkonstante von $t=5\text{min}$ zur Glättung im Mittel.

Um die Vergleichbarkeit des Technikurostes mit den kommerziellen Anlagen zu gewährleisten, wird die Berechnung der Leistung mit dem oben beschriebenen Verfahren durch eine Glättung mit einem PT1-Filter ($t=5\text{min}$) ergänzt.

[1] Brennstoffdatenbank PHYLLIS, <http://www.ecn.nl/phyllis/>

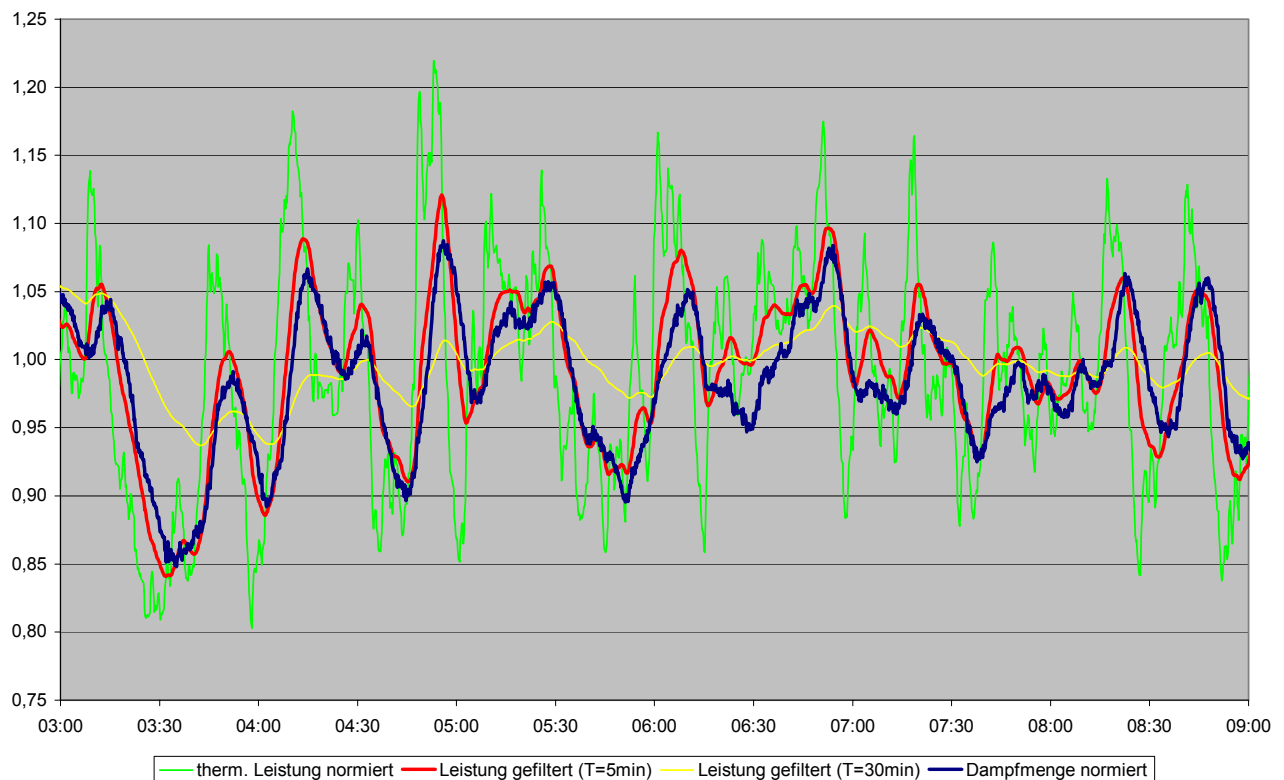


Abb. 4.2-2: Zeitlicher Verlauf des berechneten Brennstoffumsatzes und der Dampfmenge einer Großanlage im Vergleich

4.3 Eingesetzter Brennstoff

Aus Erfahrungen der Großanlagen ist bekannt, dass die Hauptstögröße der eingesetzte Brennstoff *Restmüll* ist. Der Input für die Technikumsanlage wird aus einer heizwertarmen und einer heizwertreichen Fraktionen gemischt, um gezielt Werte einstellen zu können. Der heizwertarme Teil stammt aus einer MBA nach mechanischer Aufbereitung und Metallabscheidung (Heizwert ca. 6-7 MJ/kg). Beim heizwertreichen Teil handelt es sich um **Ersatzbrennstoff** (Abk.: EBS) (hauptsächlich Papier/Plastik, Heizwert ca. 18-19 MJ/kg). Die Fraktionen werden in einem Massenverhältnis 75% heizwertarm und 25% heizwertreich (etwa gleicher Volumenanteil) mit einem Radlader in einem 7m³ Container gemischt, sodass sich ein mittlerer Gesamtheizwert von etwa 10 MJ/kg ergibt.

Eine exemplarische Brennstoffanalyse für eine Versuchswoche zeigt **Tab. 4.3-1**.

Tab.: 4.3-1: Exemplarische Brennstoffanalyse

Brennstoff:			Hausmüll	Fluff	Mischung*
Misch.-anteil HM	Ma.-%		100	0	75
Misch.-anteil Fluff	Ma.-%		0	100	25
Wassergehalt HM	w Ma.-%		40	-	-
Wassergehalt Fluff	w Ma.-%		-	23	-
Wassergehalt Mischung**	w Ma.-%		0,0	0,0	35,8
Bezugszustand			wf	wf	roh
Asche**	a Ma.-%		39,2	8,9	19,3
Heizwert (Analyse)	H _u MJ/kg		12,1	27,4	9,8
Kohlenstoff	C Ma.-%		31,5	61,1	25,9
Wasserstoff	H Ma.-%		4,6	8,7	3,8
Sauerstoff	O Ma.-%		23,1	19,9	14,2
Stickstoff	N Ma.-%		0,9	0,3	0,5
Schwefel	S Ma.-%		0,3	0,1	0,2
Chlor	Cl Ma.-%		0,4	0,9	0,3
Fluor	F Ma.-%		0,0	0,1	0,0

*: Für eine beispielhafte Mischung von 75 % HM zu 25 % Fluff. Andere Mischungen sind möglich

** : Werte für Asche und Wasser aus Durchschnittswerten einer Versuchswoche

4.4 Beurteilung des Reglerverhaltens

Die Wirksamkeit der in SPS und Prozeßleitsystem implementierten Reglersysteme mußte anhand der Reaktion auf Störungen nachgewiesen werden. Die Beurteilung des Reglerverhaltens findet anhand verschiedener Kriterien statt. Dabei wird zwischen dem Betrieb mit „normalem Müll“ und dem Betrieb mit extremen Heizwerten unterschieden.

Extremsituationen werden durch die gezielte Beeinflussung der Brennstoffqualität erzeugt. Hierbei werden der normalen Müllmischung heizwertreiche Pellets (BRAM-Pellets ca.20 MJ/kg, hauptsächlich Papier und Plastik) beigemischt oder es wird sehr nasser Müll verwendet. Anhand eines solchen Brennstoffes soll die generelle Stabilität bzw. Instabilität eines Reglers gezeigt werden.

Die Beurteilung für das Reglerverhalten bei normalem Müll findet anhand eines Histogramms statt. Hierbei wird die Häufigkeitsverteilung der berechneten Leistungswerte dargestellt. Da die Versuchszeiträume knapp bemessen sind, werden hier Versuchseinstellungen von ca. 12-24 Stunden verglichen. Hierbei kann es in unterschiedlichen Versuchswochen auch zu unterschiedlichen Schwankungen in der Brennstoffqualität kommen und somit zu ungleich schwieriger zu bewältigenden Situationen. Extreme Heizwertschwankungen sind hier nicht mit einbezogen, da diese bei ohnehin sehr kurzen Versuchseinstellungen statistisch schwierig zu berücksichtigen sind.

5 Veränderungen in der Anlagentechnik

5.1 Feuerraummodernisierung

Um apparatetechnisch gute Voraussetzungen für die Funktionsweise der zu implementierenden Regelungen zu schaffen, erfolgten zu Projektbeginn einige Ergänzungen der Aktorik sowie der Bestimmung und Reduzierung der Falschluff. Zu nennen sind:

- Motorische Drehzahleinstellung der Beschickschnecke ergänzt.
- Einzelansteuerung der Rostantriebe über Bus und Frequenzumrichter implementiert.
- Reduzierung der Falschluff durch neue Ofentürabdichtung.
- Abschätzung der Falschluffmenge durch Versuche.
- Austausch der Hinterisolierung im 1. Zug für eine bessere Wärmeleitung (s. **Abb. 5.1-1**).

Abb. 5.1-1: 1. Schuss mit neu ausgekleideten Stirnwänden (Beton + Hinterisolierung)



5.2 Sensorik

Eine Regelung besteht aus den Komponenten Aktorik, Sensorik und dem Regler. Die Qualität des Systems hängt stark vom Umfang und der Reaktionszeit der Sensorik ab. Im ersten Schritt waren daher umfangreiche Überlegungen zur Anpassung der Technikumsanlage anzustellen. Ziel war es besonders, möglichst schnelle Signale rund um den Feuerraum zu bekommen.

5.2.1 Infrarotkamera

Die Fa. *MARTIN GmbH für Umwelt- und Energietechnik* (München, Abk.: MARTIN) bietet für ihre Anlagen eine Infrarotkamera an, welche die Temperaturverteilung der Brennbettoberfläche als optisches Bild darstellen kann. Die Kamera wird auf dem 1. Zug installiert. Von dort aus kann sie durch die Gasströmung schauen. Besondere Vorteile des Systems sind:

1. Es liegt ein optisches Signal vor → hohe Meßgeschwindigkeit des Sensors
2. Das örtliche und zeitliche Verhalten der Temperaturverteilung des Brenngutes
3. Gewinnung von Regelungssignalen aus dem Primärverbrennungsprozess

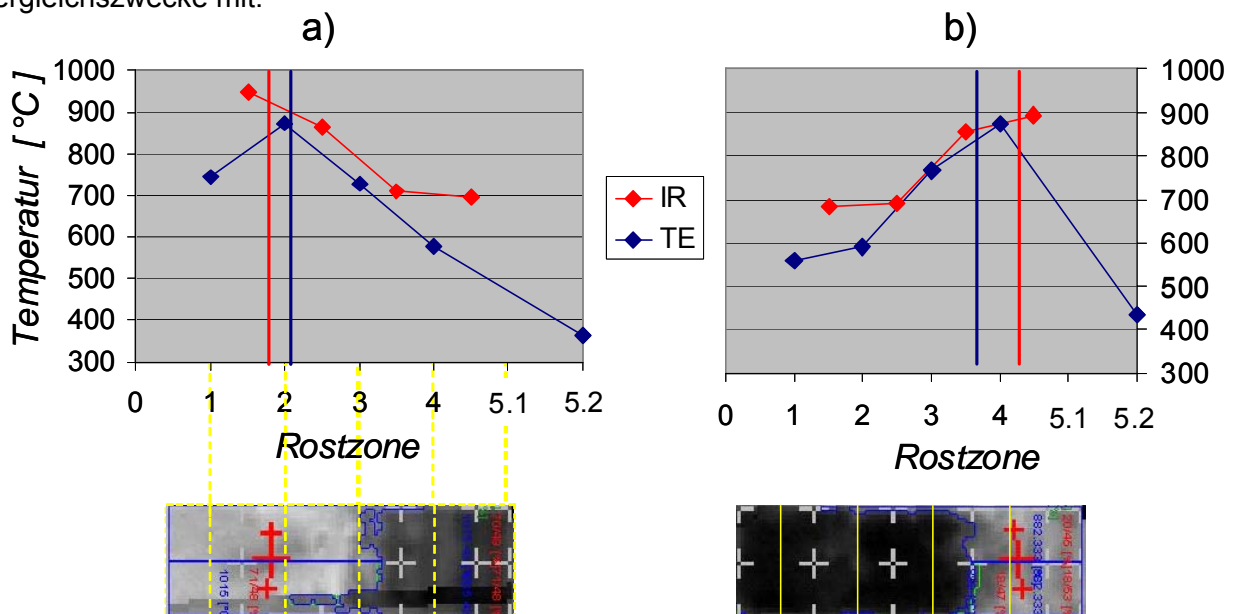
MARTIN stellte im Rahmen des Vorhabens eine IR-Kamera mit Auswerterechner leihweise zur Verfügung. Da

- a) das für die Signalgenerierung wichtige gaskinetische Verhalten durch die Geometrie des kleinen Technikums-Ofens ungünstiger ist als in der Großanlage, weil
- b) IR-Kamerasignale zur Erweiterung der Feuerungsregelung nicht für jede Rosttechnologie und
- c) wegen ungünstiger Aktorik für eine breite Anwendung nicht als Standardanwendung eingesetzt werden kann,

wurde versucht, eine Äquivalenz mit konventioneller Meßtechnik über Thermoelemente (Abk.: TE) herzustellen. Dazu dienten TE, welche durch den Brennraum über die Rostlänge installiert sind. Die Zuführung erfolgt durch Stutzen auf beiden Seitenwänden.

Abb. 5.2.1-1 zeigt, dass sich in der Trocknungs- und Ausbrennzone Unterschiede ergeben, die Zonen 2 bis 4 aber gut übereinstimmen. Die Lage der Hauptbrennzone erkennen beide Sensoren nahezu gleich. Die Unterschiede in den Niedertemperaturbereichen beruhen vermutlich auf den unterschiedlichen Meßprinzipien. Da die TE nur die Temperatur im Längs-seiten-Randbereich des Rostes, die IR-Kamera aber die gesamte (sichtbare) Fläche der Brennbett-Oberfläche erfaßt, verwundern abweichende Ergebnisse nicht. Die höhere Temperatur, wie sie das IR-Kamerasystem ermittelt, kommt vermutlich aus der Strahlung der Seitenwände, die im Gegensatz zu den Kessel-Seitenwänden einer Großanlage nicht gekühlt und damit wesentlich heißer sind.

Für die weiteren Regelungsarbeiten fand das Signal der TE Anwendung bei der Steuerung der Luftvorwärmung sowie der Erkennung der Brennstoffqualität. Die IR-Kamera lief für Vergleichszwecke mit.



a) Wassergehalt Brennstoff = 20 %, b) Wassergehalt Brennstoff = 40 % (beides berechnet aus Abgaszusammensetzung)

--: berechnete Lage der Hauptbrennzone gemäß IR-Kamera, - -: gemäß TE

Abb. 5.2.1-1: Vergleich der IR-Kamera mit Thermoelementen über dem Rost

5.2.2 Radarmessgerät zur Bestimmung der Brennbetthöhe

Wie in Kap. 6 beschrieben stellt der Brennstoffvorrat auf dem Rost bei Großanlagen eine wichtige Größe für die Regelung bei der Beschickung dar. Traditionell wird versucht, den Druckverlust der Primärluft in Zone 1 als Maß für die Brennstoffhöhe heranzuziehen. An der Technikumsanlage wurde eine entsprechende Implementierung getestet (s. **Abb. 5.2.2-1**). Auch als stark gemittelter Wert konnte das Signal nicht sinnvoll ausgewertet werden.

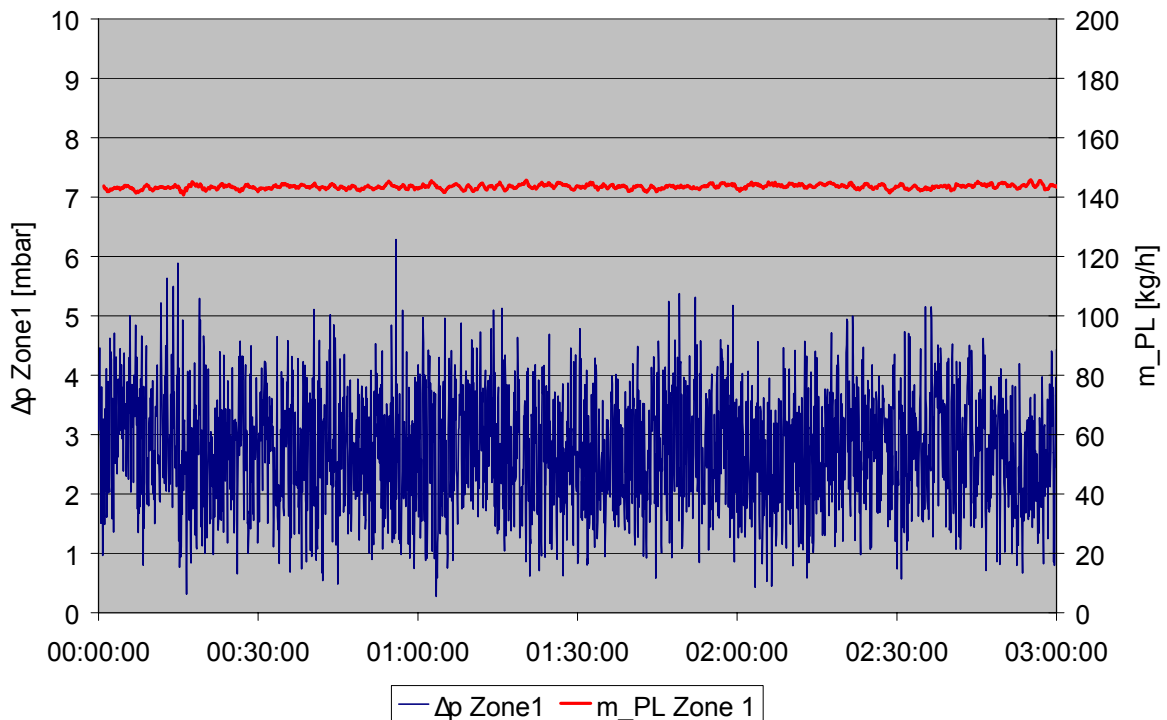


Abb. 5.2.2-1: Differenzdruck über Rost und Brennbett in der ersten Primärluftzone

Es wurde überlegt, durch welche Messverfahren ein Ersatzwert für den Brennstoffvorrat in der ersten Rostzone gewonnen werden kann. Hierbei standen mechanische, ultraschall- und radarbasierte Ansätze zur Auswahl. Der mechanische Ansatz schied aufgrund der aggressiven Umgebungsbedingungen aus. Eine Ultraschallmessung ist temperaturabhängig und ein Korrekturverfahren sehr aufwändig. Es verblieb eine radarbasierte Lösung.

Die Fa. *VEGA Grieshaber KG* (Schiltach) bietet für Füllstandsmessungen im Mülleintrag eine Variante an. Ausführungen für den Einsatz am Feuerraum von Großanlagen wurden bisher nicht realisiert. Hauptgründe hierfür sind:

- a) die Sende- und Aufnahmeelektronik des Apparates befindet sich außerhalb des Feuerraums → weite Strecke vom Kesseldach zum Messort bzw. ungünstiger Sichtwinkel.
- b) Bei weiten Strecken ist eine hohe Sendeleistung notwendig bzw. große Antennendurchmesser (→ Kesselausbiegung).

Für die geometrischen Verhältnisse der Technikumsanlage ist die Radarmessung aber geeignet.

Das Messgerät wurde an der Decke des 1. Zuges eingebaut (s. **Abb. 5.2.2-2**). Es bestimmt die Entfernung zur Brennbett­oberfläche. Durch den Öffnungswinkel der Antenne von 8° wird etwa die mittlere Betthöhe in den ersten beiden Rostzonen gemessen. Nach anfänglichen Schwierigkeiten durch eine hohe Staubbelastung des Abgases konnte ein zuverlässiger Messwert gewonnen werden.

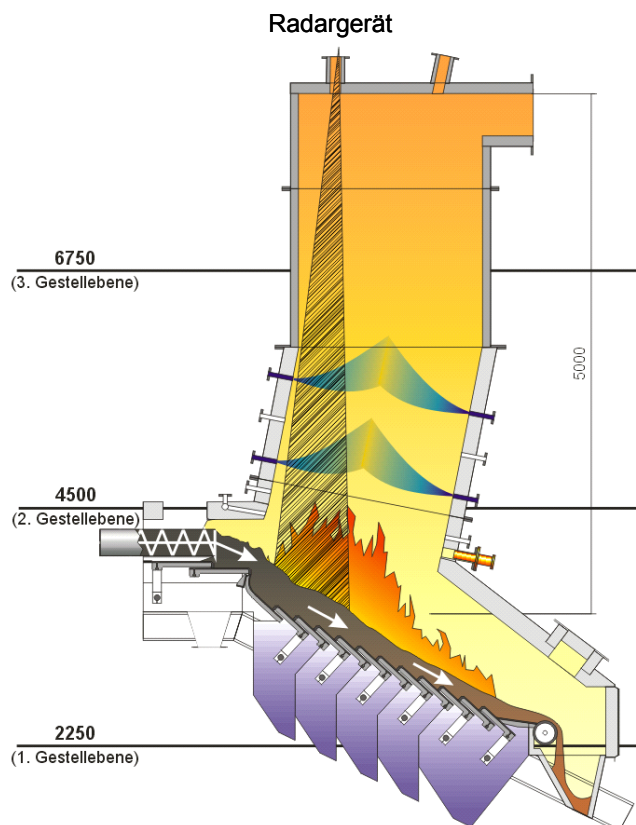


Abb. 5.2.2-2: Einbauort Radarmessgerät zur Bestimmung der Brennbetthöhe

5.2.3 IR-Pyrometer zur schnellen Abgastemperaturmessung

Bei ersten Versuchen zur Regelung des Brennstoffumsatzes auf dem Rost durch An- und Abschalten der Roststäbe stellte sich heraus, dass die Totzeit der Leistungsberechnung (Abgasweg und Messgasaufbereitung; Gesamt ca. 1-2 Minuten) für eine solche Regelung wesentlich zu groß ist. Die Schürwirkung der Roststäbe macht sich bereits wenige Sekunden nach Aktivierung der Rostantriebe bemerkbar. Da das Leistungssignal erst mit großer Verzögerung eintrifft, werden die Rostantriebe wesentlich zu spät an- bzw. abgeschaltet. Dies führt zu einer sehr stark schwankenden Leistungskurve. Auch die Temperaturmessung mittels Thermoelement nach 1. Zug erwies sich als zu träge (s. **Abb. 5.2.3-1**).

Aus diesen Versuchen wurde deutlich, dass ein schnelleres Signal für den Brennstoffumsatz zur Regelung der Roststäbe erforderlich ist. Zur Diskussion standen hierbei eine schnelle Temperaturmessung (IR-Pyrometer) und eine schnelle O₂-Messung (Laser). Aus Kosten- und Platzgründen wurde das IR-Pyrometer gewählt.

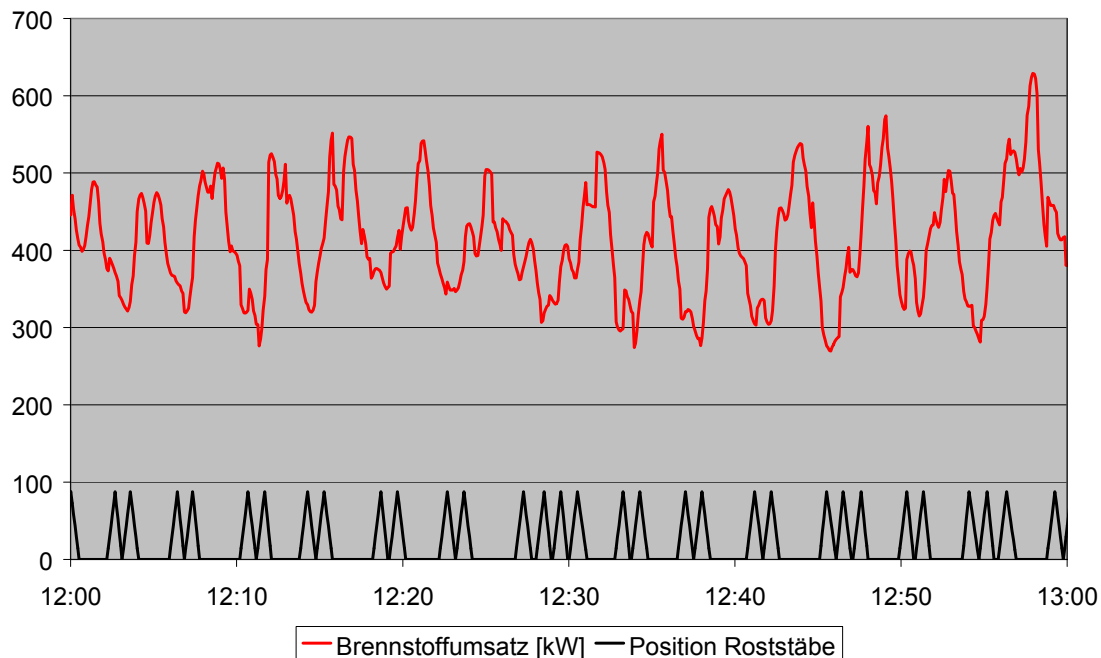


Abb. 5.2.3-1: Regelung des Brennstoffumsatzes durch Rostbewegung
-Leistungssignal mit zu großer Totzeit-

5.2.4 Messung Volumenstrom Ende 1. Zug

Für die Berechnung der augenblicklichen Feuerungswärmeleistung wäre es wünschenswert, wenn neben dem beschriebenen Weg über die O_2 -Konzentration als Maß für den Volumenstrom auch eine direkte Messung dieser Größe möglich wäre. Installiert wurde daher eine Staudrucksonde. Die Werte im Versuchsbetrieb waren plausibel, so lange die Sonde funktionierte. Leider war dies nur über einen sehr kurzen Zeitraum von ca. einem Tag der Fall. Anschließend traten irreparable Korrosionsschäden auf. Auf den weiteren Einsatz des Gerätes wurde daher verzichtet.

5.2.5 Wägezellen für die Brennstoffwaage

Zur kontinuierlichen Verfolgung des Brennstoffmassenstroms wurde der Mülltrichter auf insgesamt vier Wägezellen gestellt. Nach umfangreichen Anpassungsarbeiten, in denen Störsignale z.B. beim Aufsatz einer neuen Mulde oder kurzzeitige Querkräfte aus der umliegenden Anlagentechnik auszuschließen waren, lag am Ende ein zuverlässiges Signal vor.

5.2.6 Sonstiges

Zu den beschriebenen Sensorikmaßnahmen kamen einige einfache Meßelemente hinzu:

- Zusätzliche Thermoelemente über der Rostlänge.
- Volumenstrommessung der Kühlluft 1. Zug.
- Volumenstrommessung für das rezirkulierte Abgas.

6 Audits / Übergeordnetes Regelungskonzept

Allgemeines zu den untersuchten MVA

Im Rahmen des Projektes wurden drei kommerzielle Müllverbrennungsanlagen mit unterschiedlicher Rosttechnologie im Hinblick auf ihre Regelungskonzepte näher untersucht. Es handelte sich um einen Walzenrost (GMVA Oberhausen), einen *Kipp-Vorschubrost* (MHKW Nord, Mannheim) und einen Rückschubrost (TBA Arnoldstein). Allen Systemen gemeinsam ist die Art der Müllbeschickung über Schurre und Aufgabeschieber, die Bestimmung der Müllschichtdicke nach Aufgabe durch Messung der Druckdifferenz in der ersten Primärluftzone, die Vorwärmung der Primärluft über einen Gas-Dampf-Vorwärmer sowie die Kontrolle des Feuers und des Müllfüllstands im Aufgabeschacht aus der Schaltwarte über Videobilder.

Gemeinsamkeiten in den Regelungskonzepten der untersuchten MVA

Die langfristige Dampfleistung wird bei allen Anlagen über eine entsprechende Regelung des Aufgabeschiebers und damit der auf dem Rost gespeicherten Müllmenge realisiert. Eine ausreichende Menge von unverbranntem, vorgetrocknetem Müll ist Voraussetzung für das Funktionieren der Leistungsregelung über Primärluft oder Schürung.

Wegen der Trägheit des Verbrennungsprozesses (erforderliche Trocknung des Mülls) muss ständig eine hinreichende Müllmenge vor dem Erreichen der Hauptverbrennungszone auf dem Rost gespeichert sein. Alle untersuchten Rostsysteme verwenden hierfür als Signal den Druckverlust über die Müllschicht in der ersten Rostzone, also den Primärluftvordruck in dieser Zone. Da der Druckverlust der Strömung durch das Bett neben der Betthöhe auch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, müssen bei Änderungen der Primärluftmenge entsprechende Korrekturen berücksichtigt werden. Undurchlässiger Müll (schwere, feuchte Qualität oder sperrige Folien/Platten) kann zu Fehlinterpretationen des Signals führen.

Die O₂-Konzentration im Abgas wird bei allen Systemen über die Gesamt-Primärluftmenge geregelt. Kurzzeitige Sollwertunterschreitungen werden auch mit einer erhöhten Sekundärluftmenge behoben.

Normalerweise sollten bei gut funktionierenden Regelungen der Frischdampfmenge und der O₂-Abgaskonzentration auch andere Parameter wie CO-Konzentration und Abgastemperatur im zulässigen Bereich liegen. Allerdings können wegen der wechselnden Müllzusammensetzung, Transportschwierigkeiten oder anderer Störungen des Anlagenbetriebs größere Schwankungen auftreten, die kurzfristig mit anderen Maßnahmen bekämpft werden müssen, um nicht gesetzliche Vorgaben zu verletzen. Bei Gefahr der Unterschreitung der Abgastemperatur nach 17. BImSchV oder länger anhaltender CO-Spitzen wird durch das Einschalten der Stützbrenner Abhilfe geschaffen. In **Tab. 6-1** sind die Gemeinsamkeiten der Regelkonzepte zusammengefasst.

Tab. 6-1: Gemeinsamkeiten in den Regelungskonzepten der untersuchten Anlagen

Regelungsgröße	Stellgrößen		
	GMVA Oberhausen, Kessel 1	MHKW Nord, Mannheim, MK-E	TBA Arnoldstein
Dampfleistung (langfristig)	Aufgabeschieber-Bewegung (Müllmenge in Zone 1)		
O ₂ - Abgaskonzentration	Gesamt-Primärluft (langfristig) Sekundärluftmenge (kurzfristig) ggf. Reduktion der Dampfleistung		
CO-Spitzen	Stützbrenner (bei längerer Überschreitung des Grenzwertes)		
T(FR) < T(zul.)	Stützbrenner		
T(FR) > T(zul.)	Reduktion der Dampfleistung		

Wichtige Informationen können bereits bei der Beschickung der Aufgabetrichter durch den Kranfahrer durch dessen visuellen Eindruck vom momentan verarbeiteten Müll gewonnen werden (z.B. Feuchte, Monochargen). Diese sollten bei Extremsituationen dem Kesselfahrer unverzüglich mitgeteilt werden, damit dieser frühzeitig die Anlageneinstellung anpassen kann.

GMVA Oberhausen, Linie 1

Die GMVA betreibt insgesamt 4 Walzenroste des Herstellers Babcock, wobei Linie 3 zur Zeit erneuert wird. Das Audit erfolgte für Linie 1, die im Jahre 1997 errichtet wurde und für einen Mülldurchsatz von 24,5 t/h ausgelegt ist. Der erzeugte Dampf von max. 74 t/h wird mit den Dampfparametern 60 bar / 480 °C in eine Sammelschiene gespeist. Der Rost verfügt über 6 Walzen mit jeweils 2 Primärluftzonen (rechte und linke Seite der Walze) und ist als Gleichstromfeuerung ausgeführt.

Als Besonderheiten des Walzenrostes sind die akustische Temperaturfeldmessung oberhalb des Bettes sowie die Berechnung von Mülldurchsatz, Heizwert und Wassergehalt des Mülls aus den Prozessdaten zu erwähnen. Sie finden allerdings noch keine Berücksichtigung in den installierten Regelkreisen.

Die maßgebliche Regelung der Feuerung erfolgt durch den eingestellten Dampf-Sollwert und die Regelabweichung der Frischdampfmenge. Der eingestellte Dampf-Sollwert bestimmt die Grundeinstellung des Aufgabeschiebers, der Drehzahl der Rostwalzen 1 bis 6 und der Primärluft zu den einzelnen Verbrennungszonen. Mit der Regelabweichung der Frischdampfmenge (ggf. auch über integrierte und differenzierte Werte der Regelabweichung) werden diese Grundeinstellungen korrigiert.

Die momentane Dampfproduktion und damit die Konstanz der Frischdampfmenge wird ausschließlich über die Primärluftmenge geregelt. Damit lässt sich der Brennstoffumsatz in der Hauptverbrennungszone schnell beeinflussen, sofern genügend brennbares, vorgetrocknetes Material vorhanden ist. Bei Müllmangel – z.B. durch eine verstopfte Aufgabe verursacht – kommt es unweigerlich zu einem Sinken der Dampfmenge, verbunden mit O₂-Anstieg, Temperaturabfall und bei länger anhaltender Minderleistung auch CO-Spitzen.

Die Lage der Hauptbrennzzone wird über die Walzendrehzahlen manuell einreguliert. Die Primärluft wird entsprechend dem Verbrennungsluftbedarf nachgeführt.

In **Abb. 6-1** sind wichtige Betriebsparameter als normierte 2-Minuten-Mittelwerte über einen Tag dargestellt. Es bedeuten m_D (Müll): Dampfmassenstrom aus der Verbrennung von Müll, m_D_SW : Dampfmenge-Sollwert, $m_Heizöl$: Ölmassenstrom der Stützbrenner, O_2_IW/SW : Abgaskonzentration O_2 (Istwert/Sollwert), CO : Abgaskonzentration CO , T_FR : Temperatur im 1. Zug nach 17. BImSchV. Das Diagramm – wie auch die Diagramme für die anderen betrachteten Anlagen – stellt keinen repräsentativen Zustand des Feuerungsbetriebes dar, sondern soll beispielhaft die Auswirkungen von Störgrößen und Regelungsverhalten aufzeigen. Eine größere Störung ist z.B. gegen 10 Uhr erkennbar, wobei in diesem Fall am Montagmorgen erstmals frisch angelieferter, nasser Müll auf den Rost gefördert wird und zeitweise zu einem starken Abfall der Dampfleistung führt. Die Störung wird mit dem Einsatz der Stützbrenner behoben.

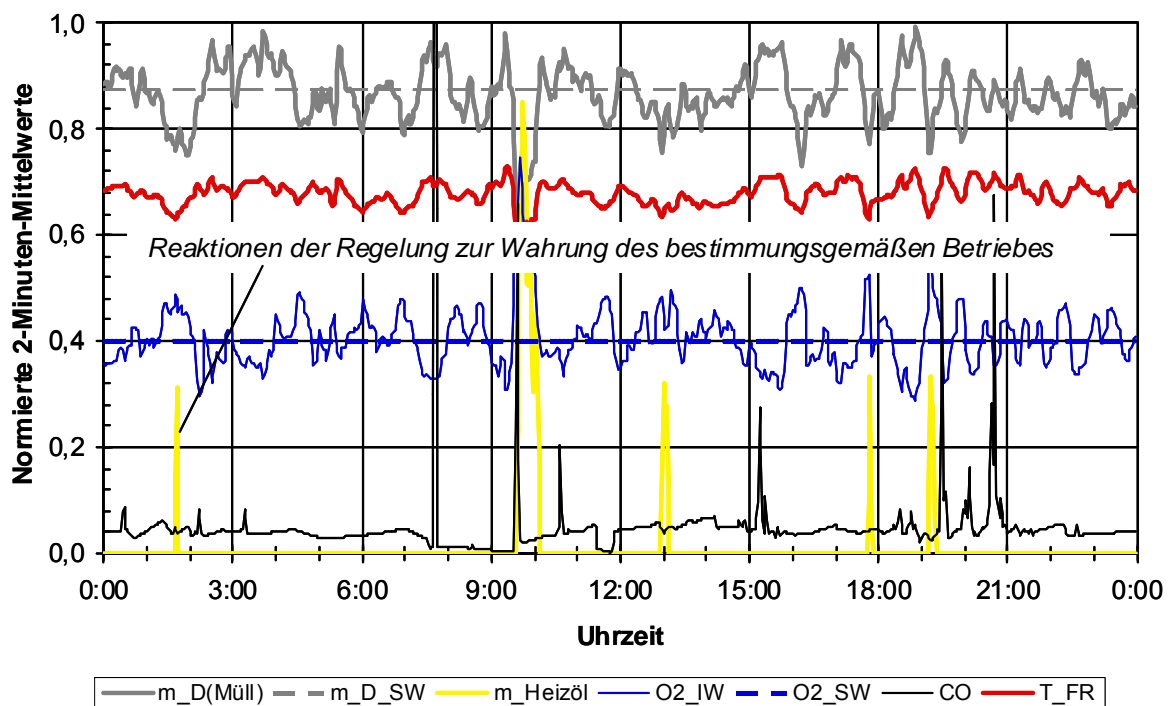


Abb. 6-1: Zeitlicher Verlauf wichtiger Betriebsgrößen an Linie 1, GMVA Oberhausen

MHKW Nord, Mannheim, Kessel MK-E

Im MHKW Nord in Mannheim sind 4 Vorschubroste unterschiedlichen Alters und Bauart installiert. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf den neuesten Kessel „MK-E“ von der Fa. Seegers aus dem Jahre 2003. Der Mülldurchsatz wird mit 25 t/h angegeben. Der Frischdampf wird mit ca. 89 t/h direkt in das Mitteldrucknetz mit den Parametern 28 bar / 280 °C eingespeist. Die Rostfläche ist in der Länge in 5 Zonen eingeteilt, in denen Schubbewegung und Belüftung (jeweils in rechter und linker Seite) separat einstellbar sind. Jede der 10 Primärluftzonen verfügt über einen eigenen Ventilator. Es handelt sich um eine Mittelstromfeuerung.

Die Roststabbewegung kann mit einer zusätzlichen Kippfunktion am Ende eines jeden Schubes für die bessere Schürung des Bettes und somit kurzfristig zur Steigerung des Brennstoffumsatzes genutzt werden. Dabei erfolgt ein kurzes Anheben von speziell dafür vorgesehenen Roststäben bei ausgesetztem Schub. Die Kippfunktion kann für jede Rostzone getrennt und in unterschiedlichen Intensitäten (nach einer vorgegebenen Anzahl von Schüben oder gar nicht) manuell vorgewählt werden. Mit dem Rostvorschub lässt sich die Lage der Hauptbrennzone und die Verweilzeit des Brenngutes in den einzelnen Zonen regulieren.

Ein Prisma teilt den Abgasstrom beim Eintritt in den 1. Zug in zwei Teilströme auf, die jeweils eigene Sekundärluftdüsen besitzen. Die Flammenintensität in der Ausbrennzone wird über ein Videosignal bestimmt. Die Qualität des angelieferten Mülls ist stark schwankend.

Grundlage für die Feuerungsregelung bilden hinterlegte Kennlinien in Abhängigkeit des Kessellast-Sollwerts (Dampfmenge), die insbesondere in Verbindung mit der Regeldifferenz der Frischdampfmenge in die verschiedenen Regelkreise einfließen. Solche Grundeinstellungen existieren für die Regelgrößen Primärluftmenge, Sekundärluftmenge, Soll-Müllschichtdicke in Zone 1 und Transportgeschwindigkeit des Rostes.

Die Frischdampfmenge wird hauptsächlich über die Primärluft geregelt. Korrekturen der Grundkennlinie erfolgen neben der Regeldifferenz Frischdampf über die Parameter „Temperaturänderung in der Nachbrennkammer“ und „O₂-Abgaskonzentration“. Die Verteilung der Primärluft auf die Belüftungszonen erfolgt über Anteilsteller. In den Rostzonen 4 und 5 kann bei zu großer Flammenintensität (Videokamerasignal) die Luftmenge erhöht werden.

Die Sekundärluftmenge wird neben der kessellastabhängigen Grundkennlinie über die Feuerraumtemperatur (sinkende SL bei niedriger Temp.) und die O₂-Konzentration (steigende SL bei niedrigem O₂) beeinflusst. Die Verteilung auf die beiden Seiten des Prismas erfolgt manuell.

In **Abb. 6-2** ist für einen (nicht repräsentativen) Tag der Verlauf wichtiger Betriebsparameter angegeben. Der relativ häufige Brennereinsatz hängt wahrscheinlich mit stark schwankenden Mülleigenschaften (z.B. Feuchte) und damit verbundenen abrupten Leistungsabfällen zusammen. In der zweiten Tageshälfte treten diese Probleme nicht mehr auf.

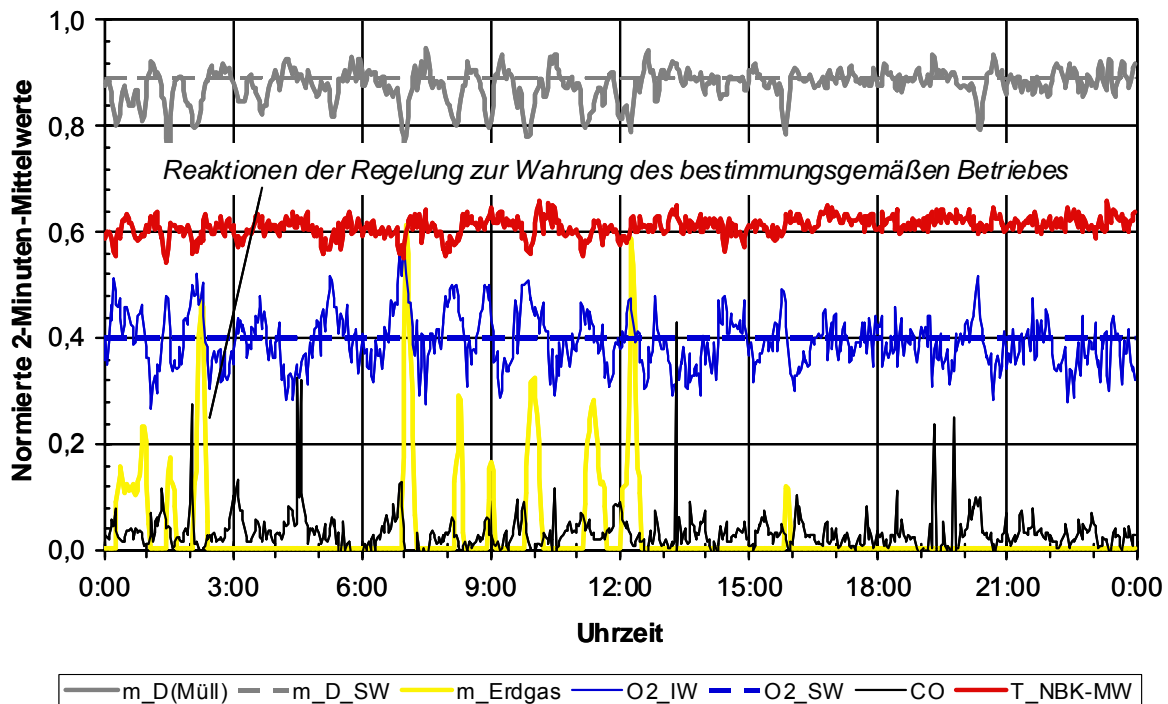


Abb. 6-2: Zeitlicher Verlauf wichtiger Betriebsgrößen an Kessel MK-E, MHKW Mannheim

TBA Arnoldstein

In Arnoldstein im österreichischen Bundesland Kärnten ist seit 2004 eine Müllverbrennungsanlage auf Basis eines Rückschubrostes der Fa. MARTIN in Betrieb. Der Mülldurchsatz liegt bei 10,5 t/h, wobei 35,4 t/h Dampf mit den Parametern 39 bar / 397 °C erzeugt werden, die der Stromproduktion und als Prozessdampf dienen. Der zweibahnige Rost ist in 5 Primärluftzonen eingeteilt, wobei Zone 5 normalerweise nicht belüftet wird und in Zone 3 die Hauptverbrennung stattfinden soll. Die Abgasführung entspricht einer Mittelstromfeuerung.

Die Technologie dieses Rückschubrostes unterscheidet sich wesentlich von der üblicher Müllverbrennungsanlagen durch die Sauerstoffanreicherung der Primärluft (SYNCOM®-Verfahren) in den Hauptverbrennungszonen (Zonen 2 und 3). Diese erlaubt eine Intensivierung der Verbrennung, eine Erhöhung der Brennbetttemperatur und eine zusätzliche Beeinflussung der Feuerlage. Zur Vermeidung von CO-Emissionen kann ein Teil des Sauerstoffs aus der Primärluft in die Abgasrezirkulation umgeleitet werden. Wesentlicher Teil des Regelungskonzepts stellt die Brennbett-Temperaturmessung mit einer Infrarot-Kamera dar. Der angelieferte Müll ist fast frei von Gewerbeabfällen und von relativ gleichbleibender Qualität.

Die Feuerungsleistung wird ausschließlich über die Rost- und Aufgabeschieberantriebe geregelt, die entsprechend des Leistungsverlaufs gemeinsam ein- bzw. ausgeschaltet werden. Um die wärmekapazitätsbedingte Trägheit des Dampfkessels zu umgehen, wird zur Dampfmenge-regelung ein schnelles Signal der Abgastemperatur verwendet (Strahlungspyrometer im 2. Zug). In untergeordneten Regelkreisen werden die Hublänge und die Geschwindigkeit der Beschickkolben über die Laufzeit der Beschickung und die Lage der Hauptbrennzonen angepasst. Eine ausreichende Müllmenge in den Verbrennungszonen wird über die Geschwindigkeit der Rostantriebe sichergestellt.

Die Primärluftmenge wird durch die Abgas-O₂-Konzentration am Kesselende geregelt. Die Grundeinstellung der Primärluftverteilung auf die 4 belüfteten Zonen wird über eine Information der IR-Kamera zur Lage der Hauptbrennzone angepasst. Bei einer zu hohen Wärmeauskopplung in Zone 2 (Information IR-Kamera) wird dort die Primärluftmenge gedrosselt und in die Ausbrennzone verschoben.

Die O₂-Konzentration der sauerstoffangereicherten Primärluft in den Zonen 2 und 3 wird im Wesentlichen manuell vorgegeben und über die gemessene Brennbetttemperatur in engen Grenzen korrigiert.

Die in **Abb. 6-3** dargestellten zeitlichen Verläufe von Betriebsparametern stammen aus einer Zeit, als die O₂-Eindüsung in die Abgasrezirkulation zur Vermeidung von CO-Spitzen noch nicht installiert war. Daher zeigen die Graphen für Abgas-O₂ und CO relativ starke Schwankungen. Die Temperaturkurve ist dagegen sehr gleichförmig, was auf die in Arnoldstein angewendete Regelung der Feuerungsleistung nach einem Temperatursignal zurückgeführt wird.

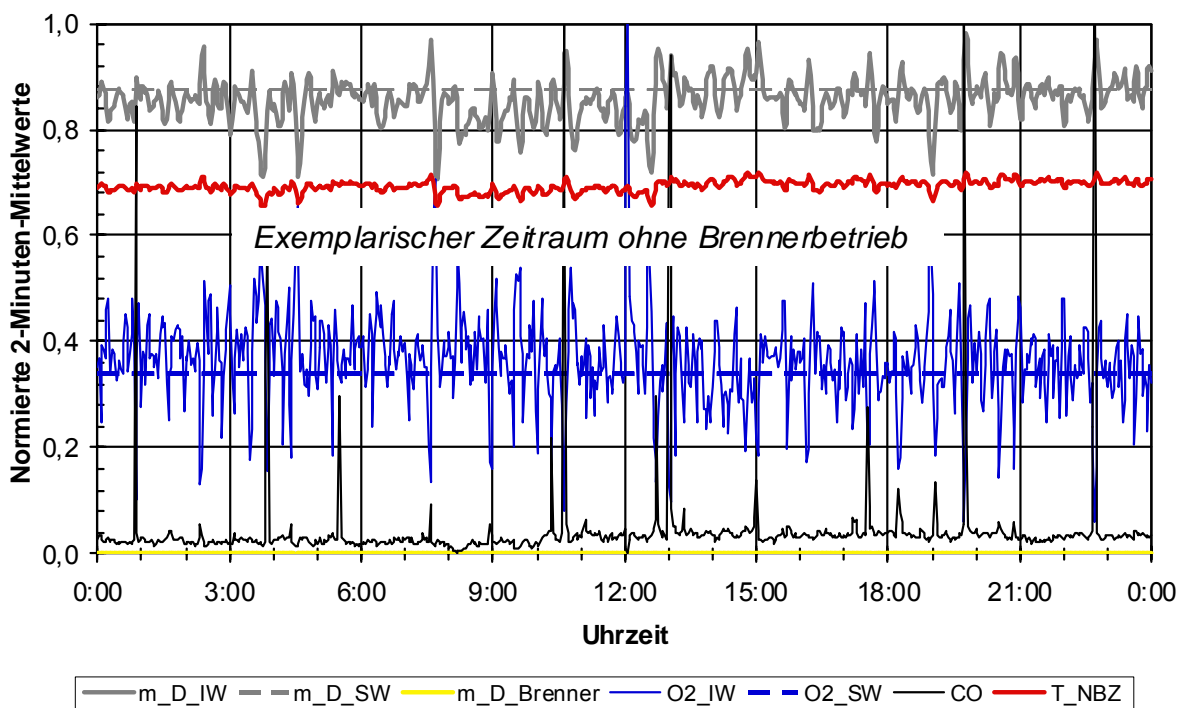


Abb. 6-3: Zeitlicher Verlauf wichtiger Betriebsgrößen am Kessel der TBA Arnoldstein

Vergleichende Darstellung der Regelungskonzepte

Einen zusammenfassenden, stark vereinfachten Überblick über die spezifischen Lösungen von Regelungskreisen der untersuchten Müllverbrennungsanlagen zeigt **Tab. 6-2**. Insbesondere sind bauartbedingte Unterschiede bei der Regelung der (kurzfristigen) Dampfleistung (Dampfmengenkonstanz) auffällig, die bei Schubrosten (Mannheim, Arnoldstein) mehr oder weniger durch Schürung und/oder Primärluftzugabe und bei Walzenrosten (Oberhausen) wegen fehlender Schürmöglichkeit nur durch die Primärluftmenge gesteuert wird. Die mit O₂-Anreicherung der Primärluft und IR-Kamerainformationen erweiterten Möglichkeiten der TBA

Arnoldstein werden zur gezielten Betttemperaturbeeinflussung und CO-Vermeidungsstrategien genutzt.

Tab. 6-2: Anlagenspezifische Lösungen von Regelungskreisen

Regelungsgröße	Stellgrößen		
	GMVA Oberhausen, Linie 1	MHKW Nord, Mannheim, MK-E	TBA Arnoldstein
Dampfleistung (kurzfristig)	Primärluft-Vordruck (Gesamtmenge)	PL-Menge Rost-Kippbewegung	Rost- und Aufgabeschieber (ein/aus)
Feuerlage	Walzendrehzahl	Rostvorschub	Primärluftverteilung
Brennbett-Temperatur			O ₂ -Konzentration PL
CO-Minderung	Reduktion Dampfleistung		Verschiebung von O ₂ aus PL in Rezi
Erhöhung Feuerraumtemp.		Reduktion Sekundärluft	

Aus dieser Untersuchung der Großanlagen wurde ein PID-Regelungskonzept für die Technikumsanlage erstellt. Als wichtigste Regelgröße ist die Leistung anzusehen. Langfristig wird diese über die aufgegebene Brennstoffmenge geregelt. Kurz bis mittelfristig erfolgt die Leistungsregelung über die Primärluft in der Hauptbrennzone.

Nach mehreren Versuchswochen wurde deutlich, dass dieses Konzept ergänzt werden muss. Da der Brennstoff eine relativ lange Zeit auf dem Rost zum Trocknen benötigt, wurde die Brennbethöhe in den ersten Zonen als Regelgröße hinzugefügt, um den Brennstoffvorrat auf dem Rost möglichst konstant zu halten. Zusätzlich wurde die kurzfristige Leistungsregelung durch die Rostbewegung ergänzt.

Zur Regelung des O₂-Gehaltes im Abgas dient die Sekundärluftmenge. Eine Regelung des Brenners ist nicht vorgesehen, da dieser eine zu geringe Leistung hat.

Das Hauptanliegen der Feuerungsregelung liegt darin, den Brennstoffumsatz auf dem Rost konstant zu halten. Gelingt dies, befinden sich auch die meisten anderen Parameter wie z.B. O₂ und CO im gewünschten Bereich.

7 PID-Regelung

7.1 Regelungskonzept

7.1.1 Beschickungsregelung

Um die thermische Leistung konstant halten zu können, muss die geförderte Brennstoffmenge mittel- bis langfristig so angepasst werden, dass diese die gewünschte Wärmeleistung erbringt. Dies erfolgt durch einen relativ trägen I-Regler. Zusätzlich wird der Messwert der Brennbetthöhe genutzt, um einen Vorrat an getrocknetem aber unverbranntem Müll auf dem Rost vorzuhalten, der für eine kurzfristige Leistungsregelung genutzt werden kann.

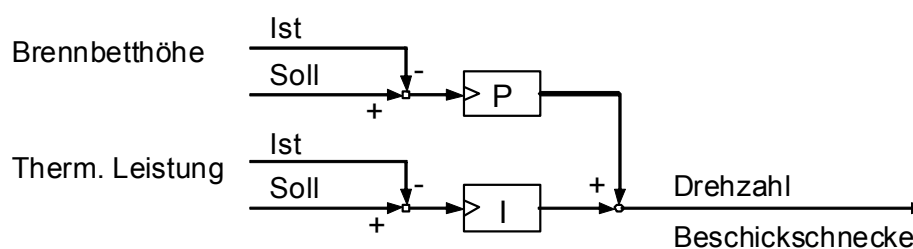


Abb. 7.1.1-1: Blockschaltbild Beschickungsregelung

7.1.2 Regelung Rostantriebe

Zur kurzfristigen Leistungsregelung wird die Rostbewegung genutzt. Das Leistungssignal hat sich aufgrund der großen Totzeit (>1min) der Messung als unbrauchbar erwiesen. Stattdessen wird eine schnelle Temperaturmessung (IR-Strahlungspyrometer) als Ersatzsignal verwendet. Wenn die gemessene Temperatur den Sollwert unterschreitet, werden die Rostantriebe aktiviert. Wird die Solltemperatur wieder überschritten, führen die Roststäbe den Doppelhub noch komplett zu Ende. Der Sollwert der Temperatur wird langfristig über eine Regelabweichung der thermischen Leistung angepasst.

7.1.3 Luftmengen und -verteilung

Die Primärluftverteilung wird an die aktuelle Feuerlage angepasst. Hierzu wird eine prozentuale Verteilung der Primärluft auf die Rostzonen und zusätzlich die Lage der Hauptbrennzone vorgegeben. Die Erfassung der Hauptbrennzone erfolgt wahlweise über Thermoelemente, die im Feuerraum über dem Brennbett eingebaut sind, oder über eine Infrarotkamera.

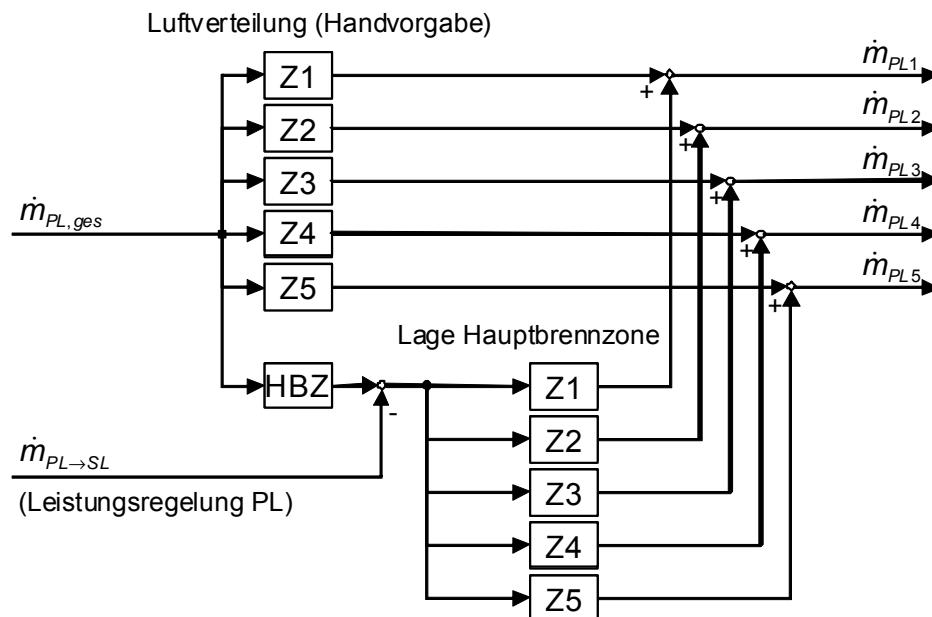


Abb. 7.1.3-1: Blockschaltbild Primärluftverteilung

Zur kurz- bis mittelfristigen Leistungsregelung wird zusätzlich zu den Roststäben die Menge der Primärluft in der Hauptbrennzone genutzt. Durch eine geringere Primärluftmenge wird gezielt der Brennstoffumsatz und damit die Wärmeleistung verringert. Die zugeführte Gesamtluftmenge wird konstant gehalten, indem die fehlende Luftmenge der Sekundärluft zugefügt wird.

7.2 Versuchsergebnisse

In **Abb. 7.2-1** ist das Ergebnis der kurzfristigen Leistungsregelung dargestellt. Durch das Ein- und Ausschalten der Rostantriebe gelingt es, die Leistung weitestgehend konstant zu halten. Dies funktioniert jedoch nur solange, wie ein hinreichender zündfähiger Brennstoffvorrat auf dem Rost vorhanden ist, da die Rostbewegung nur eine Durchmischung des Brennstoffes bewirkt und kurzzeitig den Umsatz steigert. Aufgrund einer maximalen Stillstandsdauer der Roststäbe darf sich auch nicht zu viel Brennstoff auf dem Rost befinden, da sonst eine deutliche Spitze beim Brennstoffumsatz entsteht. In der Regel gilt: Je länger der Rost steht, desto deutlicher fällt der Anstieg der Leistung aus, wenn der Rost wieder anfährt.

Die Anpassung der Solltemperatur zur Regelung der Roststäbe ist noch optimierungsfähig, da nach längerer Abweichung der Leistung vom Sollwert die Solltemperatur des Abgases deutlich verändert wird. Dies kann zu unerwünschten Schwankungen der Leistung führen.

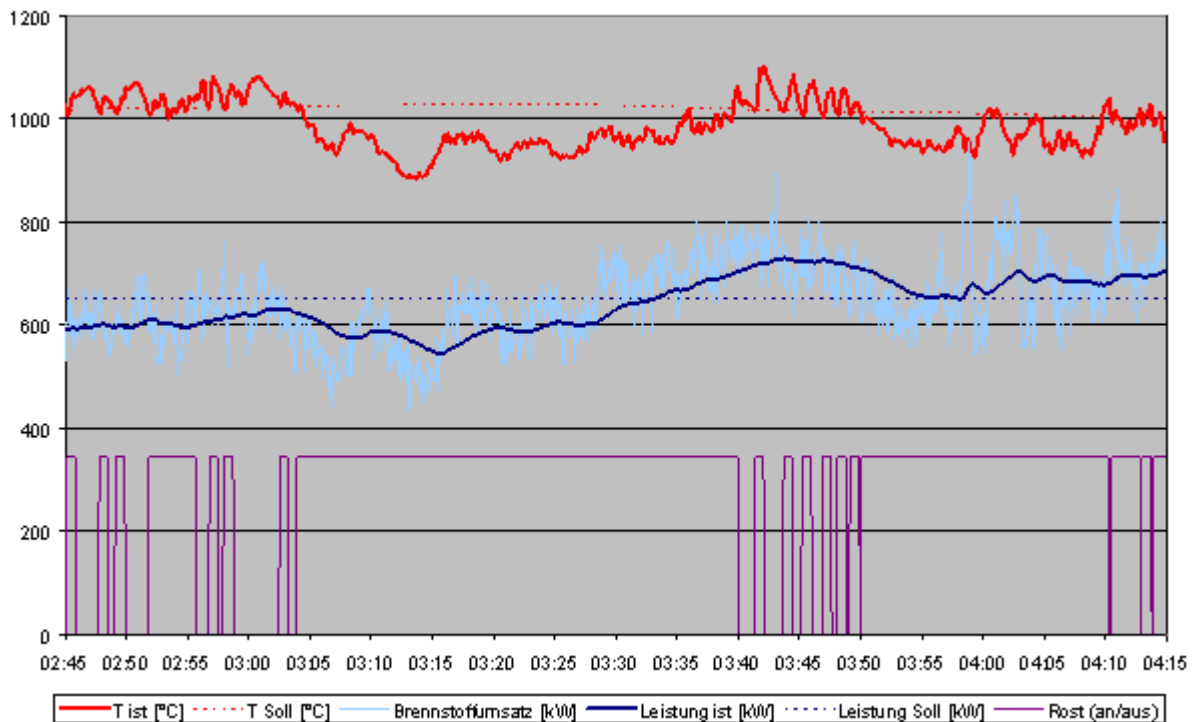


Abb. 7.2-1: Kurzfristige Leistungsregelung durch die Roststäbe

In einer Versuchswoche zum PID-Regler wurden zwei Reglereinstellungen mit dem bisher üblichen Handbetrieb verglichen. Die Ergebnisse sind in **Abb. 7.2-2** als Histogramm dargestellt. Die Schwankungen des bisher üblichen Handbetriebes der Anlage sind wie zu erwarten groß (gelb, alte Versuchskampagne im Vergleich dazu in rot). Die Leistung kann durch Aktivierung der Regelung von Rost und Beschickung wesentlich vergleichmäßigt werden (hellblau). Eine zusätzliche Regelung der Luftverteilung bringt eine weitere Verbesserung bei Leistungsspitzen, da hier der Brennstoffumsatz durch eine kleinere Primärluftmenge in der Hauptbrennzone verringert wird.

Durchgeführt wurden diese Untersuchungen bei „normaler“ Müllqualität, d.h. der eingesetzte Brennstoff weist mäßige Schwankungen auf. Zusätzlich wurde ein Test durchgeführt, um das Verhalten bei sehr heizwertarmem Brennstoff zu untersuchen. Hierbei wurde bei normalem Betrieb die heizwertarme Fraktion in die Beschickung gegeben (s. **Abb. 7.2-3**). Dies führte zunächst zu einem deutlichen Einbruch der Leistung (rot) und einem mäßigen Anstieg des Brennbettes (gelb). Letztendlich führte die extrem verminderte Leistung zu einer sehr deutlich erhöhten Drehzahl der Beschickschnecke (blau). Das Brennbett wurde komplett mit nassem Müll überschüttet. Da in dieser Situation keine weitere sinnvolle Reaktion des Reglers zu erwarten war, wurde der Test abgebrochen und die Anlage von Hand stabilisiert.

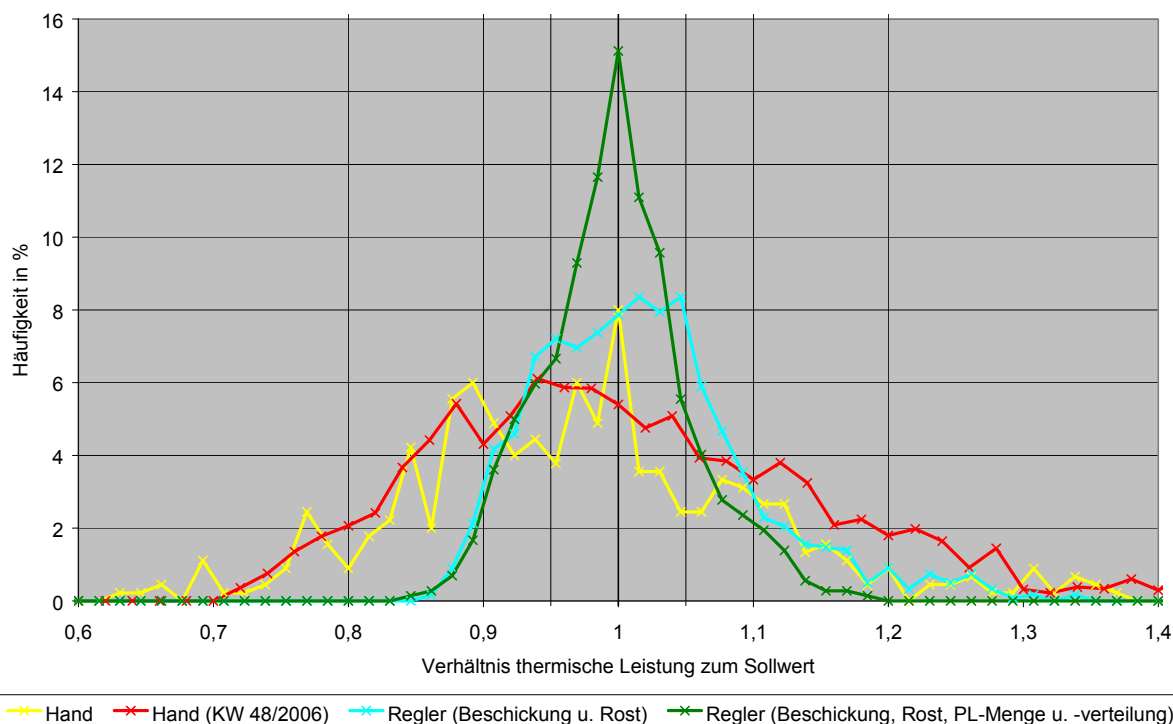


Abb. 7.2-2: Histogramm der thermischen Leistung für verschiedene Reglereinstellungen

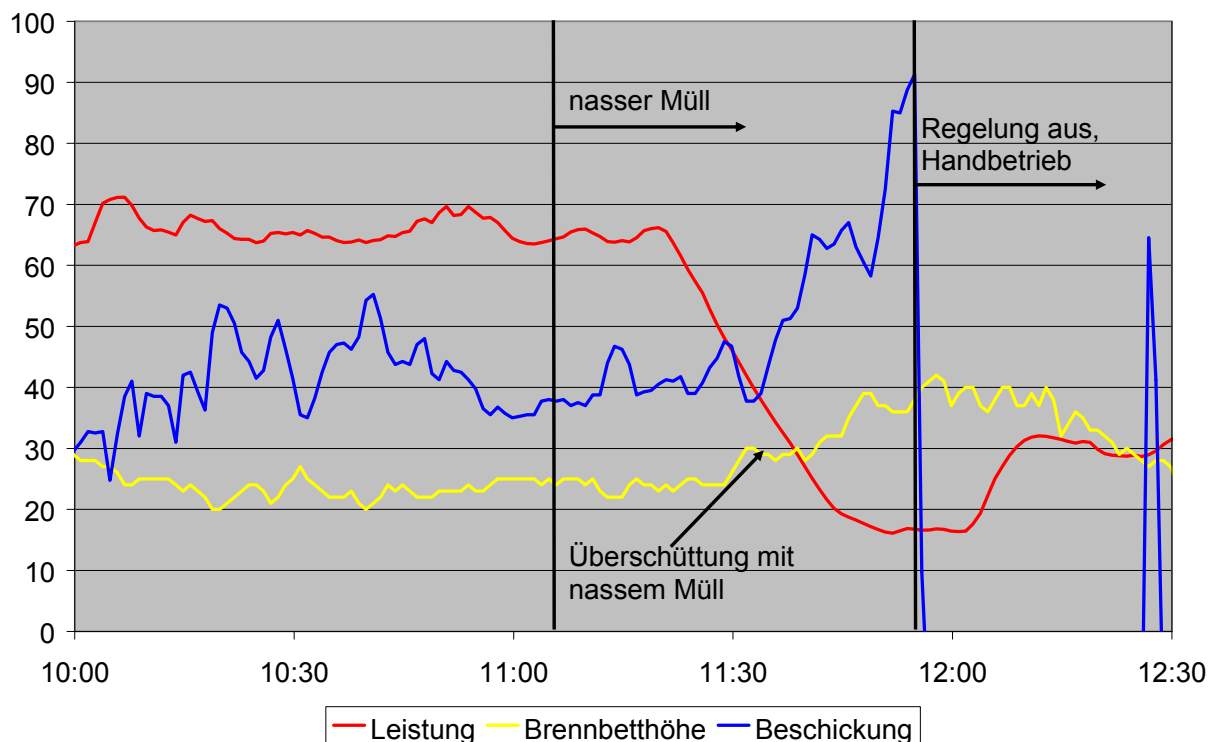


Abb. 7.2-3: Verhalten des PID-Reglers bei Beschickung von sehr heizwertarmem Brennstoff

8 Fuzzy-Regelung

8.1 Berechnung Brennstoffumsatz

Zur Berechnung des momentanen Brennstoffumsatzes auf dem Rost werden möglichst verzögerungsfreie Messwerte benötigt. Da die Abgasanalyse mit einer Totzeit von etwa einer Minute behaftet ist, eignet sich dieses Signal nicht zur Berechnung des momentanen Brennstoffumsatzes bzw. Regelung des Rostes. Die Temperaturmessung am Ende des 1. Zuges liefert einen verzögerungsfreien Messwert.

Zur Berechnung der Abgasenthalpie werden zusätzlich der Abgasmassenstrom und die Wärmekapazität benötigt. Letztere wird als konstant angenommen. Der Abgasmassenstrom wird aus der zugeführten Luftmenge sowie einer Menge an Falschluff und umgesetztem Brennstoff geschätzt. Zum Ausgleich der Fehler wird ein Korrekturfaktor K eingeführt:

$$\dot{Q} = K \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \dot{m}_{\text{Rauchgas}}$$

Dieser dient dazu, den berechneten Brennstoffumsatz mittelfristig an die berechnete Leistung (berechnet aus Abgasmenge und O_2 -Anteil im Reingas) anzupassen.

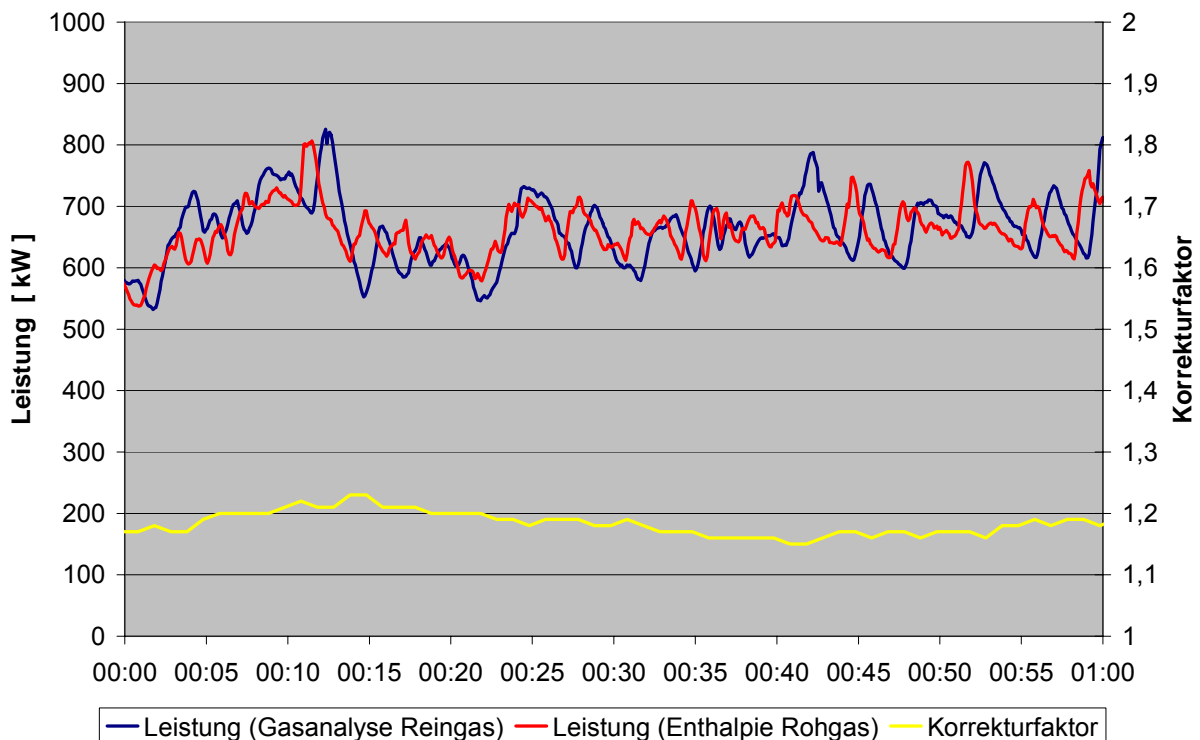


Abb. 8.1-1: Vergleich Leistungsberechnung

In **Abb. 8.1-1** ist der Verlauf der berechneten Leistung für beide Verfahren über eine Stunde dargestellt. Die berechneten Werte sind ähnlich, jedoch um ca. 1 Minute zeitversetzt (Totzeit Gasanalyse, Abgasweg). Der relativ hohe Korrekturfaktor von 1,2 entsteht durch die Verlustwärme im Bereich Rost und 1. Zug sowie ungenaue / zu geringe Annahmen bezüglich Falschluffmenge und Brennstoffumsatz.

8.2 Beschickungsregelung

Die Beschickungsregelung ist in zwei Teile untergliedert. Der erste Teil dient zur Arbeitspunkteinstellung, dessen Ausgang auf einen Integrierer geführt wird. Er beinhaltet die ersten vier Regeln („Beschickung langsamer/schneller“).

Die restlichen Regeln dienen dazu, einen möglichst konstanten Brennstoffvorrat auf dem Rost zu halten.

Tab. 8.2-1: Regelbasis Beschickung

Regelbasis Beschickung					
WENN	Leistung niedrig	UND	NICHT Überschüttung	DANN	Beschickung schneller
WENN	Leistung hoch	UND	NICHT Überschüttung	DANN	Beschickung langsamer
WENN	Überschüttung	(Brennbett hoch UND Temperatur Zone1 niedrig)		DANN	Beschickung etwas langsamer
WENN	nasser Brennstoff	(Temperatur Zone1 niedrig)		DANN	Beschickung gleich schnell
WENN	Brennbett hoch			DANN	Beschickung langsam
WENN	Brennbett niedrig			DANN	Beschickung schnell
WENN	Überschüttung	(Brennbett hoch UND Temperatur Zone1 niedrig)		DANN	Beschickung langsam/aus
WENN	Roststillstand			DANN	Beschickung langsam

8.3 Regelung Rost

Die Regelung des Rostes ist in die Bereiche Rost an/aus und Rostgeschwindigkeit aufgeteilt. Der erste dient zur kurzfristigen Leistungsregelung und benötigt hierfür ein Signal des momentanen Brennstoffumsatzes. Bei der Vorgehensweise, die Rostantriebe ein- bzw. auszuschalten, handelt es sich um einen Zweipunktregler, auch wenn sich die Vorgehensweise als Fuzzy-Regelbasis darstellen lässt.

Um bei nassem Brennstoff trotzdem einen zufriedenstellenden Ausbrand zu erreichen, wird die Rostgeschwindigkeit verringert, sobald sich die Feuerlage an das Rostende bewegt. Die Feuerlage wird aus den Temperaturen des Brennbettes bzw. der Gasphase darüber berechnet. Es werden hierbei mehrere Messwerte über die Rostlänge benötigt. Eine Unterscheidung zwischen „Feuerlage normal“ und „Feuerlage (zu weit) vorne“ ist mit den vorhandenen (historischen) Daten nur schwer möglich und aufgrund des Ergebnisses wenig sinnvoll. Deshalb soll hier darauf verzichtet werden.

Tab. 8.3-1: Regelbasis Rost

Rost			
WENN	Brennstoffumsatz niedrig	DANN	Rost ein
WENN	Brennstoffumsatz hoch	DANN	Rost aus
WENN	Feuerlage normal	DANN	Rost schnell
WENN	Feuerlage hinten	DANN	Rost langsam

8.4 Regelung Luftmengen und Verteilung (vereinfacht)

Die Regelung der Primärluftmenge (PL+SL=konst.) dient zur Unterstützung der Leistungsregelung durch Rost und Beschickung. Ist der Brennstoffvorrat auf dem Rost niedrig, so wird nicht versucht, das Feuer durch eine erhöhte Primärluftmenge anzufachen, sondern in einen „Warmhaltebetrieb“ gewechselt, um ein schnelles Auskühlen der Anlage zu verhindern (Gesamtluftmenge verringert).

Aufgrund des schwankenden Wassergehaltes ergibt sich eine veränderliche Feuerlage. Dies kann nicht allein durch die Veränderung der Rostgeschwindigkeit ausgeglichen werden. Deshalb wird bei einer Feuerlage zum Rostende auch die Primärluftverteilung hieran angepasst, sodass auch in den hinteren Rostzonen ausreichend Luft für die Verbrennung zur Verfügung gestellt wird.

Tab. 8.4-1: Regelbasis Luftmengen und -verteilung

Luftmengen und Verteilung									
WENN	Feuerlage normal	UND	Leistung hoch			DANN	PL-Verteilung normal	PL HBZ* wenig	SL viel
WENN		UND	Leistung normal			DANN		PL HBZ normal	SL normal
WENN		UND	Leistung niedrig	UND	Brennbett normal	DANN		PL HBZ viel	SL wenig
WENN		UND		UND	Brennbett niedrig	DANN		PL HBZ wenig	SL wenig
WENN		UND	Leistung sehr niedrig			DANN		PL HBZ sehr wenig	SL sehr wenig
WENN	Feuerlage hinten	UND	Leistung hoch			DANN	Verteilung	PL HBZ wenig	SL viel
WENN		UND	Leistung normal			DANN		PL HBZ normal	SL normal

* Hauptbrennzzone

WENN		UND	Leistung niedrig	UND	Brennbett normal	DANN		PL HBZ viel	SL wenig
WENN		UND		UND	Brennbett niedrig	DANN		PL HBZ wenig	SL wenig
WENN		UND	Leistung sehr niedrig			DANN		PL HBZ sehr wenig	SL sehr wenig

Die Regelbasis aus **Tab. 8.4-1** beschreibt das Verhalten der Regelung im Wesentlichen, jedoch wird darin nicht die Luftmenge für die jeweiligen Zonen beschrieben. Diese sind in prozentualen Werten und als konkrete Beispiele in **Tab. 8.4-2** dargestellt.

		Leistung									
		sehr niedrig <50% soll		niedrig 70..80% soll				normal 95..105% soll		hoch >120% soll	
Feuerlage	normal	Brennbett normal		Brennbett niedrig							
		Gesamt 65,0% 799 kg/h		Gesamt 100,0% 1229 kg/h		Gesamt 85,0% 1044 kg/h		Gesamt 100,0% 1229 kg/h		Gesamt 100,0% 1229 kg/h	
		PL	67,5% 553 kg/h	PL	105,0% 860 kg/h	PL	85,0% 696 kg/h	PL	100,0% 819 kg/h	PL	90,0% 737 kg/h
		SL	60,0% 246 kg/h	SL	90,0% 369 kg/h	SL	85,0% 348 kg/h	SL	100,0% 410 kg/h	SL	120,0% 491 kg/h
		PL 1	20,0% 164 kg/h	PL 1	25,0% 205 kg/h	PL 1	20,0% 164 kg/h	PL 1	25,0% 205 kg/h	PL 1	25,0% 205 kg/h
		PL 2	20,0% 164 kg/h	PL 2	30,0% 246 kg/h	PL 2	25,0% 205 kg/h	PL 2	30,0% 246 kg/h	PL 2	25,0% 205 kg/h
		PL 3	20,0% 164 kg/h	PL 3	40,0% 328 kg/h	PL 3	30,0% 246 kg/h	PL 3	35,0% 287 kg/h	PL 3	30,0% 246 kg/h
		PL 4	7,5% 61 kg/h	PL 4	10,0% 82 kg/h	PL 4	10,0% 82 kg/h	PL 4	10,0% 82 kg/h	PL 4	10,0% 82 kg/h
	PL 5	0,0% 0 kg/h	PL 5	0,0% 0 kg/h	PL 5	0,0% 0 kg/h	PL 5	0,0% 0 kg/h	PL 5	0,0% 0 kg/h	
	hinten	Gesamt 66,7% 819 kg/h		Gesamt 100,0% 1229 kg/h		Gesamt 85,0% 1044 kg/h		Gesamt 100,0% 1229 kg/h		Gesamt 100,0% 1229 kg/h	
PL		70,0% 573 kg/h	PL	105,0% 860 kg/h	PL	85,0% 696 kg/h	PL	100,0% 819 kg/h	PL	90,0% 737 kg/h	
SL		60,0% 246 kg/h	SL	90,0% 369 kg/h	SL	85,0% 348 kg/h	SL	100,0% 410 kg/h	SL	120,0% 491 kg/h	
PL 1		20,0% 164 kg/h	PL 1	20,0% 164 kg/h	PL 1	20,0% 164 kg/h	PL 1	20,0% 164 kg/h	PL 1	20,0% 164 kg/h	
PL 2		20,0% 164 kg/h	PL 2	20,0% 164 kg/h	PL 2	20,0% 164 kg/h	PL 2	20,0% 164 kg/h	PL 2	20,0% 164 kg/h	
PL 3		10,0% 82 kg/h	PL 3	25,0% 205 kg/h	PL 3	20,0% 164 kg/h	PL 3	25,0% 205 kg/h	PL 3	20,0% 164 kg/h	
PL 4		10,0% 82 kg/h	PL 4	25,0% 205 kg/h	PL 4	15,0% 123 kg/h	PL 4	20,0% 164 kg/h	PL 4	15,0% 123 kg/h	
PL 5		10,0% 82 kg/h	PL 5	15,0% 123 kg/h	PL 5	10,0% 82 kg/h	PL 5	15,0% 123 kg/h	PL 5	15,0% 123 kg/h	

Tab. 8.4-2: Luftmengen und -verteilung in Abhängigkeit von Feuerlage und Leistung (Sollleistung 650kW; $\lambda_{PL}=1,0$; $\lambda_{SL}=0,5$)

8.5 Ergebnisse

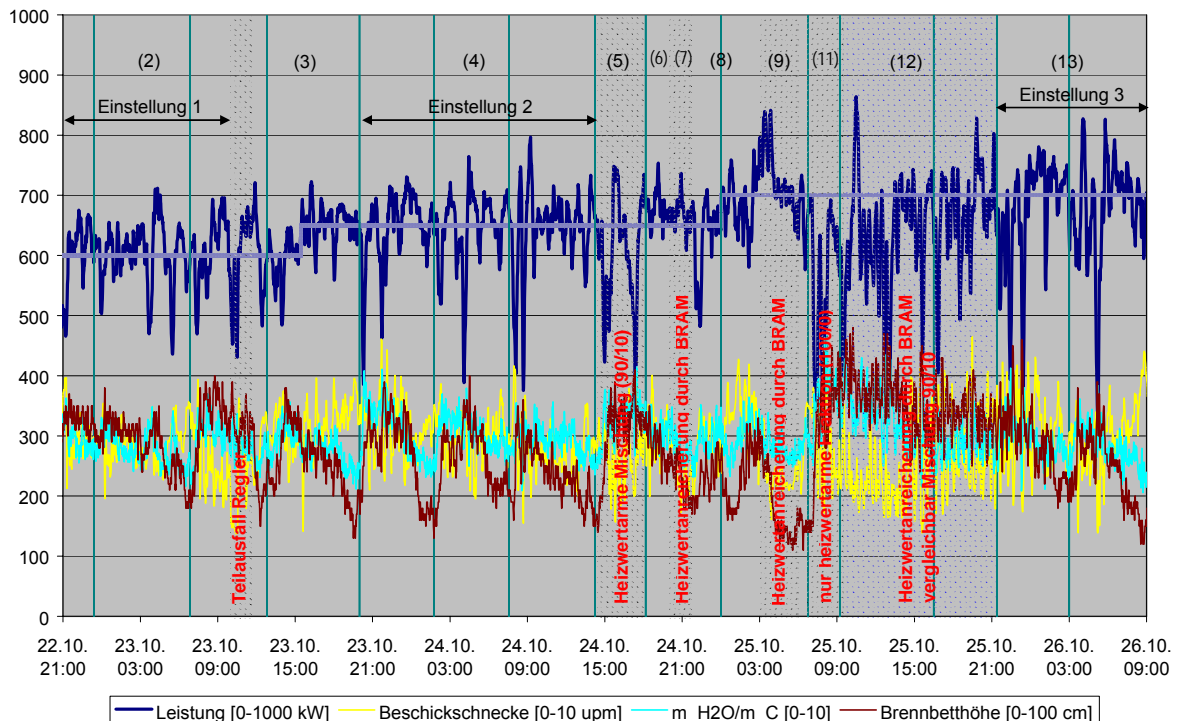


Abb. 8.5-1: Übersicht Versuchsbetrieb KW43/2007

Während des Versuchsbetriebes in KW 43/2007 traten häufig sehr deutliche Leistungseinbrüche auf. Beim früheren Anlagenbetrieb konnte ein solches Verhalten nicht beobachtet werden. Zurückzuführen ist dies wahrscheinlich auf eine schlechte Durchmischung des Brennstoffes bzw. einen hohen Wassergehalt der heizwertreichen Fraktion von bis zu 30%. Dies erzeugte einen ungleichmäßigeren Betrieb der Anlage und stellt die Vergleichbarkeit zu früheren Versuchen in Frage.

In einer weiteren Versuchswoche (KW45/2007) wurde auf eine bessere Vermischung der Brennstoffe bzw. einen etwas höheren Heizwert geachtet. Es traten hierbei nur wenige Leistungseinbrüche auf, die auch in der Ausprägung weniger stark waren.

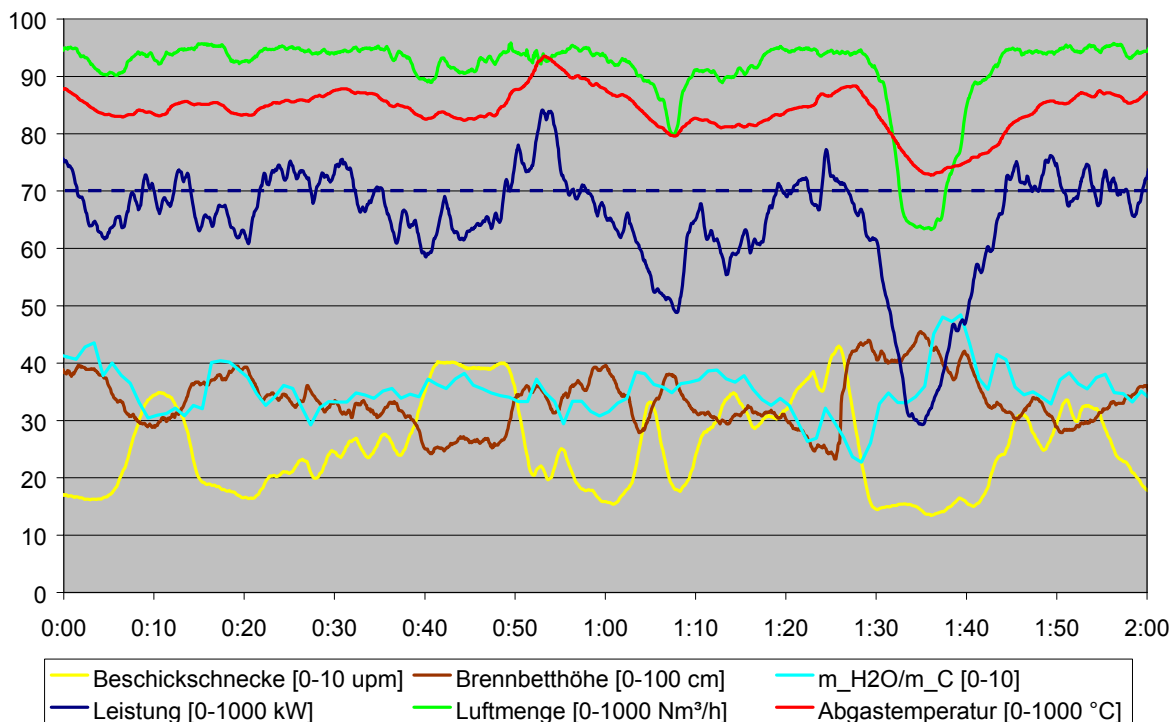


Abb. 8.5-2: Leistungseinbruch durch nassen Brennstoff

In **Abb. 8.5-2** ist ein solcher typischer Leistungseinbruch dargestellt. Die Daten stammen von einer heizwertarmen Mischung (Versuch 5). Zum Zeitpunkt des Leistungseinbruches ist etwas zeitverzögert ein Anstieg des Verhältnisses von Wasser zu Kohlenstoff (berechnet aus CO_2) im Abgas zu beobachten. Dies lässt auf einen kurzfristig erhöhten Wassergehalt des Brennstoffes schließen. Durch den zu geringen Brennstoffumsatz sinkt die Abgastemperatur deutlich ab. Um diesen Effekt zu verringern, wird durch die Regelung die Gesamtluftmenge gedrosselt, um ein zu schnelles Auskühlen der Anlage zu verhindern.

Das Übergangsverhalten beim Einsatz verschiedener Brennstoffmischungen ist in **Abb. 8.5-3** dargestellt. Hier wird zunächst eine normale Brennstoffmischung eingesetzt (8). Danach wird der Heizwert zunächst durch Zugabe von heizwertreichen BRAM-Pellets erhöht (9). Anschließend wird er in zwei Schritten auf ein sehr niedriges Niveau abgesenkt. Hierbei wird zunächst die Zudosierung von Pellets gestoppt (10) und im Anschluss nur die heizwertarme Fraktion des Brennstoffes in die Beschickung gegeben (11). Nach der Zugabe der heizwertreichen Pellets (9) ist ein deutlicher Leistungsanstieg zu sehen. Die Regelung nimmt daraufhin die Drehzahl der Beschickschnecke deutlich zurück. Nach ca. einer Stunde hat sich ein näherungsweise stationärer Zustand eingestellt.

Durch den Wegfall der Pelletbeschickung (10) fällt der Heizwert des Brennstoffes deutlich. Dies wird durch eine Erhöhung der Brennstoffzufuhr ausgeglichen. Bei weiterer Reduzierung des Heizwertes (nur heizwertarme Fraktion, Versuch 11) treten zeitweise unerwünschte Betriebszustände auf (Überschüttung, CO , $T_{\text{Abgas}} < T_{\text{MIN}}$, ...). Der Regler kann den Anlagenbetrieb nicht ohne Zusatzbrennstoff (Öl/Erdgas) in einem akzeptablen Punkt halten, verhindert aber ein komplettes Erlöschen des Feuers durch Überschüttung mit nassem Müll.

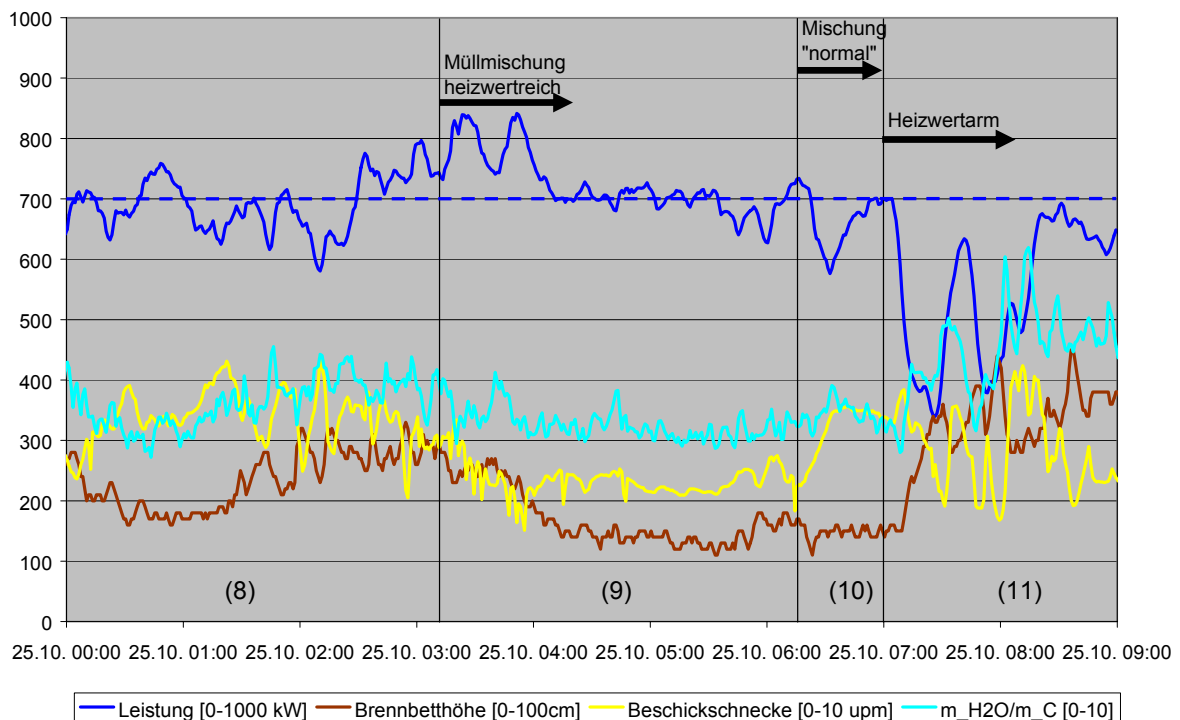


Abb. 8.5-3: Übergangverhalten durch verschiedene Brennstoffmischungen

Der normale Betrieb der Anlage mit Fuzzy-Regelung soll hier anhand der vierten Versuchseinstellung dargestellt werden (s. **Abb. 8.5-4**). Auffällig sind hierbei die relativ häufigen und deutlichen Leistungseinbrüche. Aufgrund der schlechteren Brennstoffqualität ist eine Vergleichbarkeit zu früheren Versuchswochen in Frage zu stellen. Ein Vergleich der Leistungskurven wird dennoch in einem Histogramm ausgeführt (s. **Abb. 8.5-6** rote Kurve).

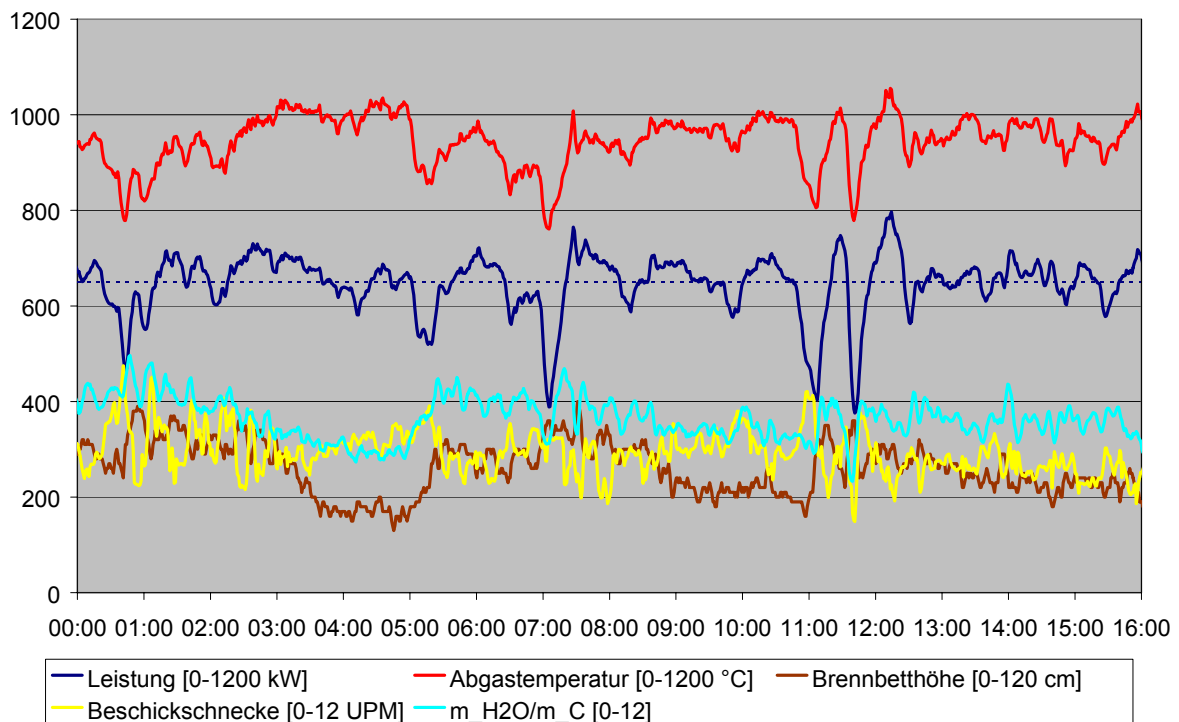


Abb. 8.5-4: Diagramm Versuchseinstellung 4

Bei Beachtung einer guten Brennstoffdurchmischung ergibt sich ein sehr gleichmäßiger Verlauf der Leistung. In **Abb. 8.5-5** ist ein Ausschnitt aus der Versuchswoche KW45/2007 dargestellt. Hierbei war die Fuzzy-Regelung für Beschickung und Rost aktiviert. Über zwölf Stunden kann die Leistung sehr konstant gehalten werden. Durch Veränderung der Brennstoffmischung mit einem erhöhten Wassergehalt tritt jedoch auch hier kurzzeitig ein deutlicher Leistungseinbruch auf.

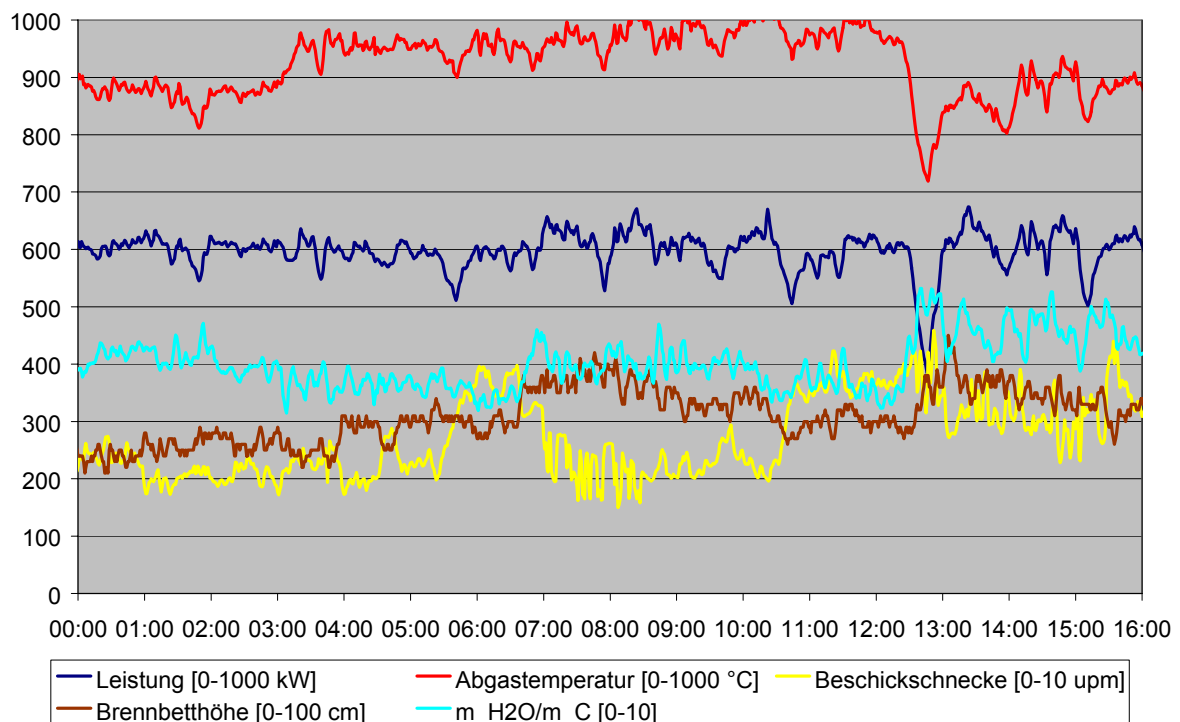


Abb. 8.5-5: Fuzzy-Regelung (Gleichmäßiger Brennstoff)

In derselben Versuchswoche wurde auch eine Einstellung zum PID-Regler gefahren (gelbe Kurve in **Abb. 8.5-6**). Hierbei waren wie beim Fuzzy-Regler nur die Regelkreise für Rost und Beschickung aktiviert. Es wurden hierbei ähnliche Ergebnisse wie in der Versuchswoche zum PID-Regler in der KW22/2007 erzielt (hellblaue Kurve). Zusätzlich wird noch der Handbetrieb (grüne Kurve) aus historischen Daten dargestellt.

Die Auffälligkeiten bei der Fuzzy-Regelung (blaue Kurve) liegen darin, dass das Häufigkeitsmaximum etwa 1-2% über dem Sollwert liegt und dass es im Vergleich zum PID-Regler etwas erhöht ist. Das verschobene Häufigkeitsmaximum ist durch die Aktivierung der Roststäbe bei Unterschreitung der Sollleistung zu erklären. Überschreitet die Leistung den Sollwert, werden die Roststäbe jedoch nicht sofort abgeschaltet, sondern fahren in die untere Umkehrposition zurück. Im Gegensatz zum PID-Regler, der automatisch den Sollwert für den Regelkreis zum An- und Abschalten der Roststäbe berechnet, wurde beim Fuzzy-Regler ein Festwert vorgegeben. Durch einen etwas niedriger gewählten Sollwert für den Fuzzy-Regler ließe sich diese Verschiebung des Häufigkeitsmaximums im Mittel beheben.

Eine an die Situation / an den Brennstoff angepasste Reaktion der Beschickung verbessert die Regelgüte im Vergleich zum PID-Regler leicht. Beim PID-Regler wurde die Reglerverstärkung als ein Kompromiss aus schneller Reaktion und Robustheit bei schlechter Brennstoffqualität ausgewählt. Dieser Kompromiss ist bei der Fuzzy-Regelung nicht erforderlich.

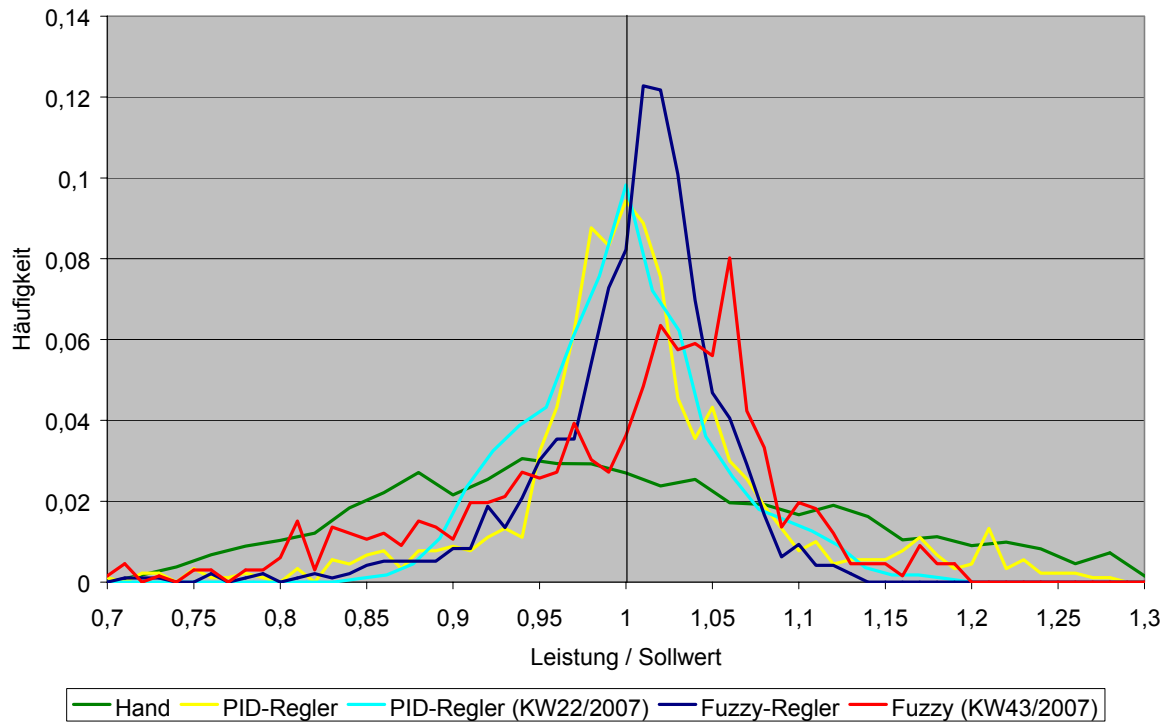


Abb. 8.5-6: Histogramm Leistung

9 Adaptive Regelung

9.1 Erweiterung der PID-Regelung

Der PID-Regler zeigte bei mäßigen Heizwertschwankungen bereits gute Ergebnisse. Problematisch waren jedoch Extremsituationen, bei denen ein Handeingriff notwendig war. Hierzu zählte insbesondere heizwertarmer/nasser Brennstoff. Dieser führte zu einem Erlöschen des Feuers, da das komplette Brennbett mit nassem Müll überschüttet wurde.

Der PID-Regler ist für einen bestimmten Arbeitspunkt konzipiert und hat bei starken und insbesondere nichtlinearen Abweichungen eine deutlich eingeschränkte Funktionalität. Um diese zu verbessern, können die Reglerparameter an den jeweiligen Arbeitspunkt der Anlage bzw. den eingesetzten Brennstoff angepasst werden. Hierzu wurden drei unterschiedliche Parametersätze für die bestehende Beschickungsregelung erstellt, um den Betrieb der Anlage auch unter schwierigen Umständen aufrecht zu erhalten. Dieses beinhaltet vor allem eine Vermeidung der Überschüttung des Brennbettes mit nassem Müll. Es wird bei der Erkennung des Brennstoffes grob in drei verschiedene Kategorien unterschieden:

1. Heizwertreicher Brennstoff:

Dieser Brennstoff führt beim PID-Regler zu einer sehr stark ausgeprägten Leistungsspitze. Da die Reglerparameter (zur Leistungsregelung) ein Kompromiss aus Schnelligkeit und Robustheit gegenüber Heizwertschwankungen sind, wird hier ein großer Teil der Reaktionsgeschwindigkeit eingebüßt. Der Brennstoff ist relativ trocken und wird bereits in den vorderen Rostzonen umgesetzt, sodass die Reglerparameter zur Leistungsregelung P- und I-Anteil deutlich verstärkt werden können. Heizwertreicher Brennstoff führt weiterhin zu einer Abnahme der Brennbethöhe in den vorderen Rostzonen. Da kein Brennstoffvorrat auf dem Rost von Nöten ist, kann die Brennstoffbeschickung direkt zur Leistungsregelung eingesetzt werden. Der Anteil der Brennbethöhe kann komplett entfallen. Eine deutliche Leistungsspitze kann auch mit diesem Regler nicht vermieden werden,

2. Brennstoff mit mittlerem Heizwert:

Die Parameter des PID-Reglers zeigten gute Ergebnisse und werden in leicht veränderter Form übernommen.

3. Heizwertarmer Brennstoff:

Die Trocknungsphase auf dem Rost bei nassem Brennstoff ist deutlich verlängert. Wird nasser Brennstoff auf den Rost gefördert, treten zunächst ein deutlicher Leistungseinbruch und eine Erhöhung der Brennbett-Schichtdicke auf. Der PID-Regler zeigt zunächst nur eine geringe Änderung bei der Beschickung. Nach einiger Zeit überwiegt jedoch der I-Anteil des Leistungsreglers, sodass die Beschickungsgeschwindigkeit deutlich erhöht wird. Dieses muss vermieden werden, sodass der Parametersatz für heizwertarmen Brennstoff weniger zur Leistungsregelung sondern mehr zur Vermeidung einer Überschüttung dient.

Die Fuzzy-Logic zeigte bereits gute Eigenschaften bei der Anpassung an unterschiedliche Brennstoffqualitäten. Sie wird deshalb zur Anpassung der Parameter des PID-Reglers verwendet.

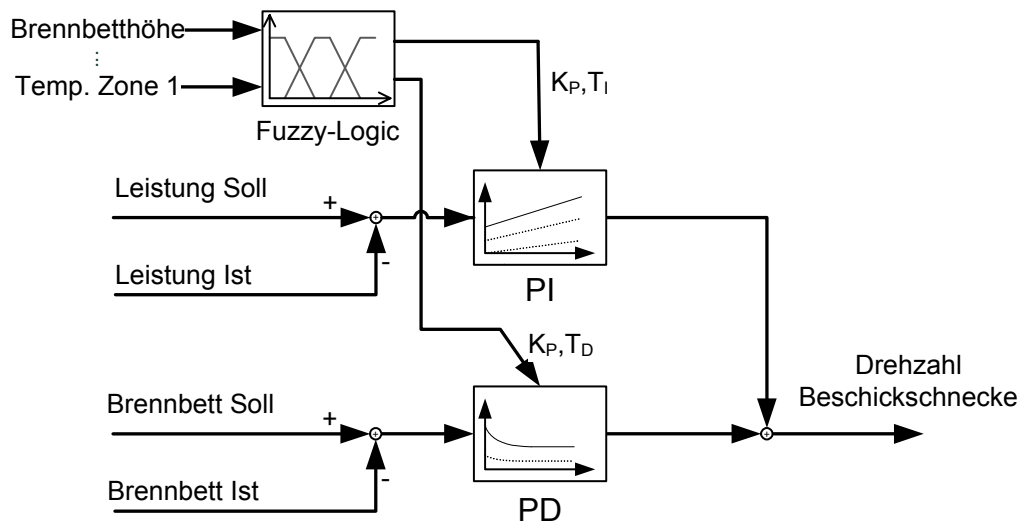


Abb. 9.1-1: Struktur der Beschickungsregelung

Tab. 9.1-1: Regelbasis zur Anpassung der Parameter des PID-Reglers

Regelbasis zur Anpassung der Parameter				
WENN	Temperatur Z1 niedrig		DANN	Parametersatz Heizwertarm
WENN	Temperatur Z1 normal		DANN	Parametersatz Normal
WENN	Temperatur Z1 hoch		DANN	Parametersatz heizwertreich
WENN	Feuerlage hinten		DANN	Parametersatz Heizwertarm
WENN	Feuerlage normal		DANN	Parametersatz Normal
WENN	Feuerlage vorne		DANN	Parametersatz heizwertreich
WENN	Brennbett sehr hoch		DANN	Parametersatz Heizwertarm

9.2 Änderung der Regelung zur Rostfreigabe

Zur Freigabe der Roststäbe wird als Basis das schnelle Enthalpiesignal (Kap. 8.1) genutzt. Da jedoch durch die Nachlaufeigenschaft der Roststäbe beim Fuzzy-Regler eine um einige Prozent erhöhte Leistung erzielt wurde, soll nun die Sollleistung für die Roststäbe angepasst werden. Dies geschieht über die Regelabweichung der Leistung (berechnet aus Abgaszusammensetzung). Die angepasste Sollleistung ist auf den Bereich 95..100% der eigentlichen Sollleistung beschränkt, sodass Effekte wie beim PID-Regler, bei dem die Rostfreigabe nach

Abgastemperatur geschah, nicht auftreten. Nach längerer Leistungsabweichung nach unten wurde der Sollwert der Abgastemperatur derart erhöht, dass eine zu hohe Leistung erzielt wurde.

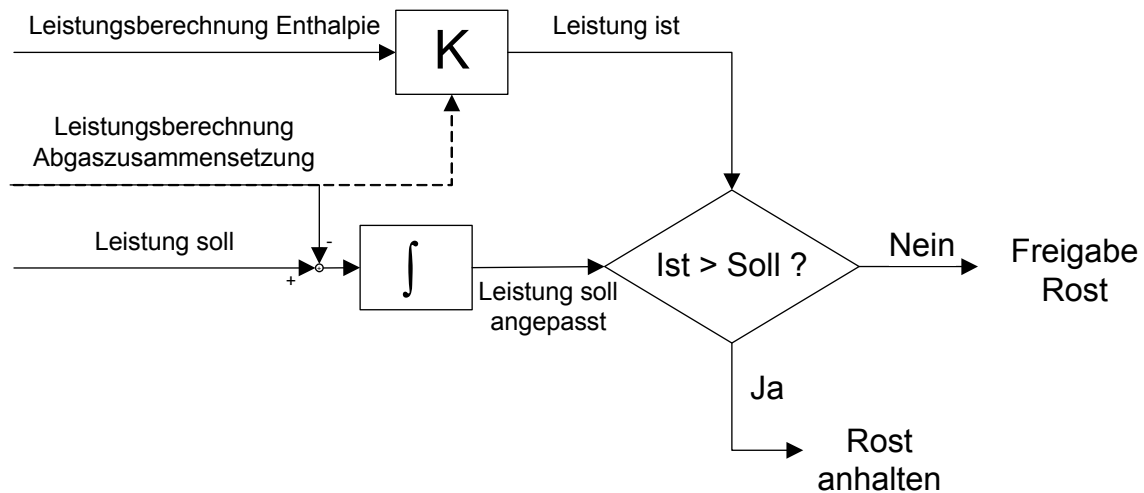


Abb. 9.2-1: Struktur der Regelung Rostfreigabe

9.3 Ergebnisse

Die Bewertung der Ergebnisse des PID-Reglers mit gesteuerter Adaption ist wie bei den anderen Systemen in zwei Bereiche unterteilt. Der normale Betrieb mit mäßigen Heizwertschwankungen soll zunächst betrachtet werden (**s. Abb. 9.3-1**). Die Darstellung der Parameteranpassung des Reglers ist folgendermaßen zu interpretieren: 0: Heizwertarmer Brennstoff; 50: Brennstoff mit mittlerem Heizwert; 100: Heizwertreich.

Während des normalen Betriebes schwankt die Adaption etwa zwischen den Werten 20-80. Dies weist auf deutliche, aber keine extremen Veränderungen der Brennstoffqualität hin.

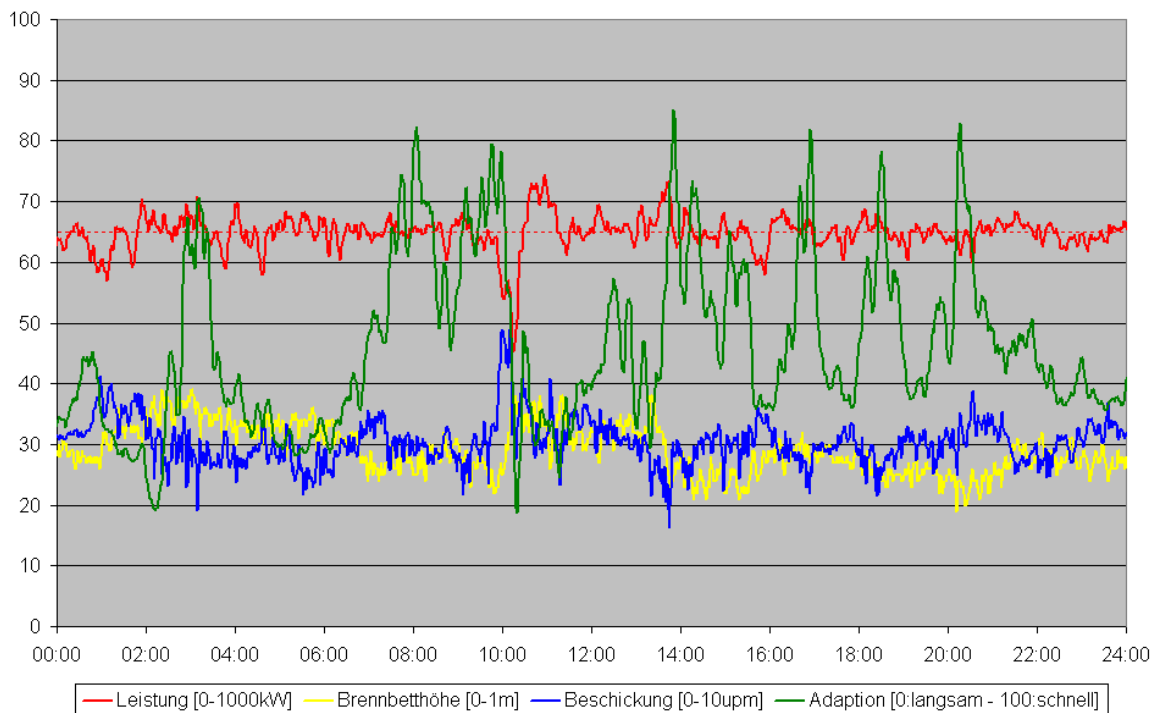


Abb. 9.3-1: Normaler Betrieb des PID-Reglers mit Parameteranpassung

Zur besseren Darstellung und Beurteilung der Leistungsschwankungen wird wieder die Form des Histogramms gewählt. Zusätzlich zum PID-Regler mit Parameteranpassung sind hier die übrigen Regelungssysteme aufgeführt (PID-Regler, Fuzzy-Regler, Handbetrieb).

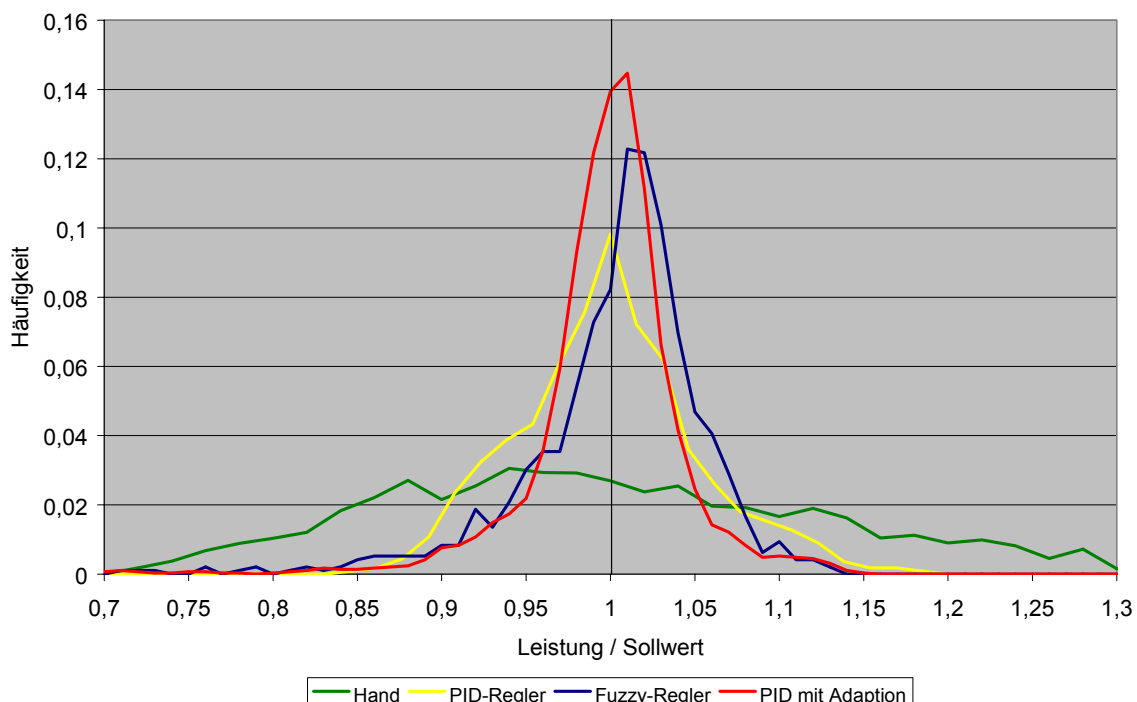


Abb. 9.3-2: Histogramm der thermischen Leistung für verschiedene Regler

Es ist eine deutliche Vergleichmäßigung der Leistung zu sehen. Das Häufigkeitsmaximum der Leistungswerte liegt wesentlich dichter am Sollwert als bei der Fuzzy-Regelung. Die Anpassung des Sollwertes zur Leistungsregelung mit den Roststäben hat ihren Zweck erfüllt. Auffällig ist auch die scheinbare Verbesserung im Vergleich zum reinen PID- bzw. Fuzzy-System. Dieses kann auf die schnellere Regelung bei heizwertreicherem Brennstoff zurückzuführen sein, da hier die Beschickungsgeschwindigkeit deutlich schneller angepasst wird als beim PID-Regler. Zusätzlich wurde das Verhältnis von Wasser zu Kohlenstoff (aus CO_2) im Reingas berechnet und als Histogramm für die drei Reglereinstellungen dargestellt. Dieses Verhältnis soll einen Hinweis auf den Wassergehalt des Brennstoffes geben (Annahme: C:H-Verhältnis im Brennstoff zeitlich konstant). Ein großes Verhältnis dieser beiden Größen deutet auf einen nassen, ein kleines Verhältnis auf einen trockenen Brennstoff hin. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der zum Test des PID-Reglers mit Adaption eingesetzte Brennstoff etwas trockener war als der zum Test von reinem PID- und Fuzzy-Regler. Eine Beurteilung, wie groß der Unterschied der Brennstoffqualität sich auf die Reglerergebnisse auswirkt, ist schwierig und soll hier aufgrund des hohen spekulativen Charakters nicht weiter verfolgt werden.

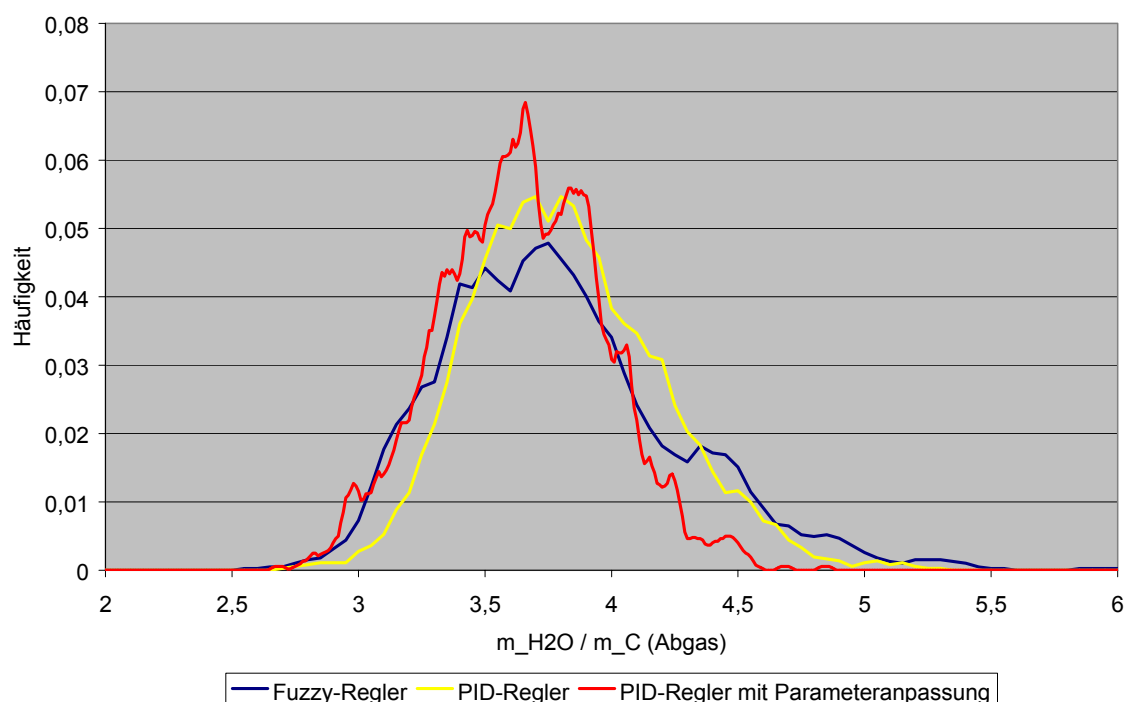


Abb. 9.3-3: Verhältnis von Wasser zu CO_2 im Abgas als Anzeichen für die Brennstoffeuchte

Die Anpassung der Regelung an einen nassen Brennstoff ist in **Abb. 9.3-4** dargestellt. Hierbei wird ausgehend von einem normalen Betriebszustand nasser und damit heizwertarmer Müll in die Beschickung aufgegeben. Nach etwa 15 Minuten gelangt dieser Brennstoff auf den Rost und führt zu einem deutlichen Leistungseinbruch. Daraufhin wird die Beschickung deutlich erhöht. Durch die allmähliche Erkennung des nassen Brennstoffes werden die Reglerparameter jedoch so verändert, dass eine weitere Erhöhung der Beschickergeschwindigkeit nicht stattfindet. In den folgenden 1-2 Stunden wird diese im Mittel abgesenkt, sodass keine totale Überschüttung des Brennbettes stattfindet.

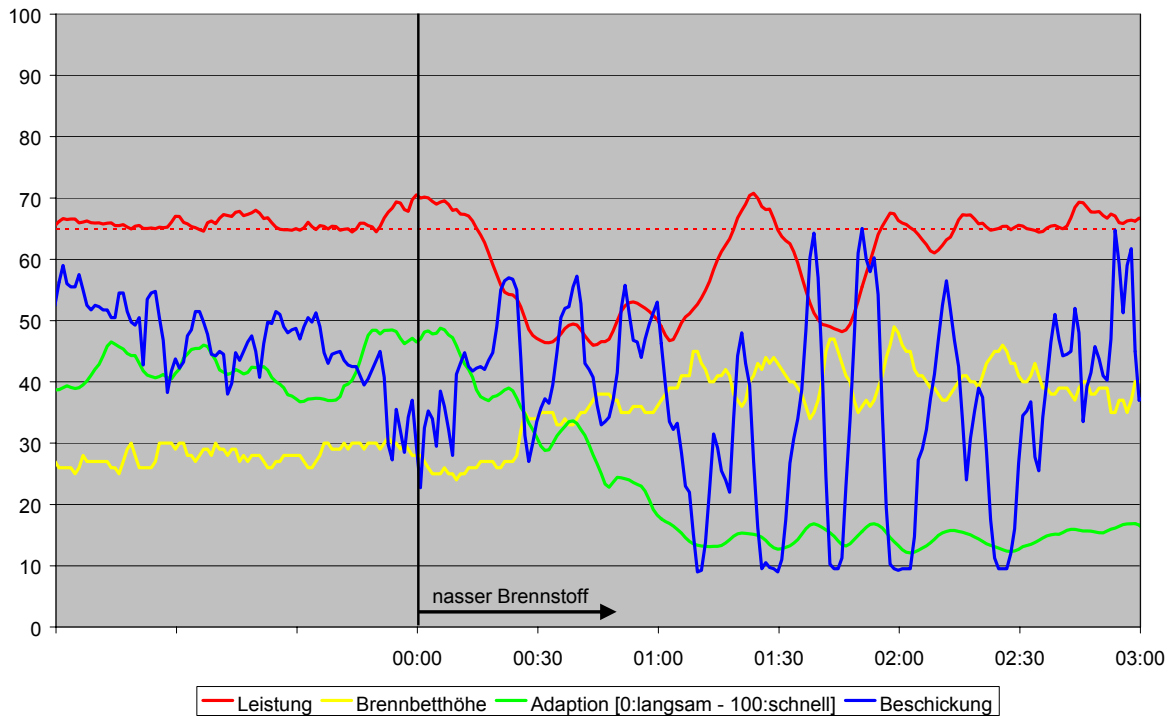


Abb. 9.3-4: PID-Regler mit Adaption - Beschickung mit nassem Brennstoff

Es findet kein optimaler Betrieb der Anlage statt, es ist jedoch auch kein Handeingriff notwendig. An den Schwankungen der Beschickergeschwindigkeit ist deutlich zu erkennen, dass noch keine optimale Einstellung der Reglerparameter gefunden wurde, diese aber durchaus funktionsfähig sind.

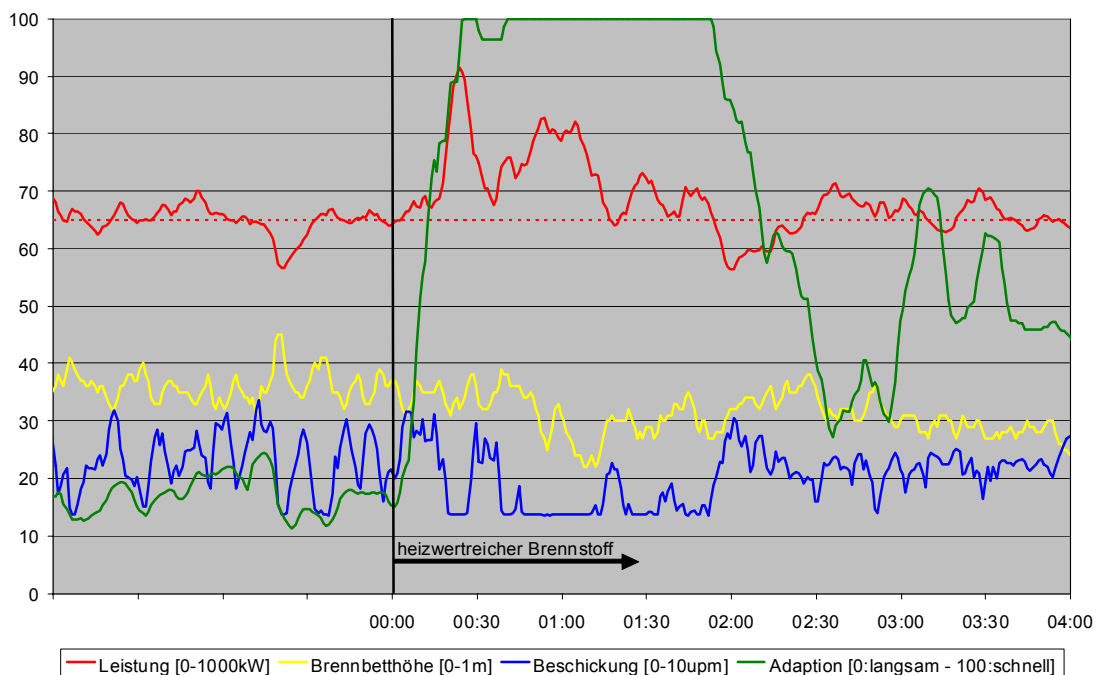


Abb. 9.3-5: PID-Regler mit Adaption - Beschickung mit heizwertreichem Brennstoff

In **Abb 9.3-5** ist das Verhalten bei einem heizwertreichen Brennstoff dargestellt. Im Vorfeld zum Brennstoffwechsel fand eine Beschickung mit relativ heizwertarmem Material statt. Es wurde zunächst eine große Menge heizwertreicher Pellets aufgegeben, die die stark ausgeprägte Leistungsspitze nach etwa 15-20 Minuten erklärt. Danach wurde die Pelletbeschickung für kurze Zeit gestoppt und so eingestellt, dass sie etwa 40-50% des benötigten Energieeintrages erbringt. Die Fuzzy-Logic erkennt relativ schnell den heizwertreichen Brennstoff und passt entsprechend die Reglerparameter an. Problematisch hierbei ist jedoch die minimale Drehzahl der Beschickschnecke von $1,4 \text{ min}^{-1}$. Diese wurde mehrfach erreicht, sodass eine weitere Verminderung der Brennstoffzufuhr nicht möglich war. Dies bedeutet natürlich eine deutliche Behinderung der Leistungsregelung.

Die Erfassung von Temperatur und Lage der Hauptbrennzzone erfolgte zunächst durch die über dem Rost eingebauten Thermoelemente. Ein Test mit heizwertreichem Brennstoff zeigte jedoch, dass die Verwendung problematisch ist, da das erste Thermoelement bei hohem Brennbett sich nicht in der Gasphase befindet, sondern direkt im Müll. Bei nassem Brennstoff ist dies unproblematisch, da hier eine ohnehin niedrige Temperatur gemessen bzw. erwartet wird. Bei heizwertreichem Brennstoff wird hier jedoch eine hohe Temperatur erwartet. Das Fuzzy-Modul kann also nicht erkennen, dass es sich um heizwertreichen Brennstoff handelt und ergreift dementsprechend die falschen bzw. keine Maßnahmen, da die Regelung nahezu ausschließlich über die Brennbethöhe erfolgt (vgl. **Abb. 9.3-6**).

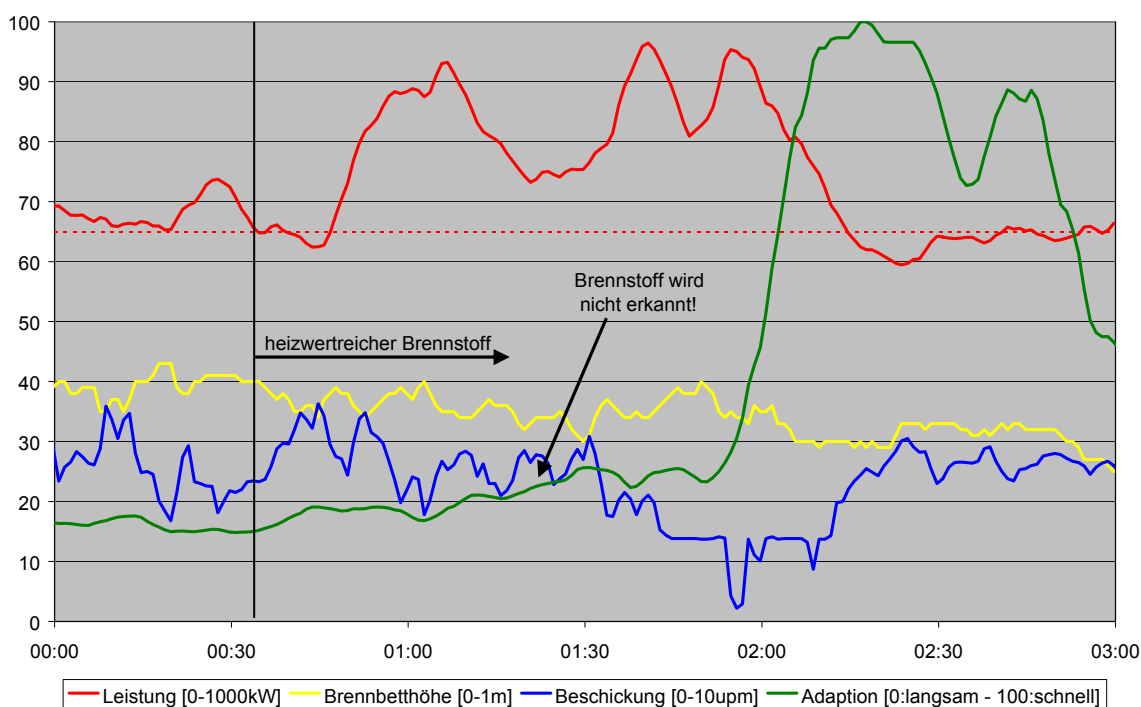


Abb. 9.3-6: PID-Regler mit Adaption - Beschickung mit heizwertreichem Brennstoff – Brennstoff nicht erkannt

10 Neuronale Netze als Prozessmodell

Zur Unterstützung des bestehenden PID/Fuzzy-Reglers werden künstliche neuronale Netze (KNN) eingesetzt, deren Aufgabe es ist, den Verlauf verschiedener Betriebsgrößen vorherzusagen. Um dies zu erreichen, werden dem KNN gewisse Zeitfenster der Prozesshistorie präsentiert, deren Verläufe es selbständig den zu prognostizierenden Betriebszuständen zuordnet. Dadurch, dass die Netze in ihrer Trainingsphase aus geeigneten Betriebsdaten die Zusammenhänge des Verbrennungsprozesses erlernen und somit eine Prognose kommender Zustände erlauben, können sie als implizites Modell des Prozesses fungieren.

Aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Abhängigkeiten, die zwischen einzelnen Größen bestehen können, wurden zwei parallele neuronale Module implementiert und getestet. Schnell und langsam wirkende Prozessgrößen können somit gezielt auf verschiedene Klassifikator-ketten verteilt werden, was des weiteren die Möglichkeit bietet, einzelne Regelkreise (etwa Luft- und Beschickungsregelung) ganz oder teilweise zu entkoppeln. Ein weiterer Vorteil dieser Trennung ist die geringere Anzahl der von jedem Netz zu verarbeitenden Eingänge (Sensor- / Stellgrößen), was einerseits die Dauer des Lernvorganges verringert, vor allem aber die Qualität der Vorhersage erhöht, da weniger irrelevante bzw. störende Größen das adaptive Verhalten der Netze beeinflussen. **Abb. 10-1** zeigt den prinzipiellen Aufbau des KNN.

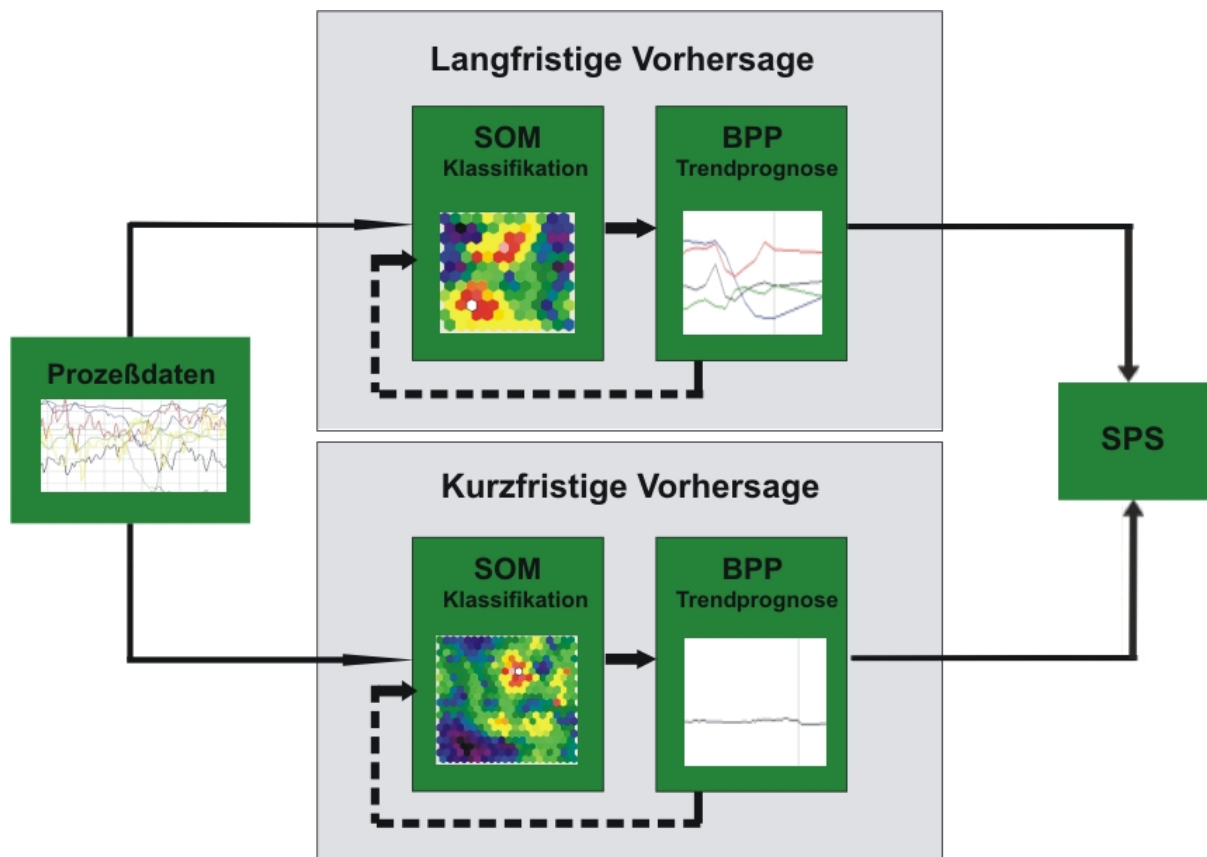


Abb. 10-1: Prinzipieller Aufbau des neuronalen Klassifikators

Für die langfristige Vorhersage (derzeit ca. 3-5 Minuten) wurden 1-Minuten-Mittelwerte der Betriebsdaten verwendet, wobei für die dem Netz präsentierte Prozesshistorie verschiedene Zeitfenster von ca. 10 bis 15 Minuten getestet wurden. Die kurzfristige Prognose (30 Sekunden) basiert auf 5-Sekunden-Mittelwerten und einem Zeitfenster von 3 bis 5 Minuten. Struktur und Arbeitsweise der einzelnen Module werden im folgenden Abschnitt erläutert.

10.1 Aufbau eines neuronalen Klassifikators

Um das gewünschte Verhalten des Systems zu realisieren, werden hybride neuronale Netze eingesetzt. Die wesentlichen Elemente sind eine selbstorganisierende Karte (**self-organizing map, SOM**) und ein mehrschichtiges Feed-Forward-Netzwerk mit einem **Backpropagation-Algorithmus (BPP)**, welche rückgekoppelt miteinander verbunden sind (vgl. Abb. 10-1)

Die SOM erhält als Eingabe die besagten Zeitreihen der Betriebsdaten, klassifiziert und kategorisiert diese, und gibt ihre Neuronenaktivitäten an das nachgeschaltete BPP-Netz weiter. Dieses dekodiert das erhaltene Aktivitätsmuster und nutzt es zur Prognose eines Folgezustandes. **Abb. 10.1-1** verdeutlicht den neuronalen Datenfluss. Die beiden verschiedenen Netztypen werden im Folgenden beschrieben.

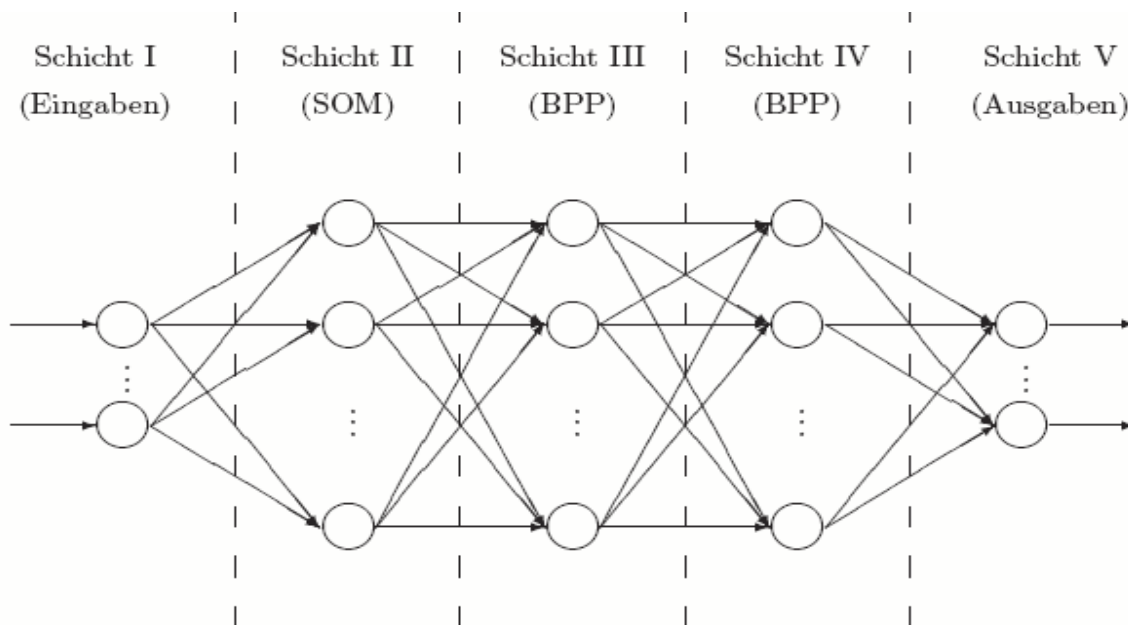


Abb. 10.1-1: Schematischer Aufbau des hybriden neuronalen Netzes

10.1.1 Aufgabe der selbstorganisierenden Karte

Um das erwünschte prädiktive Verhalten des Systems zu ermöglichen, d.h. um die zu erwartenden Betriebszustände zuverlässig vorhersagen zu können, werden dem neuronalen Netz – zunächst also der SOM – Datenvektoren mit dem zeitlichen Verlauf der zu

prognostizierenden Betriebsgrößen präsentiert. Diese enthalten Informationen über die unmittelbare Vergangenheit verschiedener relevanter Prozessparameter wie Leistung, Temperaturen, O₂-Gehalt, Luftzufuhr, etc. Beispielsweise ergeben sich bei der Betrachtung 20 verschiedener Eingänge in einem Zeitfenster von 12 Minuten (bei der Verwendung von 1min-Mittelwerten) Vektoren der Dimension 240.

Mit Hilfe der SOM wird nun der jeweils anliegende Eingangsvektor klassifiziert, wobei an dieser Stelle die traditionelle, in der Literatur beschriebene Betrachtung des Winner-Neurons keine Rolle spielt. Vielmehr ist der aktuelle Betriebszustandsverlauf im gesamten Aktivitätsmuster des Netzes kodiert (**Abb. 10.1.1-1**). Diese neue Art der Interpretation („Computing with Activities“) ermöglicht es der SOM, auch mit verhältnismäßig wenig Neuronen eine enorm große Datenmenge speichern und repräsentieren zu können.

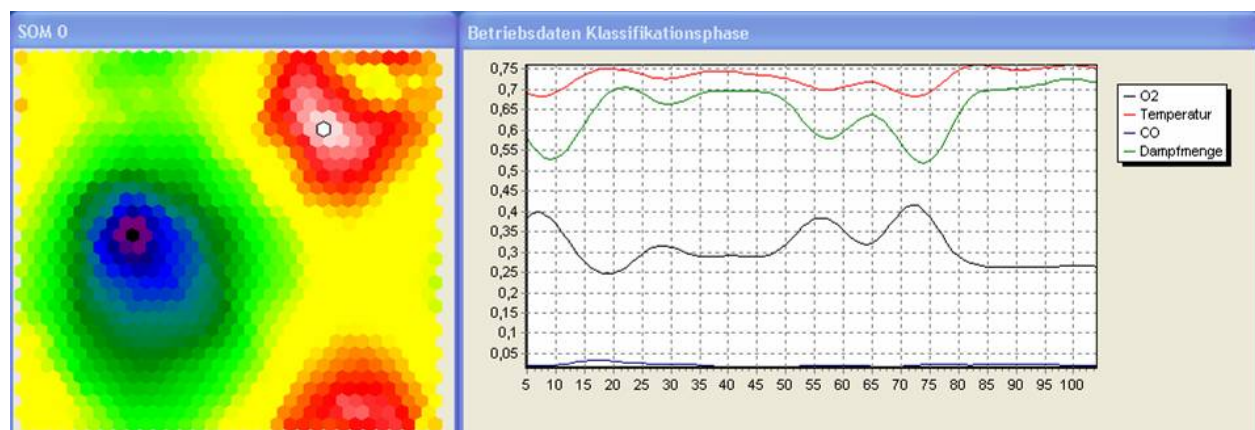


Abb. 10.1.1-1: Neuronale Kodierung der Prozessdaten durch die SOM

Die Betriebszustände der Anlage und Übergänge zwischen diesen werden durch Struktur und Änderung des SOM-Aktivitätsmusters dargestellt. Dadurch, dass verschiedene Zustände stetig ineinander übergehen, folgt aus der topologieerhaltenden Eigenschaft der SOM, dass auch deren Aktivitätsmuster während des Prozesses fließend und ohne Sprünge auseinander hervorgehen. Dieses Verhalten ist in **Abb. 10.1.1-2** dargestellt.

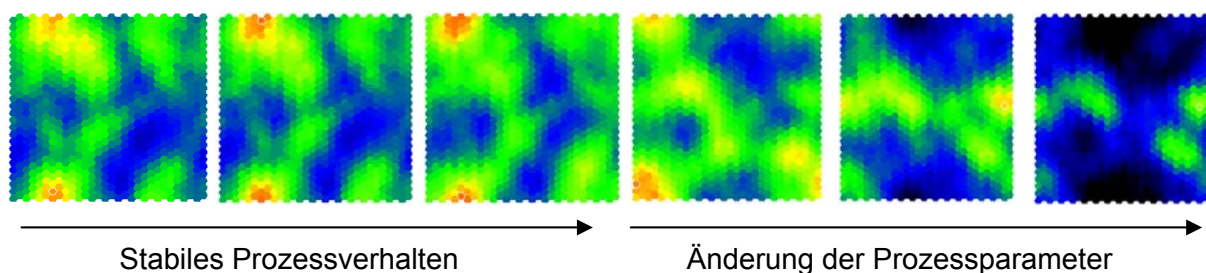


Abb. 10.1.1-2: Aktivitätskodierter Prozessverlauf

Zur Interpretation des SOM-Aktivitätsmusters wird dieses nun an das nachgeschaltete BPP-Netz weitergeleitet, dient diesem also als Eingabeschicht.

10.1.2 Aufgabe des Backpropagation-Netzes

Die wesentliche Aufgabe des BPP-Netzes ist die eigentliche Vorhersage des auf das dem Netz präsentierten Zeitintervall $(t-n, \dots, t)$ folgenden Prozesszustandes. Durch dieses Netz wird also das für Menschen nicht oder kaum interpretierbare SOM-Aktivitätsmuster dekodiert und somit die neuronale Repräsentation des Anlagenverhaltens wieder in reale Größen überführt.

Es wurden drei verschiedene Möglichkeiten untersucht, um dieses Ziel zu erreichen.

Iterative Berechnung des gewünschten Zeitpunktes

Jedes Ausgabeneuron steht dabei für eine der vorherzusagenden Betriebsgrößen zum Zeitpunkt $t+1$. Während der Trainingsphase wurden dem Netz dementsprechend diese auf die Eingabevektoren folgenden Zustände als Sollvektoren übergeben.

Mittels iterativer Anwendung der neuronalen Klassifikation können natürlich auch mehrere Zeitschritte vorhergesagt werden, indem nun das um einen Schritt verschobene Intervall $(t-n+1, \dots, t+1)$ der SOM als Eingabe dient, das BPP-Netz die Prognose des Zeitpunktes $t+2$ liefert, usw.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist die geringe Anzahl der benötigten Ausgabeneuronen (nur ein Neuron pro Betriebsgröße) sowie die hohe Flexibilität bzgl. des gewünschten Vorhersagehorizontes. Nachteilig hingegen ist die iterative Fortpflanzung des Fehlers; eine geringe Differenz zwischen der Prognose und dem tatsächlichen Prozessverlauf wird nach mehreren Iterationen zu deutlichen Abweichungen führen, die das Ergebnis im Extremfall unbrauchbar machen.

Gleichzeitiges Erlernen verschiedener Zukunftswerte

Eine weitere Möglichkeit ist das gleichzeitige Erlernen verschiedener Zeitpunkte für die Prognose. Dabei wird (für jede vorherzusagende Größe) ein Ausgabeneuron für jeden Zeitpunkt benötigt, was allerdings schnell zu vielen Neuronen führen kann, was wiederum Dauer und Güte des Lernprozesses negativ beeinflusst. Der Vorteil ist allerdings, dass die Fehlerfortpflanzung des iterativen Verfahrens hier nicht auftreten kann.

Direkte Vorhersage nur eines gewünschten Zeitpunktes

Bei der dritten Variante wird wiederum nur ein Ausgabeneuron pro Betriebsgröße verwendet, welches nun nicht den Zeitpunkt $t+1$, sondern direkt den gewünschten Zukunftswert berechnet.

Zwar ist dieses Verfahren damit das am wenigsten flexible bzgl. des Vorhersagehorizontes, allerdings ist es in puncto Lerndauer und Güte der Prognose die beste Wahl, was im Betrieb an der Anlage sowie in der Simulation bestätigt werden konnte.

10.2 Datenverwaltung / -bereitstellung

Der kritische Punkt für die Güte der Klassifikation ist die Auswahl und die Verarbeitung der Daten für die Lernphase der Netze. Die Qualität der neuronalen Trendprognose steigt und fällt mit der Anzahl und vor allem mit der Vollständigkeit der zugrundeliegenden Trainingsdaten. Bei deren Auswahl ist auf eine möglichst umfangreiche Datenmenge zu achten, damit das Netz in der Lage ist, normale Prozessschwankungen von relevanten, stellgrößenbedingten Änderungen unterscheiden zu können. Ein Problem hierbei ist etwa, dass von Großanlagen normalerweise lediglich geregelte Daten mit nur geringen Schwankungen erhältlich sind. Extremsituationen bzw. unerwünschte Betriebszustände sind damit für das neuronale Netz nur unter großen Schwierigkeiten erlernbar. Es sollte darauf geachtet werden, dem Netz möglichst viele verschiedene Situationen zu präsentieren, da es sonst in der späteren Klassifikationsphase nicht in der Lage sein wird, diese korrekt zu erkennen und zuzuordnen.

Es wurden verschiedene Techniken implementiert, um die für die Trainingsphase verwendeten Betriebsdaten an die Anforderungen der Neuronalen Netze anzupassen. Diese beinhalten zunächst Verfahren zur Glättung und Mittelwertbildung der Daten sowie zur Definition von Regel- und Stellgrößen. Des weiteren ist eine Gewichtung der Eingänge möglich, um die unterschiedliche Aussagekraft der verschiedenen Parameter zu modellieren. Außerdem kann eine gewisse Sensitivität im Sollbereich der Regelgrößen definiert werden, um ‚normale‘ Schwankungen um den Sollwert herum zu kompensieren. Auch die verschiedenen Zeitpunkte des präsentierten Intervalls können unterschiedlich gewichtet werden, um so die Bedeutung der unmittelbaren Vergangenheit im Vergleich zu früheren Zeitpunkten zu erhöhen. **Abb. 10.2-1** zeigt einen Ausschnitt des entsprechenden Teiles der Programmoberfläche.

Bezeichnung	Spalte	Min	MW	Max	Stellgröße	Prädiktion	SW-Skalierung	Int.Min	Sollwert	Int.Max	Gewichtung
Leistung	1	176.75	615.72	1306.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	520	600	680	8
TAbgas	2	624.77	902.33	1212.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
T1	3	40.740	627.91	982.46	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		4
T2	4	257.95	712.24	1051.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
T3	5	413.63	820.02	1101.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
T4	6	391.66	658.84	984.48	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
T5	7	232.32	359.38	645.61	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
O2	8	0.3799	8.5116	16.510	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		2
CO	9	-3.4700	7.4324	375	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
Brennethöhe	10	0.0799	0.2915	0.5699	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		6
Schnecke	11	0	2.7237	5.1500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		4
Rostgeschwindigkeit	12	0.0096	36.806	78.226	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
Rostlaufzeit	13	0.0806	0.6768	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		3
T PL	14	24.090	122.74	177.66	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
PL1	15	58.180	153.69	241.92	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
PL2	17	44.299	227.62	386.76	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
PL3	16	52.009	195.84	307.11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1
PL4	18	40.680	118.49	271.32	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		0		1

Abb. 10.2-1: Datenverwaltung

10.3 Prädiktives Verhalten des KNN

Es gibt eine Reihe von Parametern, die die Qualität des prädiktiven Verhaltens beeinflussen. Die wichtigsten sind Anzahl und Art der dem Netz präsentierten Betriebsgrößen. Diese Auswahl muß vollständig genug sein, um alle prozessrelevanten Abhängigkeiten zu enthalten, allerdings nicht zu umfangreich, da sonst evtl. wichtige Informationen von einer Vielzahl unwichtiger überlagert werden könnten. Auch spielt die Lerndauer des BPP-Netzes eine entscheidende Rolle. Hier gilt es einen Kompromiß zu finden zwischen einerseits der Klassifikationsqualität und -exaktheit des Netzes bzgl. der Trainingsdaten und andererseits der Generalisierungsfähigkeit, also der wichtigen Eigenschaft neuronaler Netze, auch unbekannte Daten sinnvoll in das erlernte Konzept einordnen zu können. Wie verschiedene Simulationen gezeigt haben, ist ein weiterer wesentlicher Aspekt die Größe des präsentierten Zeitfensters. Da es durchaus Systemparameter gibt, deren Einfluss sich erst nach 10 oder sogar 15 Minuten in der Veränderung anderer Größen zeigt, sollte der Blick in die Vergangenheit nicht zu kurz sein. Auf der anderen Seite besteht dann die Gefahr, dass aktuelle Änderungen kurzfristig wirkender Größen in einem zu umfangreichen Eingangsvektor unbemerkt bleiben könnten. Für die Tests des internen neuronalen Modells wurde zunächst ein Zeitfenster von 12 Minuten verwendet. Die folgenden Abbildungen zeigen das Verhalten des Netzes bei der 10-Minuten-Vorhersage des O_2 -Gehaltes bzw. der Brennbetthöhe. Dabei beschreibt die blaue Linie jeweils den realen Verlauf dieser Größen, die rote den vom Netz prognostizierten, und die grüne die Vorhersage des Netzes nach einer simulierten Stellwertänderung (Sekundärluftmenge im Feuerraum bzw. Drehzahl der Förderschnecke). So ist beispielsweise in **Abb. 10.3-1** gut zu erkennen, dass – so die Prognose des Netzes – eine Erhöhung der Sekundärluft einen sofortigen Anstieg des O_2 -Gehaltes zur Folge hat, wohingegen in **Abb. 10.3-3** eine höhere Schneckendrehzahl sich erst nach einigen Minuten auf die Brennbetthöhe auswirkt.

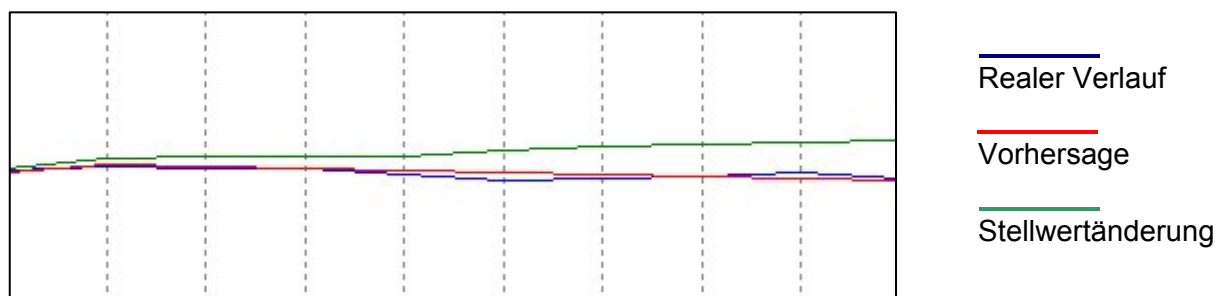


Abb. 10.3-1: Vorhersage des O_2 -Gehaltes bei Erhöhung der Sekundärluft

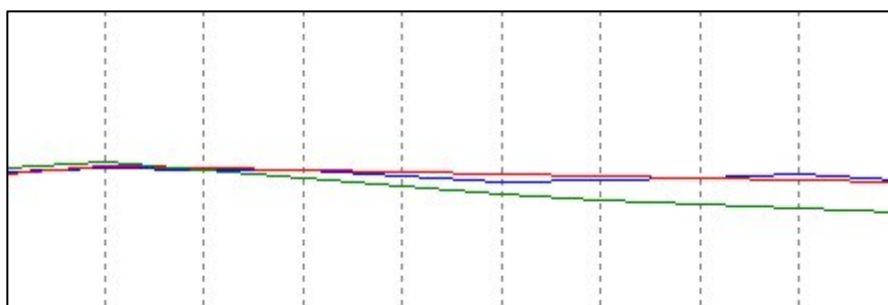


Abb. 10.3-2: Vorhersage des O_2 -Gehaltes bei Reduzierung der Sekundärluft

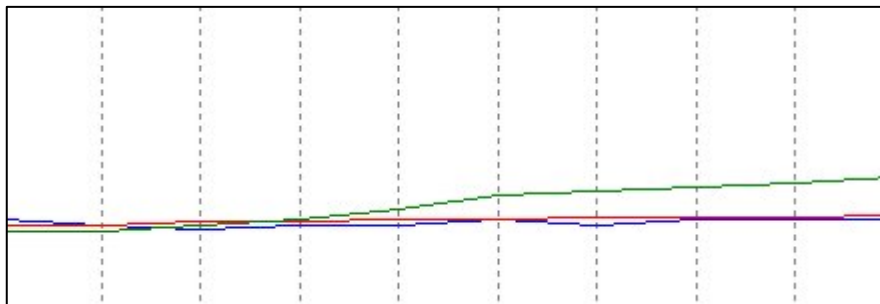


Abb. 10.3-3: Vorhersage der Brennbethöhe bei erhöhter Schneckendrehzahl

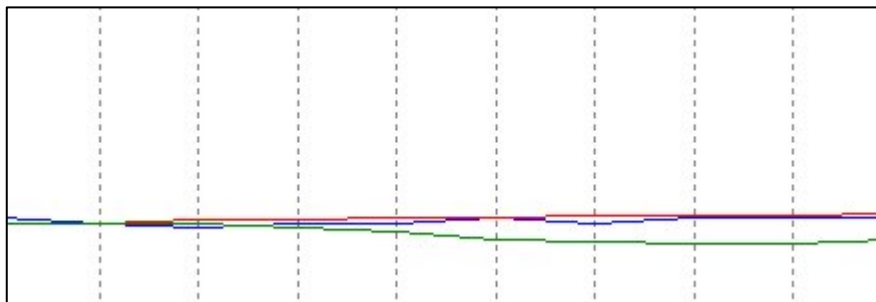


Abb. 10.3-4: Vorhersage der Brennbethöhe bei verminderter Schneckendrehzahl

Es zeigte sich, dass die Vorhersagen umso plausibler werden, je umfangreicher die Trainingsmenge ist. Insbesondere, wenn in dieser viele schwankende Prozesszustände, also unerwünschte, schlecht geregelte Situationen auftreten, anhand derer das Netz die Zusammenhänge der einzelnen Betriebsgrößen erkennen kann. Ein Problem ist allerdings die inkonsistente Qualität der Prognose bzgl. verschiedener Größen bei der Verwendung konstanter Zeitfenster. Durch die bereits erwähnten unterschiedlichen zeitlichen Abhängigkeiten werden nicht alle Zusammenhänge gleichzeitig bzw. in gleicher Qualität erkannt. Diesbezüglich kann das System also sicherlich noch verbessert werden, indem jedes Netz nur eine einzige Größe behandelt, und entsprechend für diese optimiert wird.

Die Bedeutung der Größe der Trainingsdatenmenge ist in der ersten KNN-Versuchswoche (KW 35/2007) deutlich geworden. Die in dieser Woche noch unzureichende Vorhersagegüte konnte wesentlich verbessert werden, indem für die nachfolgenden Simulationen die Daten dieser Woche sowie der Versuchswochen für den Fuzzy-Regler (KW43+45/2007) der ursprünglichen Trainingsmenge hinzugefügt wurden.

Eine allzu große Datenmenge kann allerdings auch zu Problemen führen, wenn sie im Wesentlichen Situationen enthält, die aus einem ruhigen, geregelten Prozess stammen, wie es bei Daten aus Großanlagen zu erwarten ist. Die für den Lernerfolg nötigen Schwankungen können dann in der großen Datenmenge untergehen. Ein Ansatz, dieses Problem zu lösen, wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

10.4 Seltenheitsanalyse der Daten

Dieses im Rahmen des Projektes neu entwickelte Verfahren basiert auf einer Analyse des SOM-Aktivitätsmusters und dient dazu, seltene Datensätze („Ausreisser“) zu erkennen und zu bewerten. Dazu wird einerseits die Aktivität des Winnerneurons betrachtet, welche bei wenig bekannten Daten sehr viel kleiner ausfällt als bei häufig auftretenden, da sich hier die Neuronen während des Lernens besser anpassen konnten. Ein zweites Kriterium ist die Gesamtaktivität der Karte, die ebenfalls bei Normalsituationen deutlich größer ist, da sehr viel mehr Neuronen eine Ähnlichkeit zu diesen Datensätzen erkennen lassen, was sich durch hohe Aktivitäten bemerkbar macht. Es wurden verschiedene Möglichkeiten erprobt, diese beiden Werte zu kombinieren, um den einzelnen Datensätzen eine ‚Seltenheits‘-Bewertung zuzuweisen.

Die SOM benötigt für dieses Verfahren zwei Trainingsphasen. In der ersten wird jedem Datensatz eine Seltenheit zugewiesen, in der zweiten können seltene Situationen gesondert behandelt werden. Dies führt dazu, dass mehr Neuronen als vorher sich auf diese wichtigen Ausreisser adaptieren können. Die Plausibilität der Analyse wurde in der Simulation bestätigt. **Abb. 10.4-1** zeigt das Ergebnis dieses Verfahrens für eine ca. 10.000 Vektoren umfassende Trainingsdatenmenge der Technikumsanlage.

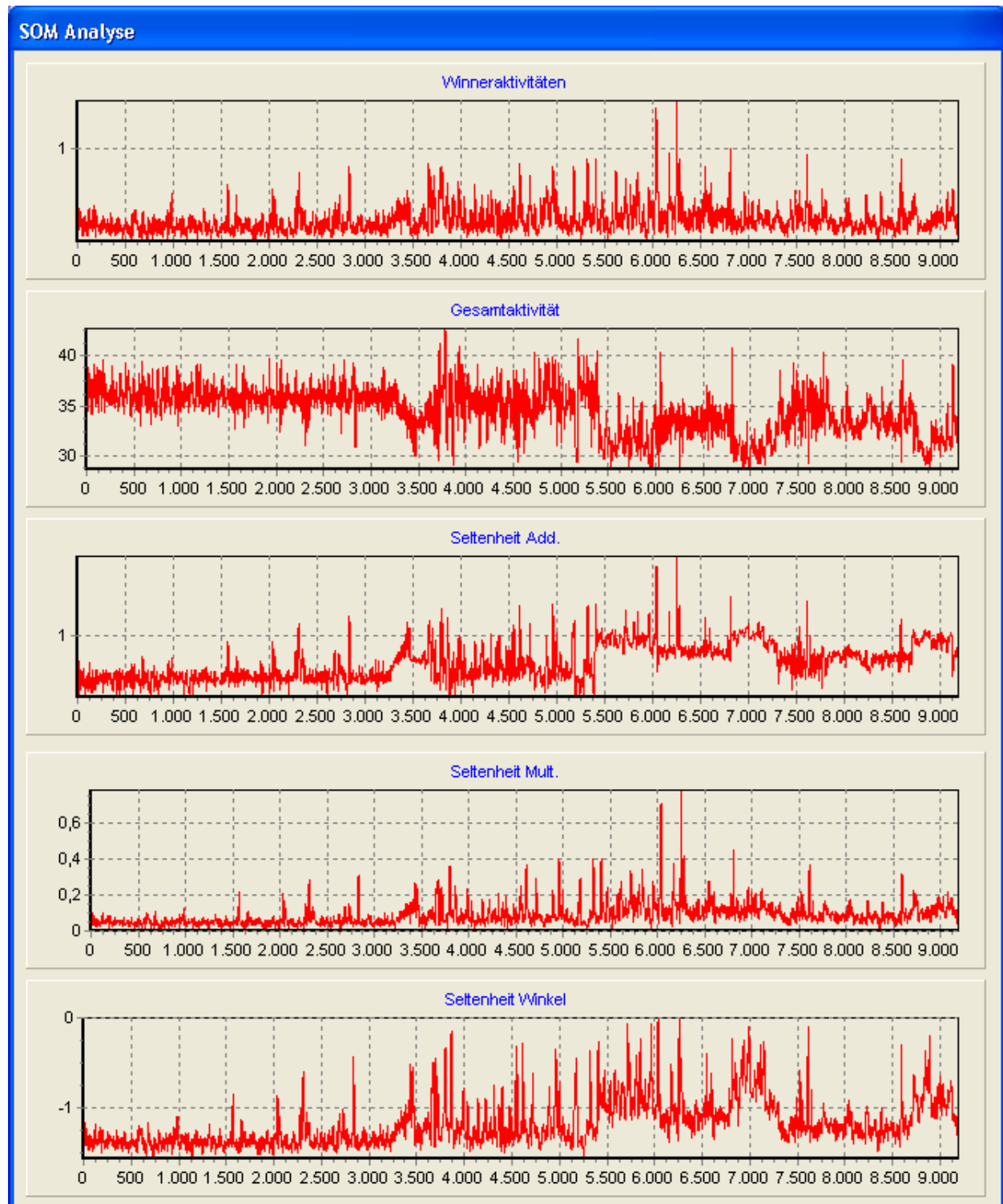


Abb. 10.4-1: Seltenheitsanalyse der Trainingsdaten durch die SOM

10.5 Ergebnisse: Versuchsbetrieb und Simulation

Abb. 10.5-1 zeigt die Programmoberfläche des KNN-Moduls im laufenden Betrieb an der Technikumsanlage. Im Hinblick auf die Kombination des neuronalen Netzes mit dem PID/Fuzzy-Regler waren die langfristigen Vorhersagen der Leistung sowie der Brennbetthöhe von Bedeutung. Die Ergebnisse dieser Prognosen sollen nun vorgestellt werden. Des weiteren wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Großanlagen untersucht.

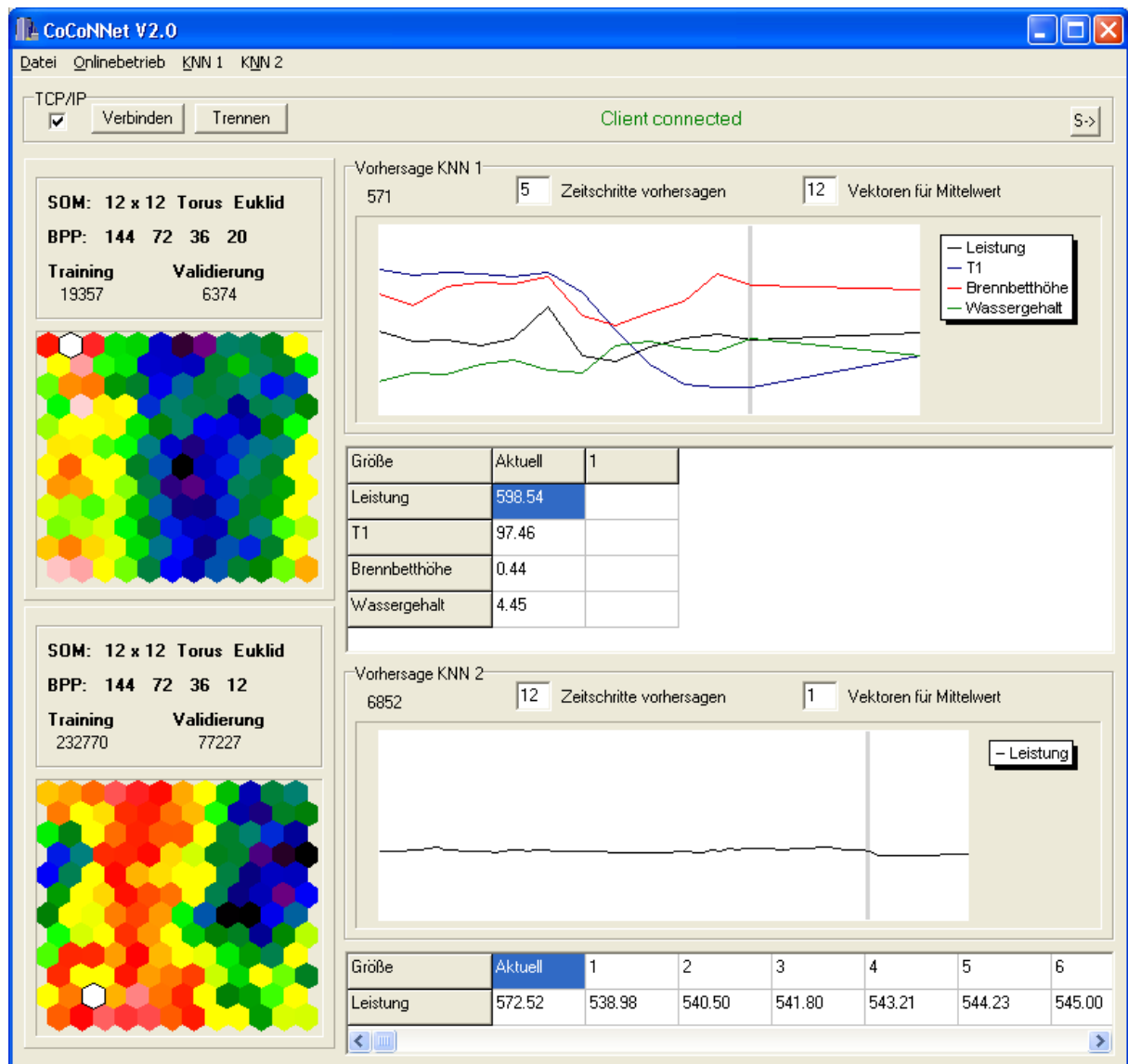


Abb. 10.5-1: KNN im Versuchsbetrieb

10.5.1 Technikumsanlage CUTE

Es hat sich in der Versuchswoche gezeigt, dass die gleichzeitige Behandlung mehrerer Betriebsgrößen durch ein einzelnes neuronales Netz zu deutlichen qualitativen Unterschieden in der Vorhersage führt. Durch die Auswahl der verwendeten Eingangsgrößen sowie deren Gewichtungen lässt sich das KNN jeweils nur auf eine dieser Größen optimal trainieren, so dass sich die gewünschte Prädiktion auch nur bei jeweils dieser Größe beobachten ließ.

Abb. 10.5.1-1 zeigt die Verläufe von Leistung und Brennbetthöhe sowie die zugehörigen Vorhersagen des KNN.

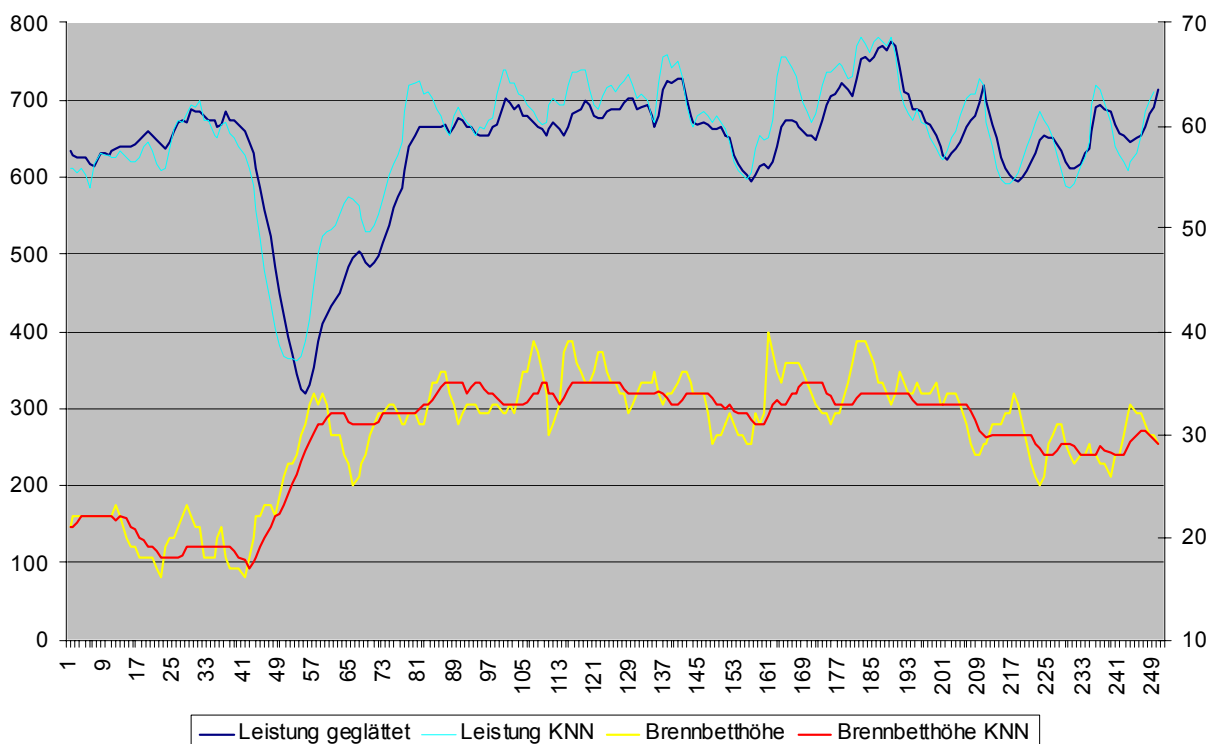


Abb. 10.5.1-1: Prognose von Leistung und Brennbetthöhe im Versuchsbetrieb

Die sehr umfangreiche Auswahl der verwendeten Eingänge kam offensichtlich der Prognose der Leistung zugute, verhinderte jedoch eine sinnvolle Vorhersage des Verlaufes der Brennbetthöhe, die von bedeutend weniger Größen abhängig ist. Es ist zu sehen, dass das KNN zwar den prinzipiellen Verlauf dieses Wertes berechnet hat, allerdings stark geglättet, und dass vor allem kein Zeitvorteil erkennbar war. Anders verhält es sich bei der Leistungskurve, hier ist das Netz durchaus in der Lage, den gewünschten prädiktiven Effekt zu erzielen; meist liegt die Kurve des KNN ca. 3 Minuten vor der des tatsächlichen Verlaufes. Auch die Amplituden dieser Größe sind wesentlich genauer vorhergesagt worden, wie in der Abbildung gut zu erkennen ist.

Abgesehen von der bereits geschilderten Zusammenstellung und Gewichtung der Eingänge, die bei ungünstiger Wahl das prädiktive Verhalten negativ beeinflussen können, war noch ein

weiterer Effekt zu beobachten, der sich bereits in der Lernphase des BPP-Netzes bemerkbar machte und sich ebenfalls nachteilig auswirkt. **Abb. 10.5.1-2** zeigt den Vergleich der zu erlernenden Daten (rot) und der tatsächlichen Netzausgabe (blau) während des Trainings. Idealerweise sollten diese beiden Kurven nach Abschluss des Lernvorganges identisch sein. Es zeigt sich jedoch, dass zwar der Verlauf der Kurve sehr exakt vom Netz gelernt wird, allerdings eine leichte Verschiebung der beiden Kurven auftritt, die der Fähigkeit zur Vorhersage entgegenwirkt. Die genaue Ursache dieses Effektes konnte noch nicht exakt geklärt werden, einen Einfluss auf dessen Stärke hat allerdings wiederum die Auswahl der verwendeten Eingangsgrößen sowie der Vorhersagehorizont. Durch die bereits genannten Verbesserungsvorschläge (nur eine Ausgabegröße pro Netz, wenig Outputneuronen, ...) können die Auswirkungen dieser Störung reduziert werden.

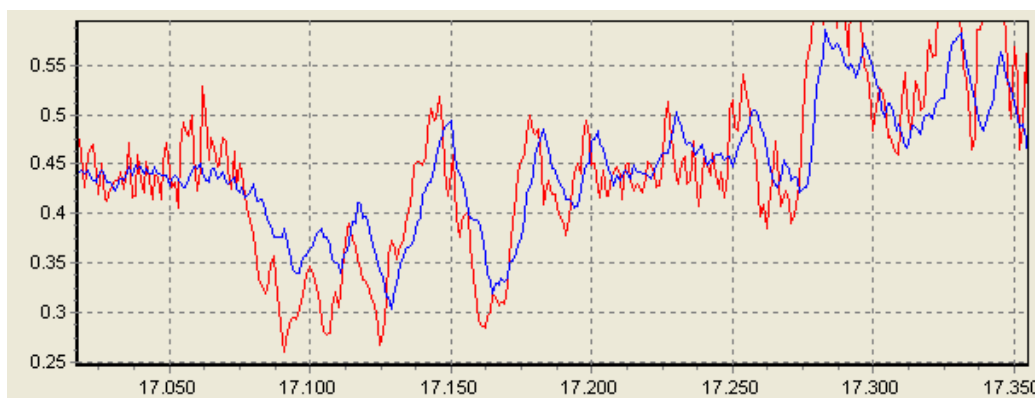


Abb. 10.5.1-2: Vergleich Ist-/Sollausgabe mit Zeitverschiebungseffekt

10.5.2 Simulation mit Daten aus Großanlagen

Die Ergebnisse, die die neuronalen Netze im Versuchsbetrieb lieferten, konnten mit der Simulation auf Daten von Großanlagen nachvollzogen und bestätigt werden. Die erläuterten Bedingungen, die an die Auswahl und Behandlung der Daten gestellt wurden, gelten hier jedoch in besonderem Maße. Dies gilt insbesondere für die Auswahl der Eingangsgrößen, da die Sensorik wesentlich umfangreicher ist, und daher auch ungleich mehr Eingänge berücksichtigt werden müssen. Durch die damit verbundene höhere Zahl der nötigen Neuronen scheint die Betrachtung nur einer vorhergesagten Größe pro KNN unabdingbar, um Störungen des prädiktiven Verhaltens zu minimieren. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass für das Training die Verwendung möglichst schwankender Betriebsdaten mit aussagekräftigen Situationen absolut essentiell ist. Für eine der Anlagen konnten derartige Daten zur Verfügung gestellt werden und lieferten in der Simulation gute Ergebnisse. Da auch hier gleichzeitig zwei Größen behandelt wurden, konnte dieselbe Güte der Resultate erzielt werden wie an der Technikumsanlage.

Abb. 10.5.2-1 zeigt das Verhalten des Netzes bei der Vorhersage der Dampfmenge (für die das KNN bzgl. der Sensorik und deren Gewichtung optimiert wurde) sowie des O₂-Gehaltes im Feuerraum.

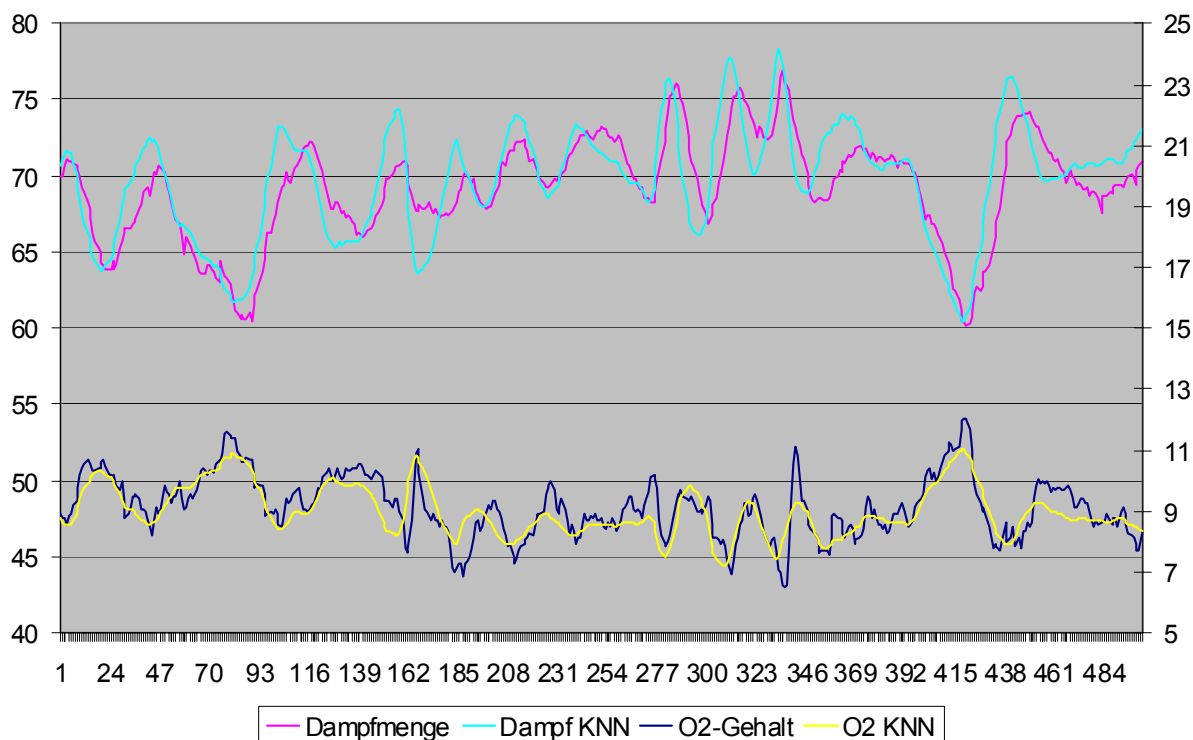


Abb. 10.5.2-1: Prädiktives Verhalten des KNN bei Anwendung auf Großanlagen

Die Prognose der Dampfmenge läßt einen deutlichen Zeitvorteil im Vergleich zu den Ist-Werten erkennen, bei der Vorhersage des O₂-Gehaltes gelingt dies nicht mit derselben Konsequenz. Zwar liegt auch hier die vom KNN erzeugte Kurve häufig vor dem tatsächlichen Verlauf, jedoch liegt an einigen Stellen wiederum lediglich ein leicht geglätteter Ist-Wert vor. Darüber hinaus kann beobachtet werden, daß die Amplituden der Werte gelegentlich nicht exakt übereinstimmen. Dieser Effekt könnte dadurch behoben werden, daß zum Training der Netze keine Absolutwerte verwendet werden, sondern nur die relativen Abweichungen zu den vorherigen Betriebszuständen.

Daß das BPP-Netz die beiden Werte mit unterschiedlicher Güte erlernt, läßt sich bereits durch die Betrachtung der Soll-/Ist-Daten während der Trainingsphase erkennen. **Abb. 10.5.2-2** zeigt das Lernverhalten für die Dampfmenge, **Abb. 10.5.2-3** das für den O₂-Gehalt. Die unterschiedliche Güte der Übereinstimmung ist deutlich zu sehen. Insbesondere zeigen die Abbildungen, daß der im vorherigen Abschnitt beschriebene Zeitverschiebungseffekt auch hier auftritt, die Ergebnisse also noch optimiert werden können.

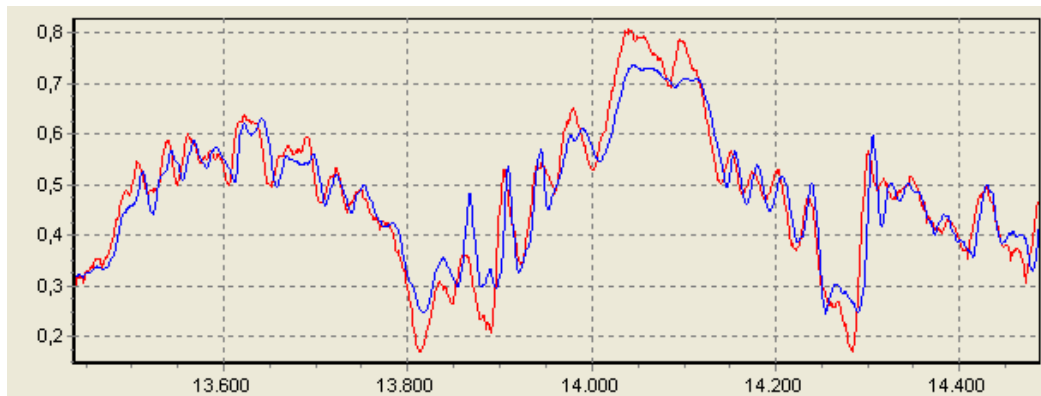


Abb. 10.5.2-2: Lernverhalten des BPP-Netzes für die Dampfmenge

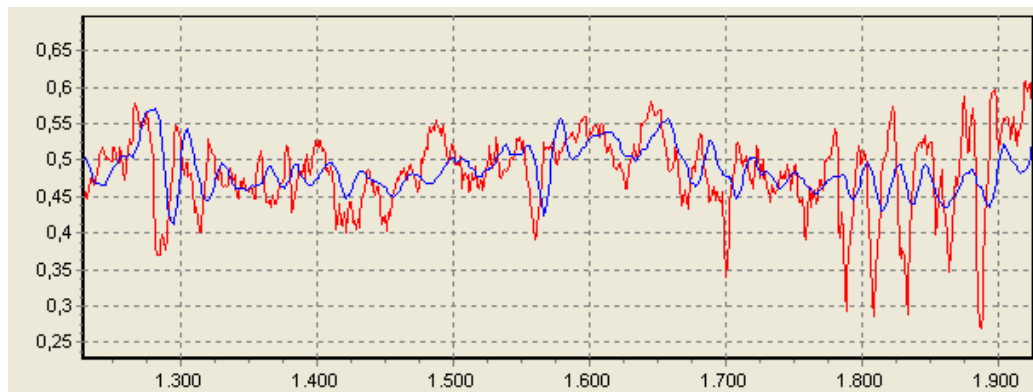


Abb. 10.5.2-3: Lernverhalten des BPP-Netzes für den O₂-Gehalt

Deutlich wird in **Abb. 10.5.2-3**, daß das Netz große Schwierigkeiten bei der Adaption an die Amplituden der O₂-Kurve aufweist, was zu der in **Abb. 10.5.2-1** gezeigten schlechteren Prädiktion dieses Wertes führt.

Es konnte in der Simulation gezeigt werden, daß – geeignete Betriebsdaten vorausgesetzt – auch für Großanlagen die Vorhersage einzelner Prozeßgrößen mit dem verwendeten hybriden neuronalen Netz möglich ist. Die Möglichkeiten, wie dieses Verhalten optimiert werden kann, werden im nächsten Abschnitt zusammengefaßt.

10.6 Verbesserung des prädiktiven Verhaltens

Sowohl der Versuchsbetrieb an der Technikumsanlage des CU TEC als auch die Simulation mit Daten von Großanlagen haben ergeben, daß die Vorhersage von Betriebsgrößen zur Unterstützung des Regelungssystems erfolgreich war. Zur weiteren Verbesserung dieses Verhaltens sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Es sollte für jede zu prognostizierende Prozeßgröße ein eigenes neuronales Netz implementiert werden, um einen optimalen Zusammenhang zwischen dieser Größe und der zugrundeliegenden Sensorik/Aktorik zu gewährleisten. Des weiteren kann auf diesem Weg auch die Gewichtung der Eingangsgrößen für die Vorhersage optimiert werden, ebenso ist nur so eine möglichst gute Modellierung der zeitlichen Abhängigkeiten erreichbar (Vergangenheitsintervall, Vorhersagehorizont).
- Die Auswahl der dem Training zugrunde liegenden Daten verdient besondere Beachtung, die Existenz möglichst aussagekräftiger Situationen, die die Zusammenhänge des Prozesses beschreiben, ist sicherzustellen.
- Die Behandlung seltener Betriebszustände, die sich aus der neu entwickelten Seltenheitsanalyse durch die SOM ergibt, kann noch verbessert werden, um eine stärkere Anpassung des Lernverfahrens an erkannte Schwankungen / Ausreißer zu gewährleisten.
- Bisher werden die Prozeßzustände durch die Absolutwerte der beteiligten Eingangsgrößen beschrieben. Werden statt dessen deren relative Abweichungen verwendet, sollten die Netze in der Lage sein, die Kurvenverläufe bzgl. der Amplituden exakter zu erlernen.
- Eine weitere Idee zur Behebung des Zeitverschiebungseffektes wäre eine andere Kodierung des zeitlichen Prozeßverhaltens. Dabei würden der SOM keine Zeitintervalle, sondern nur einzelne Zeitpunkte präsentiert, dafür dem BPP-Netz die Aktivitätstrajektorien der SOM (vgl. **Abb. 10.6-1**)

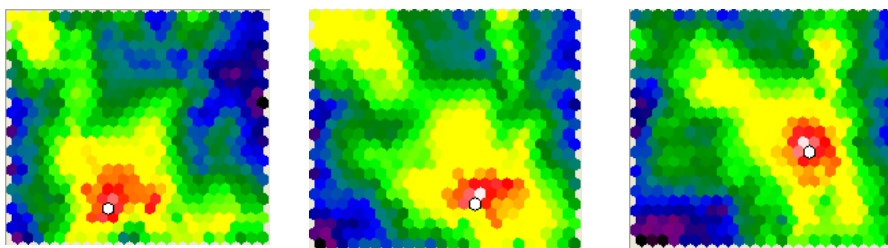


Abb. 10.6-1: Zeitkodierung durch Aktivitätsverläufe der SOM

11 Modellgestützte Regelung

11.1 KNN als Modell

11.1.1 Nutzung einer zukünftigen (berechneten) Regelabweichung

Ziel des Vorhabens war es, durch Nutzung eines Prozessmodells den Zustand der Verbrennung vorauszusagen. Die Prognosen bestimmter Zustandsgrößen sollen die Sensorik, welche die Vergangenheit zeigt, ergänzen. Gemäß den bisherigen Ergebnissen bietet es sich an, als Regelungskonzept den PID-Regler zu verwenden und das KNN als Prozessmodell.

Zur Unterstützung der bestehenden PID-Feuerungsregelung werden zukünftige Regelabweichungen berechnet. Diese werden zusätzlich zur vorhandenen Reglerstruktur verwendet. Außerdem ist hierbei eine Bewertung der Vorhersagewerte möglich. Einerseits kann das Aktivitätsmuster der SOM bewertet werden, um eine Aussage darüber zu treffen, ob es sich um einen bekannten oder einen unbekanntem Zustand handelt (vgl. 10.4). Andererseits ist eine Berechnung der Abweichung von vorhergesagtem und tatsächlich eingetretenem Wert möglich. Diese Werte können zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Vorhersagewerten herangezogen werden. Bei unzuverlässigen Werten kann somit die zukünftige berechnete Regelabweichung weniger stark berücksichtigt werden.

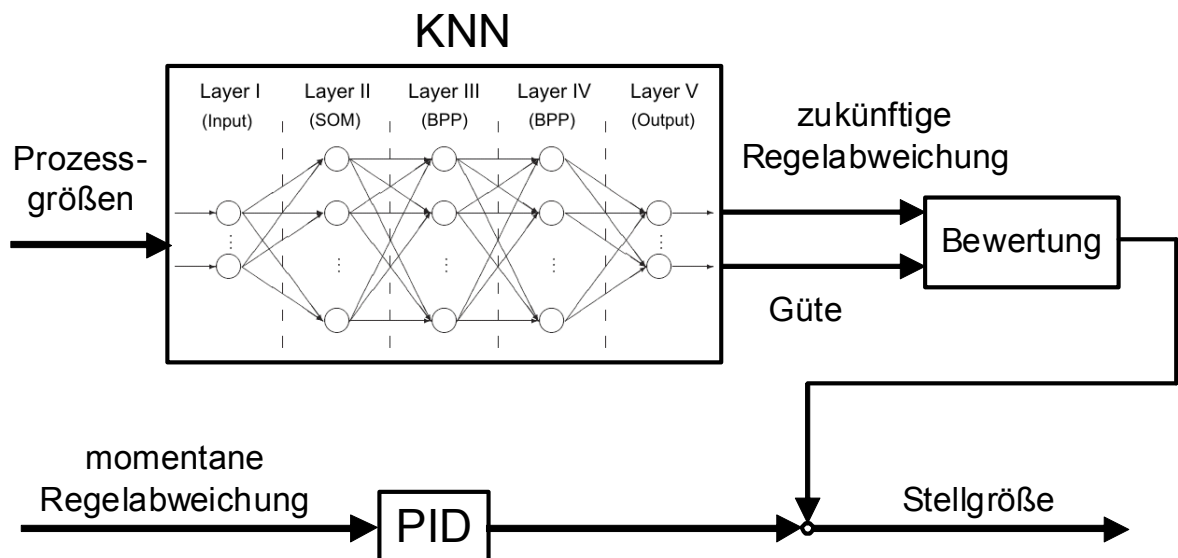


Abb. 11.1.1-1: Struktur zur Nutzung einer zukünftigen Regelabweichung

Beim Test der oben dargestellten Reglerstruktur (s. **Abb. 11.1.1-1**) für Leistung und Brennbethöhe wurde auf eine Bewertung der Zuverlässigkeit verzichtet, da die durch das KNN vorhergesagten Werte eine relativ große Abweichung zum tatsächlichen Wert zeigten (vgl. **Abb. 11.1.1-2**). Eine Beurteilung der gewonnenen Daten ist sehr schwierig, da das zu dieser Versuchseinstellung verwendete KNN nur eine sehr schlechte Prognose für die Leistung bzw. Brennbethöhe lieferte (Vorhersage ist die stark geglättete Kurve des IST-Wertes \Leftrightarrow kein echter Zukunftswert, Amplituden der Schwankungen zu gering ausgeführt).

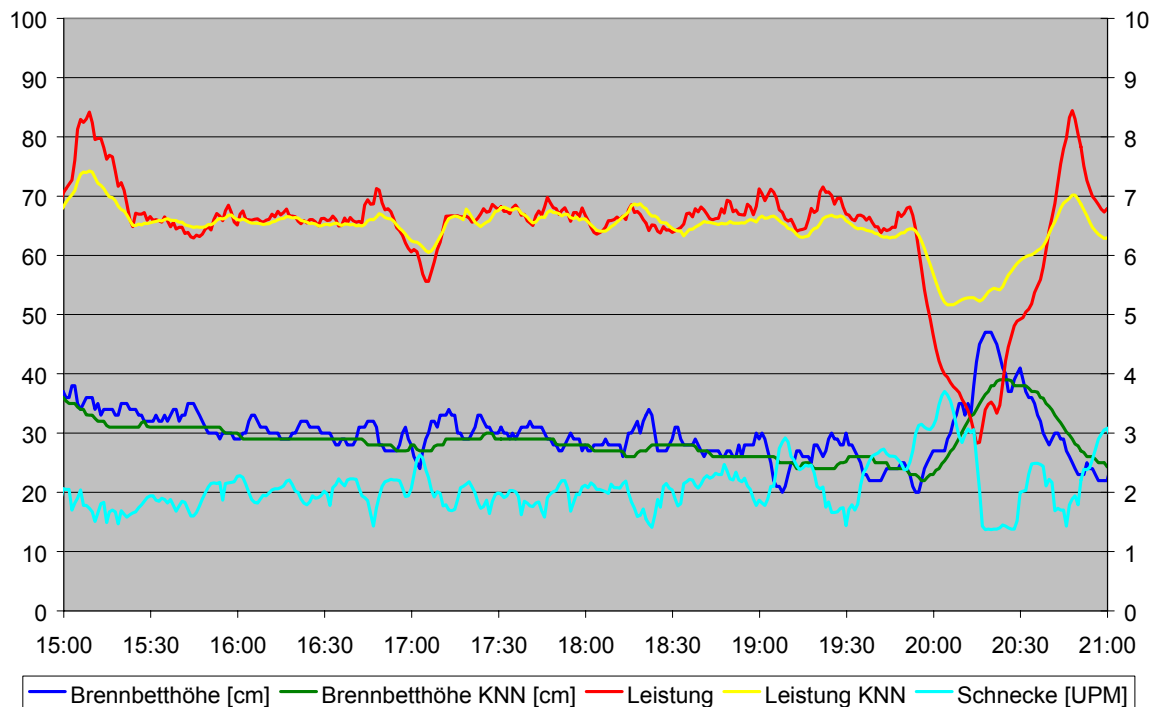


Abb. 11.1.1-2: Einsatz einer berechneten zukünftigen Regelabweichung

Anstatt der Verwendung der zukünftigen Regelabweichung wäre auch eine Verwendung der Tendenz denkbar. Dies würde die Problematik bei der Verwendung von Werten bei falsch berechneten Amplituden der Zukunftswerte verringern, wenn zumindest die richtige Tendenz angezeigt wird.

11.1.2 Totzeitkompensation

Ein weiterer Ansatz zu Verwendung der berechneten Zukunftswerte durch das KNN ist eine Totzeitkompensation. Das KNN gleicht die durch Brennstofftrocknung auftretende Totzeit von Veränderung der Beschickung bis zur Veränderung des Brennstoffumsatzes zumindest teilweise aus.

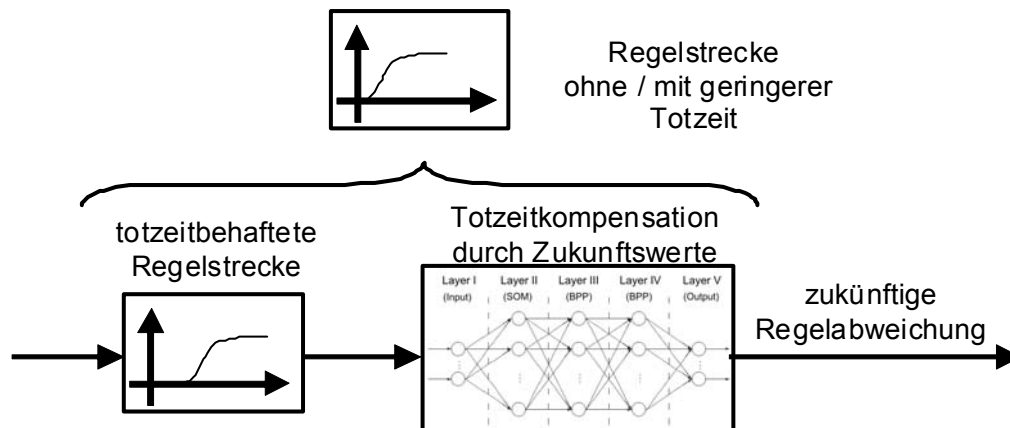


Abb.11.1.2-1: Konzept zur Totzeitkompensation durch das KNN

Die berechneten Zukunftswerte werden in diesem Fall direkt auf die bestehende (PID-) Regelung gegeben. Durch die Kompensation der Totzeit entsteht ein insgesamt schneller reagierendes System, für das auch ein schneller reagierender Regler genutzt werden kann. Eine Prüfung auf Zuverlässigkeit der Werte wie in Kap. 11.1 ist hier nicht möglich, da die Vorhersagewerte als Ist-Werte für die Regelung genutzt werden und nicht entfallen können.

Beim Versuchsbetrieb wurden die berechneten Zukunftswerte für Brennbetthöhe und Leistung auf die entsprechende Beschickungsregelung gelegt. Das Ergebnis ist in **Abb. 11.1.2-2** dargestellt. Befürchtete Instabilitäten durch Abweichungen der Vorhersage vom Ist-Wert traten nicht auf. Eine quantifizierbare Verbesserung ist jedoch ebenfalls nicht zu erwarten, da die Parameter des PID-Reglers nicht entsprechend verstärkt wurden. Insbesondere die Kurve der vorhergesagten Brennbetthöhe zeigt wieder das Verhalten des geglätteten Ist-Wertes ohne Zeitvorteil. Im Gegensatz hierzu ist bei der vorhergesagten Leistung ein leichter Zeitvorteil von etwa 3 Minuten erkennbar.

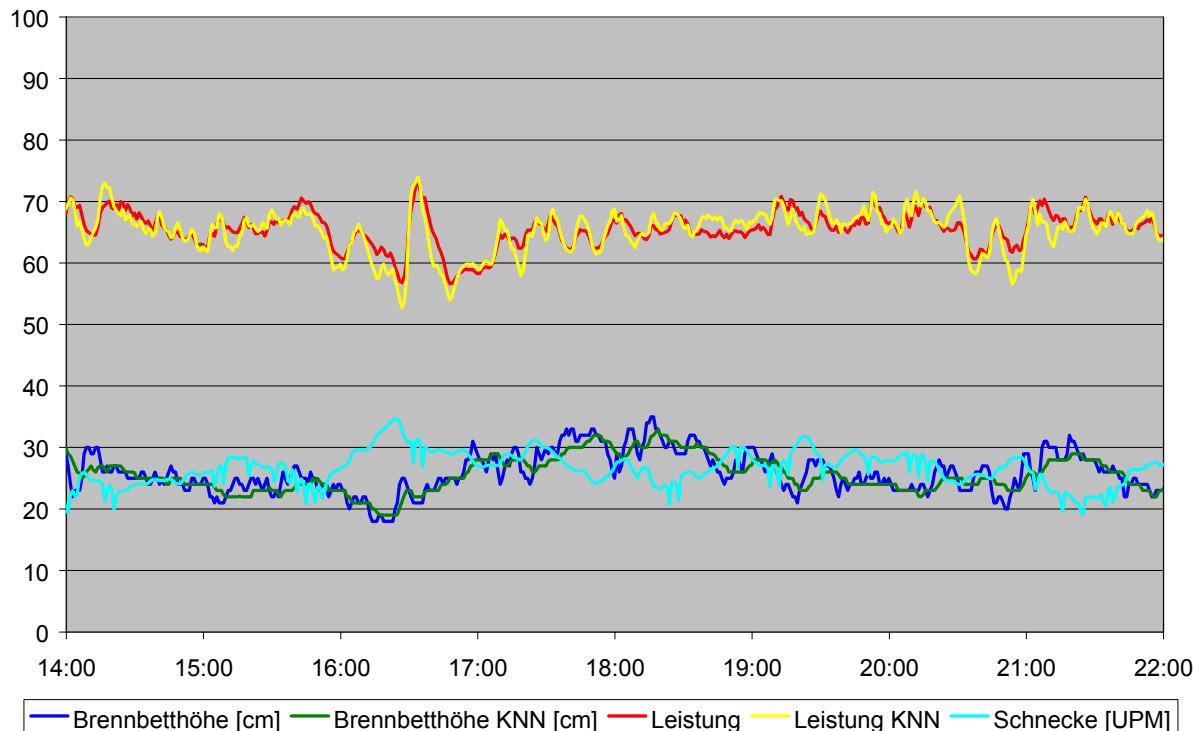


Abb. 11.1.2-2: Betrieb mit dem KNN zur Totzeitkompensation

11.2 Einsatz des Rostmodells im Prozessleitsystem der GKS

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

An der linken und rechten Seitenwand sind luftgekühlte Plattenlufffelder installiert.

Die Feuerungsanlagen sind mit einem Primärluft-, einem Sekundärluft- und einem Abgas-Rezirkulationsgebläse ausgestattet. Die Primärluftmenge wird aus dem Müllbunker angesaugt und druckseitig in den Unterwind- und den Plattenluftstrang aufgeteilt. Jedem Strang ist ein dampfbeheizter Luftvorwärmer zugeordnet. Der Unterwind wird in fünf Unterwindzonen verteilt und unter den Rost geführt (siehe **Abb. 11.2-1**).

Zusammenfassend gibt es somit kaum änderbare Größen (z.B. Feuerraumgeometrie) und betrieblich änderbare Größen (z.B. Unterwindmengen). Eine Übersicht liefert **Abb. 11.2-2**.

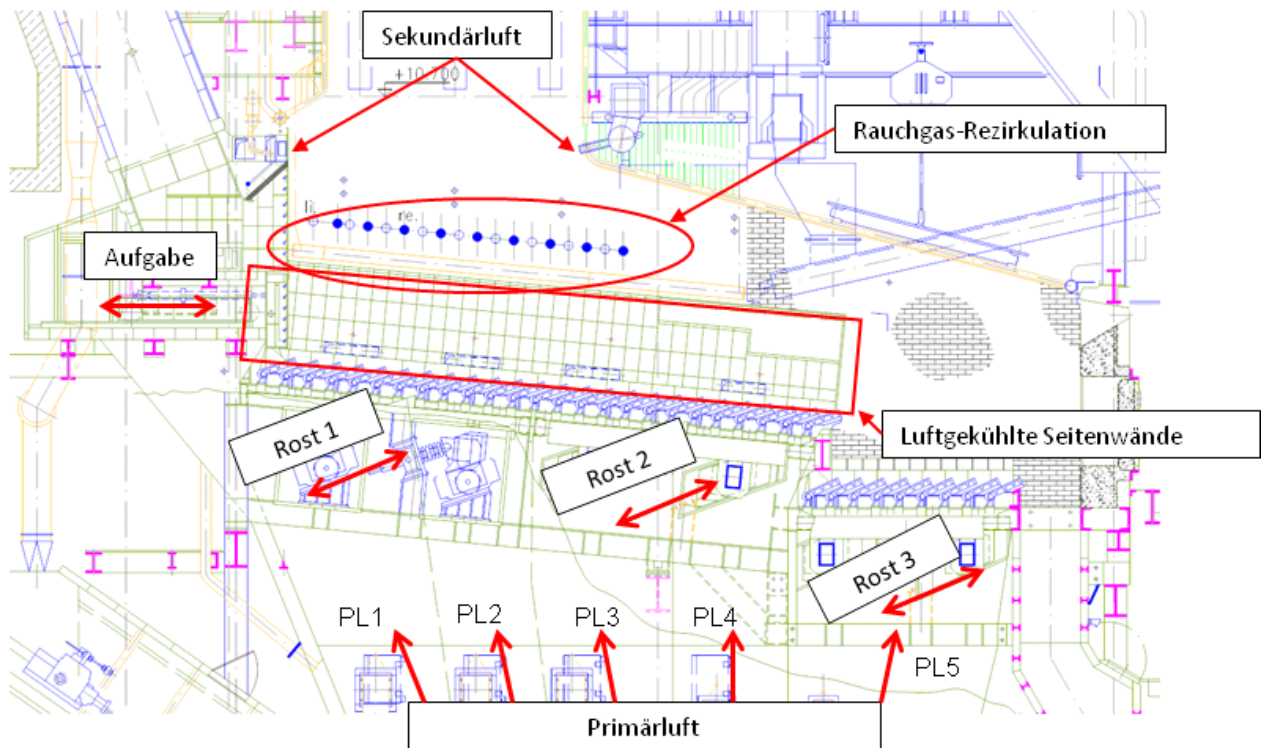


Abb. 11.2-1: GKS-Feuerraum mit Stellgrößen

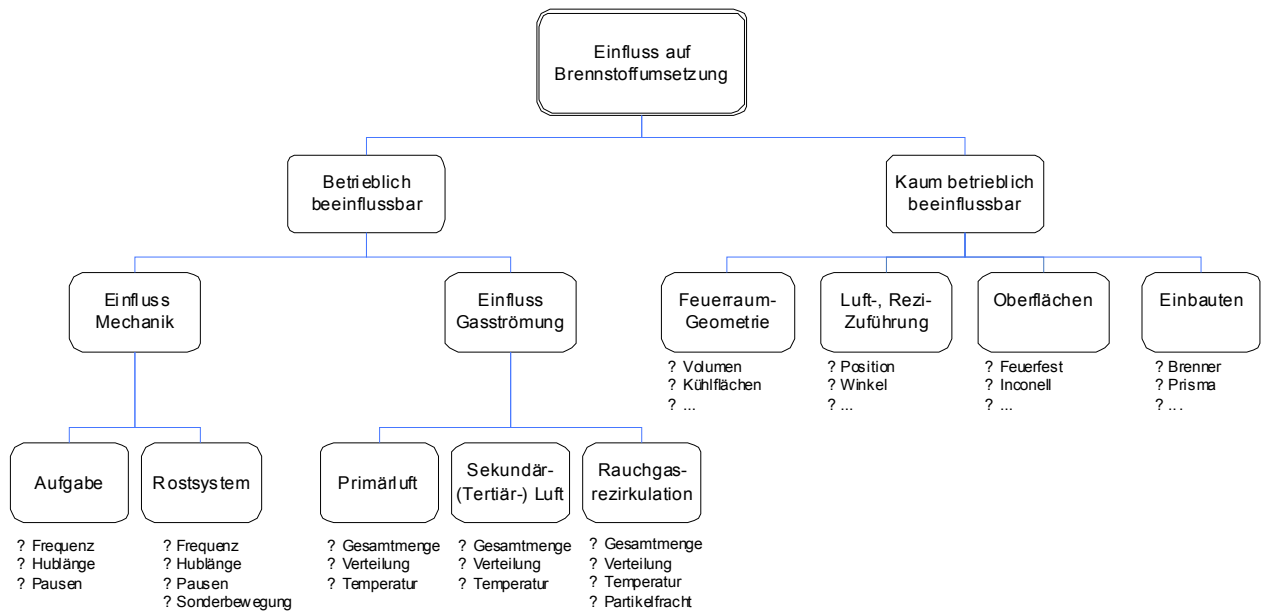


Abb. 11.2-2: Einflussgrößen auf die Brennstoffumsetzung

Mit den genannten Stellgrößen unter den gegebenen Randbedingungen soll das komplette Feuerungsleistungsdiagramm (s. **Abb. 11.2-3**) befahren werden können. Dies geschieht derzeit mit einem „Advanced Control System“ auf Basis einer PID-Regelung. Der Gütegrad der Regelung liegt im Bereich von +/- 3 % bezogen auf den Frischdampf-Massenstrom, was für

einen derart inhomogenen Brennstoff wie Müll ein ausgezeichneter Wert ist. Unabhängig davon kommen jedoch Zustände vor, in denen der Rost z.B. überschüttet wird. Dies geschieht insbesondere bei sehr stark schwankenden Heizwerten des Mülls. Um diese Fälle abzufangen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Möglichkeiten der Messung der Brennbetthöhe im GKS versucht. Keine dieser Methoden (z.B. Messung des Druckverlustes über der Brennbetthöhe, des Hydraulikdruckes der Rostwagen, der Roststabtemperatur) zeitigte einen messbaren Erfolg.

Um zusätzliche Informationen über die Vorgänge im Feuerraum zu erhalten, wurde ein Computer- Feuerungsmodell entwickelt, welches im Rahmen dieses Projektes zeitweise parallel zur realen Anlage betrieben wurde.

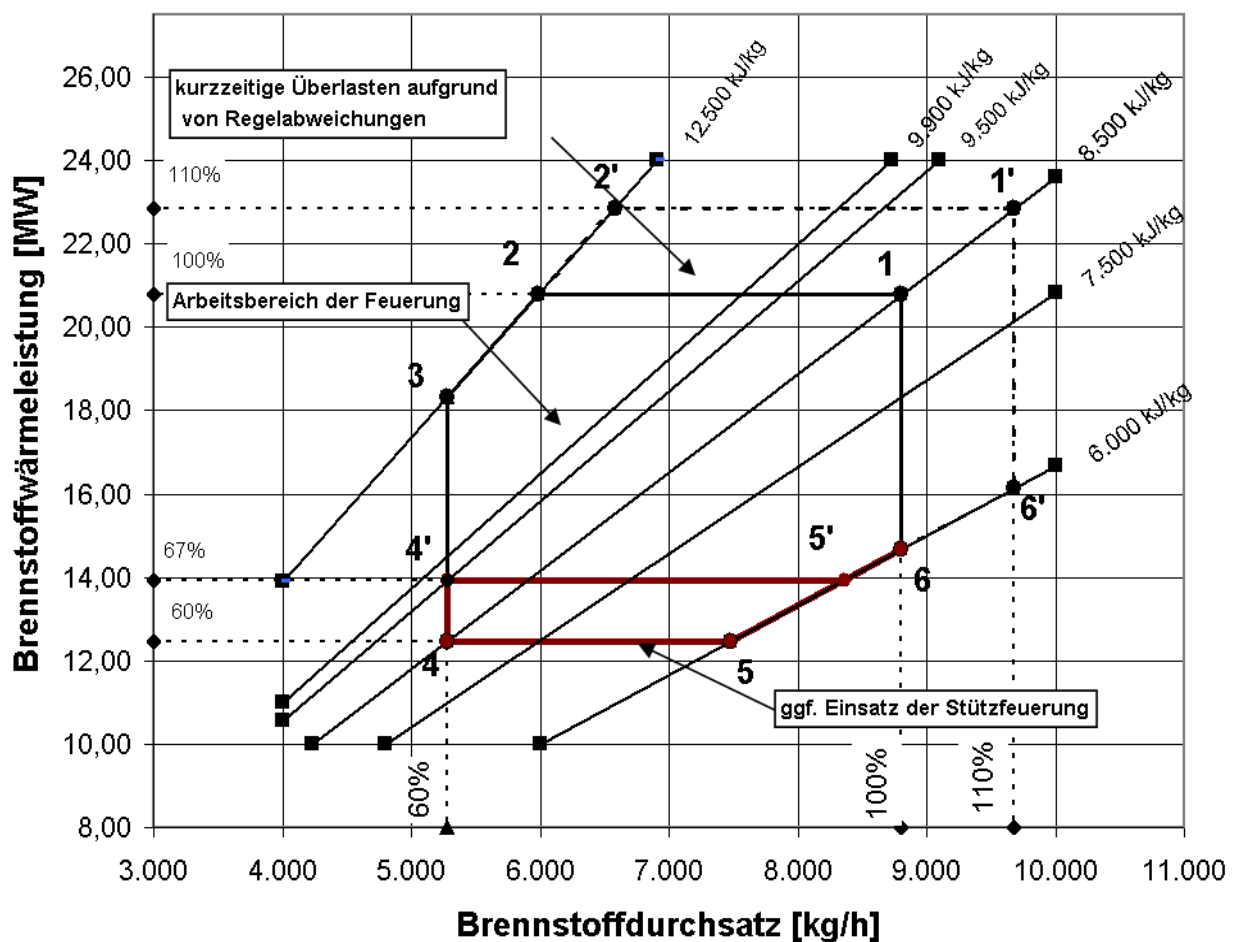


Abb. 11.2-3: GKS-Feuerungsleistungsdiagramm

Bestandteil des Feuerungsmodells sind die in **Abb. 11.2-4** dargestellten Sub-Modelle. Die Sub-Modelle bilden in ihrer Verknüpfung das gesamte Feuerungsmodell mit dem Namen „CombAte“. Die Bedienoberfläche des Gesamtmodells ist in **Abb. 11.2-5** dargestellt. Das Modell berechnet Vorgänge im Feuerraum mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100-facher Echtzeit. Es werden sowohl die Vorgänge der Feststoffe auf dem Rost (z.B. Transport, Mischung) wie auch die Umsetzung der Feststoffe (z.B. Trocknung, Freisetzung der Flüchtigen) dargestellt. Die Daten sind weitgehend an der Anlage im GKS validiert. Einzelne Verbesserungen müssen in den kommenden Monaten außerhalb des Projektes noch durchgeführt werden.

Die Ankopplung des Modells an die reale Anlage, um die Daten des Modells mit der realen Anlage zu vergleichen, wird über eine OPC-Kopplung erreicht (**Abb. 11.2-6**).

Zur Validierung des Feuerungsprogrammes „CombAte“ wurde diese Kopplung realisiert und Daten sowohl aus dem Programm sowie Daten aus der Leittechnik aufgezeichnet. Dabei wurden übergeben:

- Stellgrößen (von der Leittechnik an CombAte, z.B. Dampfleistung)
- Validierwerte (von der Leittechnik und von CombAte in die Archivierung, z.B. Feuerraumtemperatur)
- Zusatzwerte (von CombAte an die Archivierung, z.B. berechnete Schütthöhe).

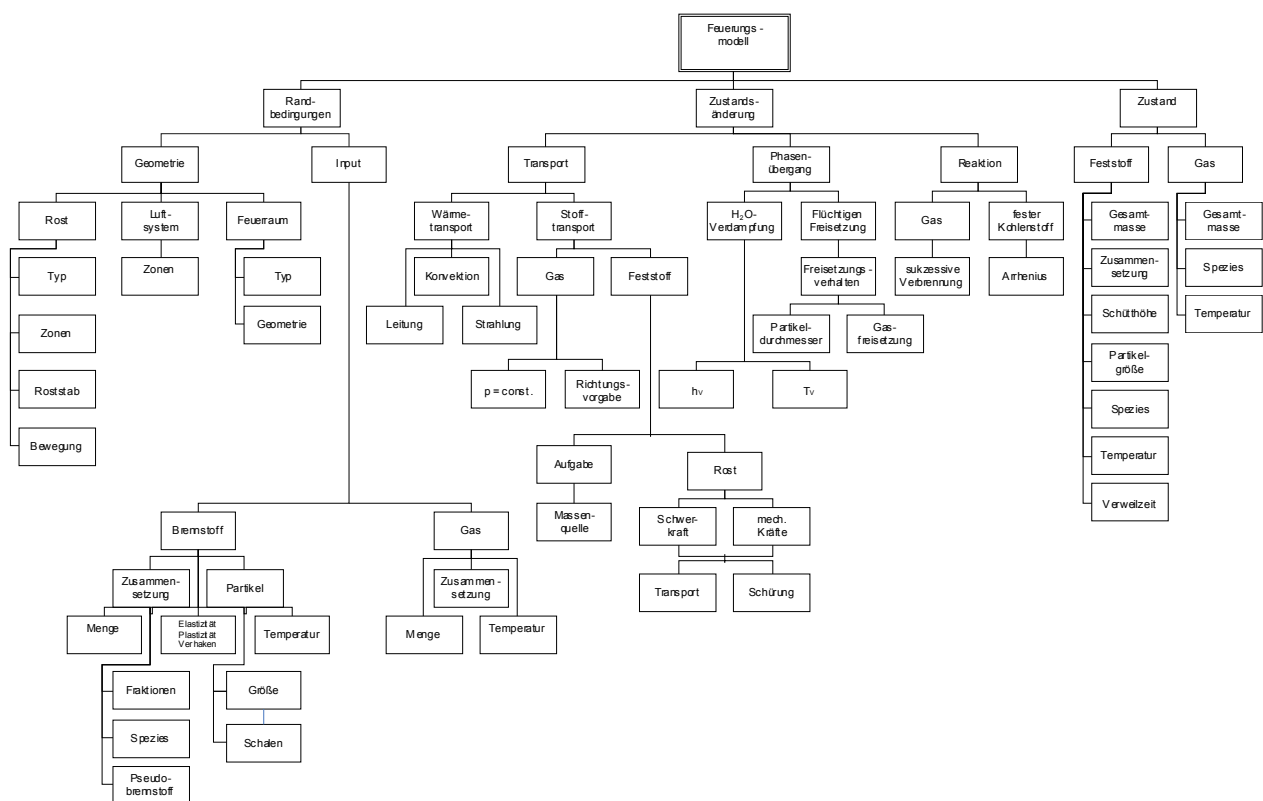


Abb. 11.2-4: Sub-Modelle des Feuerungsmodells

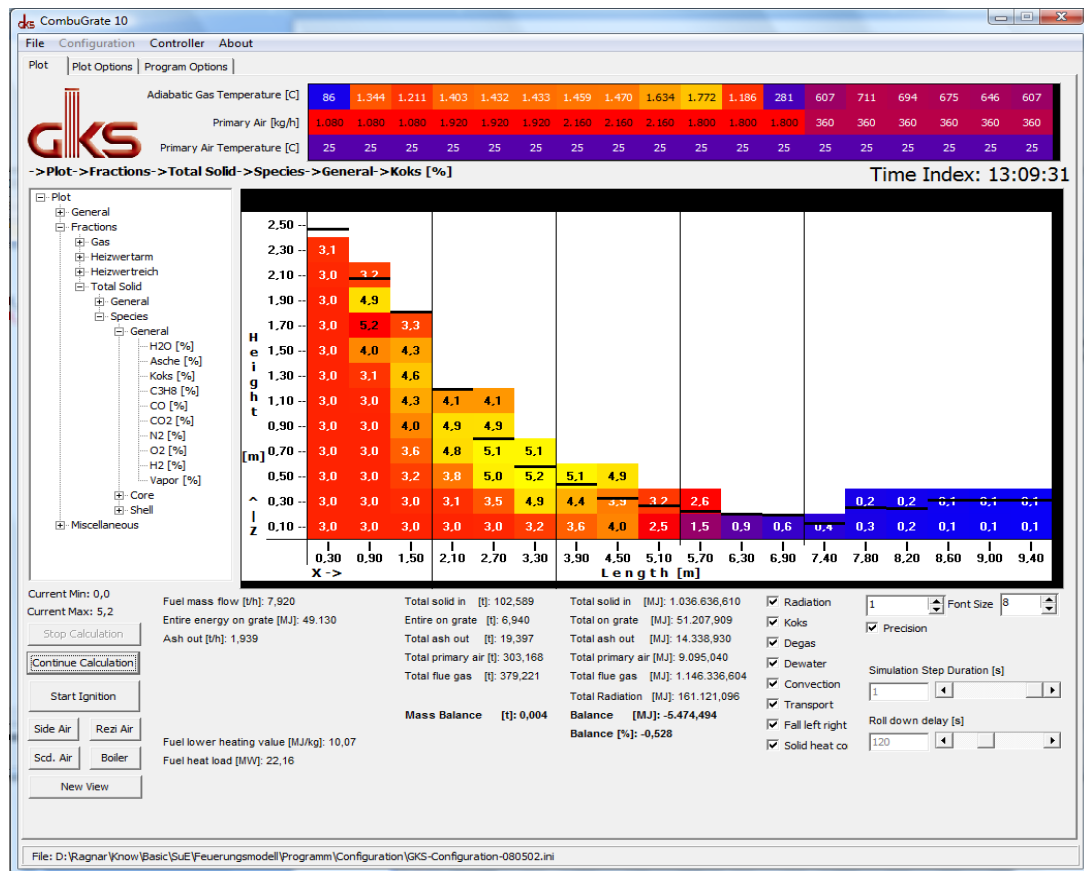


Abb. 11.2-5: Bedienoberfläche des Feuerungsmodells „CombAte“

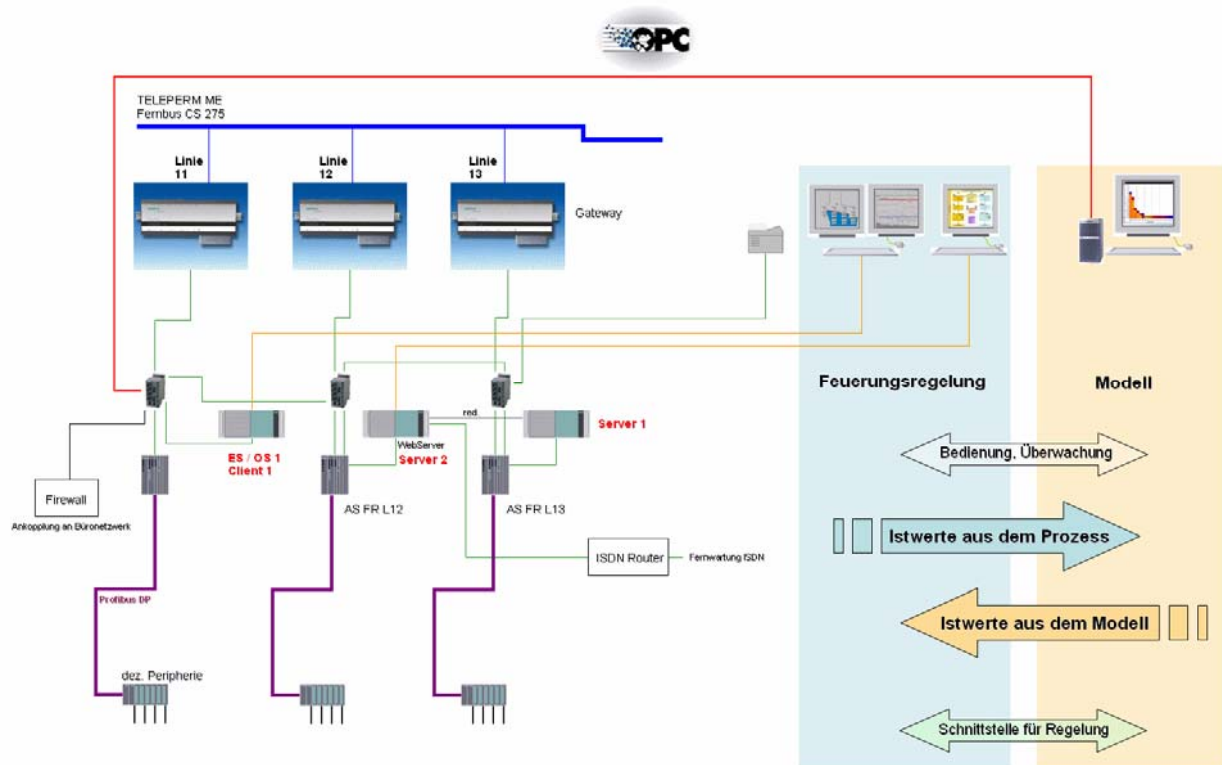


Abb. 11.2-6: Einbindung des Feuerungsmodells in die Leittechnik über OPC

In einem ersten Versuch wurde das Feuerungsmodell mit der Feuerungsregelung direkt gekoppelt. Die Kopplungswirkung des Feuerungsmodells und die entsprechende Ausregelung von Störgrößen im Modell durch die Feuerungsregelung zeigt Abbildung **Abb. 11.2-7**. Als Störgröße fungiert hier eine bleibende Regelabweichung durch Veränderung der Parameter der Rostgeschwindigkeit, die eine Schwankung der Dampfmenge zur Folge hat. In der Kopplung können die künstlich aufgeprägten Störgrößen sehr gut ausgeregelt werden. Sowohl PID-Regelung als auch Feuerungsmodell reagieren sehr gut und realistisch. Die Variation von Regelungsparametern ermöglicht somit auch die Optimierung der Feuerungsregelung im Vorfeld, vor der Applikation in der Anlage. Dies kann für den Anbieter von Feuerungsregelungen Zeit und Geld ersparen, sowie dem Betreiber kürzere Stillstandszeiten ermöglichen.

Abb. 11.2-8 zeigt einerseits den Vergleich von Mess- und Rechenwerten für die Dampfleistung und den Sauerstoffgehalt sowie die Zusatzwerte für den Heizwert und die Schichthöhe als Auswertung von verschiedenen Tagen.

Dampfleistung und Sauerstoffgehalt liegen weitgehend eng zusammen (**Abb. 11.2-8**). Dadurch, dass im Modell die glättende Wärme-Speicherwirkung des Kessels noch nicht berücksichtigt ist, kann hier sicher noch eine Verbesserung in den Berechnungen erreicht werden, wenn dieser Effekt berücksichtigt wird.

Der Heizwert und die Schichthöhe können nicht direkt validiert werden, da hierfür noch die Messgrößen fehlen. Allerdings bewegt sich der Heizwert im realistischen Bereich.

Die Schichthöhen werden über den einzelnen Unterwindzonen in **Abb. 11.2-9** dargestellt. Die erkennbaren periodischen Schwankungen sind auf die Rostbewegung zurückzuführen, die auch in der Anlage beobachtet werden kann. Die Schichthöhen konnten durch Augenschein im Rahmen der möglichen Abschätzungen (Vergleich mit Höhenkoten an den Seitenwänden) als realistisch eingeschätzt werden.

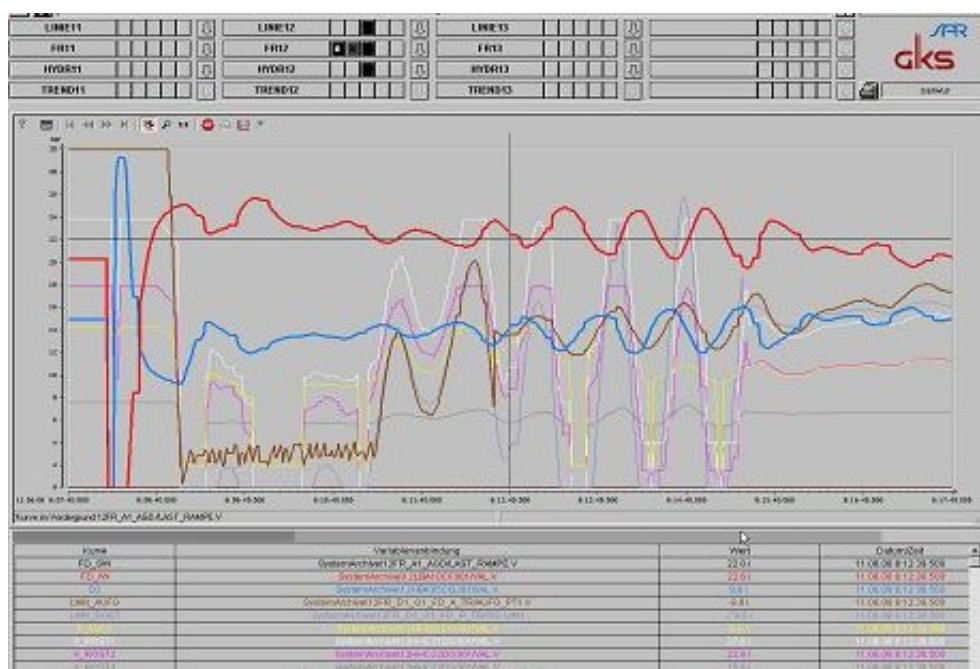


Abb. 11.2-7: Ergebnisse vom 20.05.2008 im Rahmen der Kopplung des Feuerungsmodells mit der Feuerungsregelung unter Einwirkung künstlicher Störgrößen

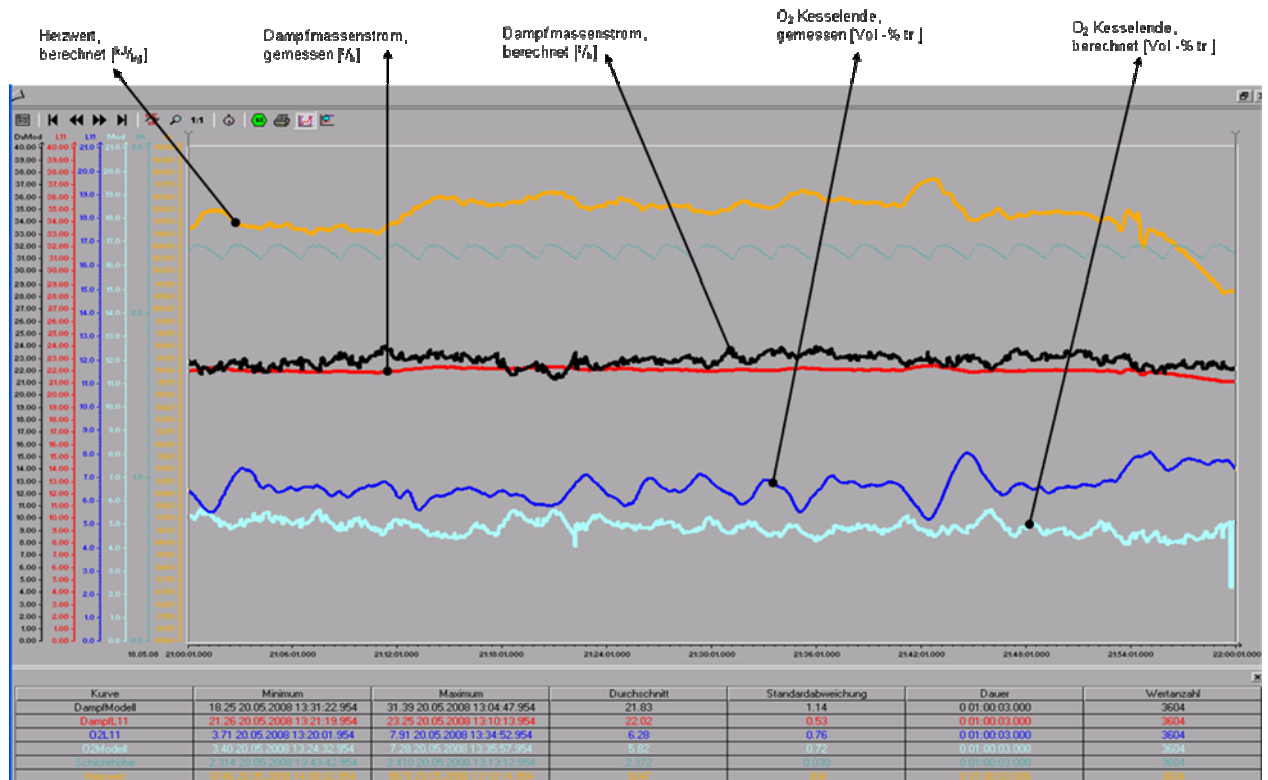


Abb. 11.2-8: Ergebnisse vom 18.05.2008

Beispielhafter Schichthöhenverlauf über 12 Stunden (vom Modell gerechnet) :

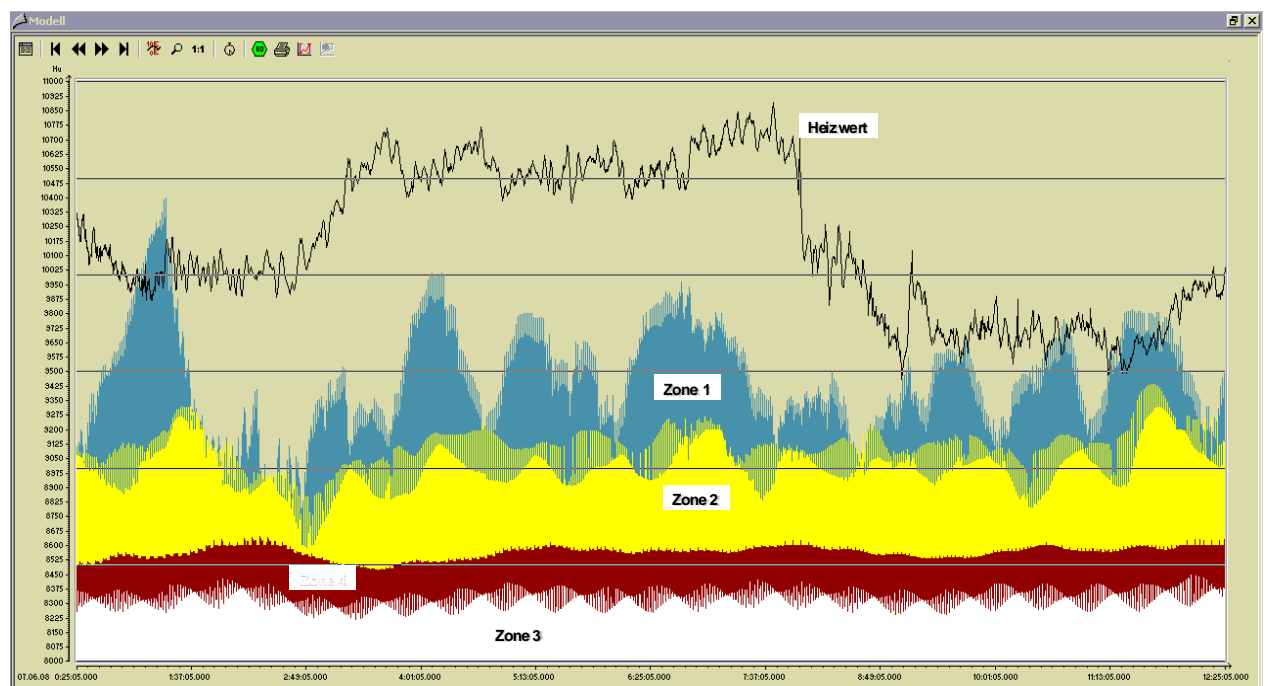


Abb. 11.2-9: Durch das Modell berechneter Schichthöhenverlauf über der Zeit

Abb. 11.2-10 zeigt die Möglichkeit der unkomplizierten Einbindung einer zusätzlichen Regelgröße (z.B. der Schichthöhe) in die PID-Feuerungsregelung. Somit kann die vom Feuerungsmodell berechnete Schichthöhe direkt in der PC-S7-Steuerung der Feuerungsregelung integriert werden. Die Realisierung dieser Einbindung konnte im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt werden.

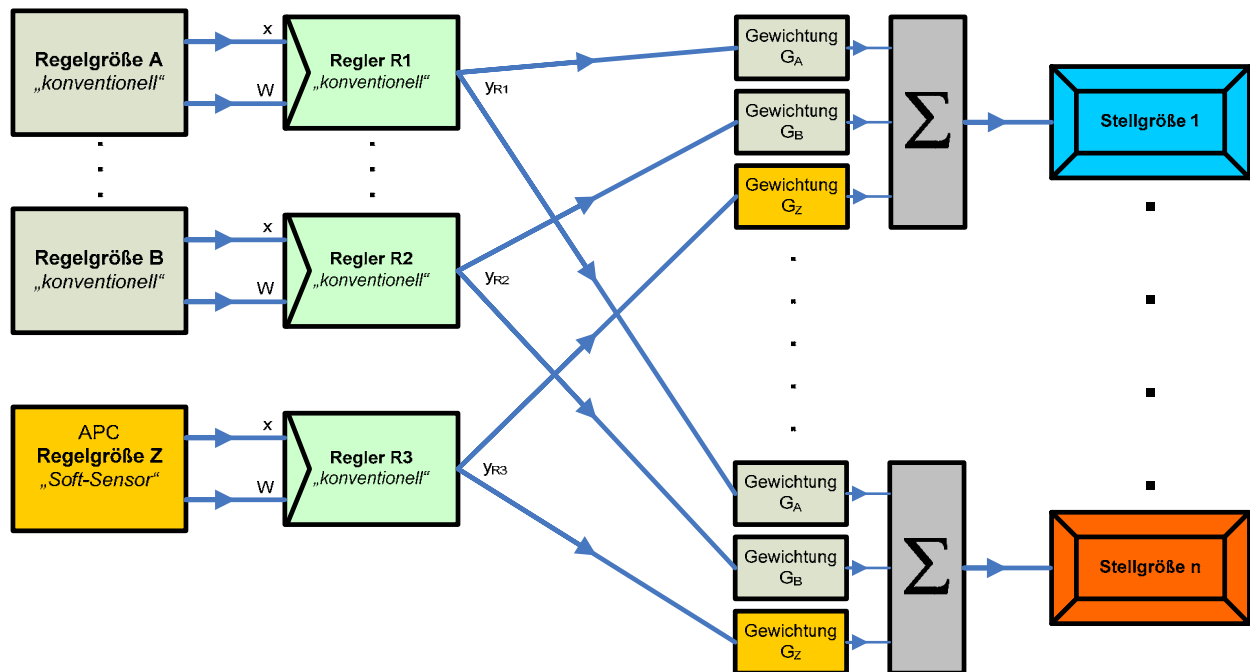


Abb. 11.2-10: Einbindung zusätzlicher Regelgrößen in die PID-Regelung

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass das Modell eine sehr gute Wiedergabe der realen Anlage ermöglicht. Darüber hinaus zeigt die Software-Kopplung zwischen Feuerungsmodell und der realen Feuerungsregelung ein reales und plausibles Verhalten. Die Validierung der Schichthöhen muss noch verbessert werden.

Alles in Allem sind die Ergebnisse sehr ermutigend und müssen in der Folge weiter validiert werden. Die Modell-basierte Feuerungsregelung eröffnet erhebliche positive Möglichkeiten, die von einem besseren Verständnis des Prozesses bis hin zu einem Abfangen von nicht messbaren Anlagenzuständen reichen. Der Vorteil des MBC (**m**odel **b**ased **c**ontrol) liegt in der Erfassung von energetischen und massenbehafteten Quellen und Senken im Brennbett, die von den anderen Systemen nicht bereitgestellt werden können.

12 Ansätze zur Ergebnisverbesserung

Insbesondere der Versuch zum PID-Regler mit Parameteranpassung zeigte, dass die Reglerparameter noch optimierungsfähig sind. In **Abb. 9.3-4** ist das Verhalten des Reglers bei nassem Brennstoff dargestellt. Hierbei treten sehr große Schwankungen der Drehzahl der Beschickschnecke auf. Dies deutet auf eine zu groß gewählte Reglerverstärkung hin. Durch Veränderung der Reglerstruktur und Anpassung der Parameter ließe sich ein solches schwingendes Verhalten vermeiden.

Spezifisch für die Technikumsanlage könnte eine weitere berechnete Größe, die Rostlaufzeit (**s. Abb. 12-1**), als Maß für die umsatzfähige Menge Brennstoff auf dem Rost genutzt werden.

Diese Größe deutet schon vor einer wesentlichen Veränderung der Leistung auf diese hin. Bei Brennstoffmangel findet eine ständige Schübbewegung statt (Rostlaufzeit = 1), während bei zu viel Brennstoff der Rost möglichst lange stillsteht (abhängig von max. Stillstandsdauer = 0,2..0,3).

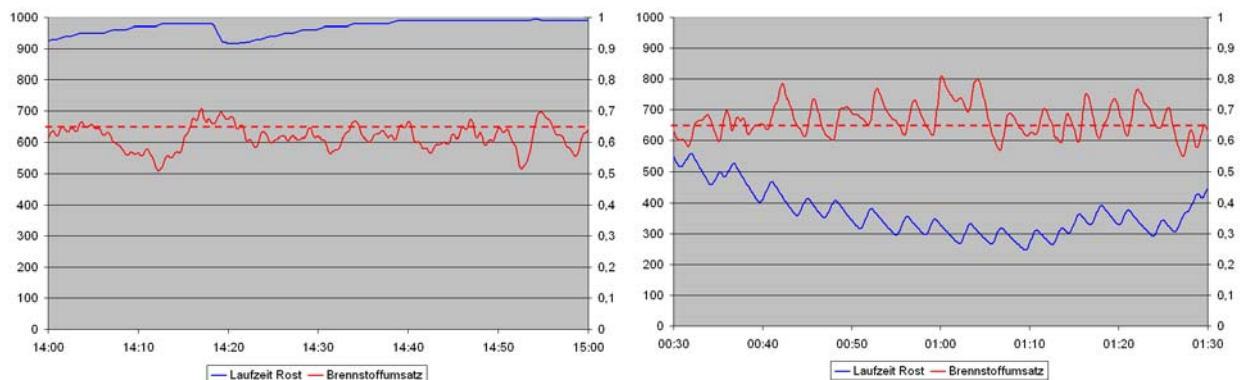


Abb. 12-1: Rostlaufzeit als Maß für den umsatzfähigen Brennstoff auf dem Rost,
- links: zu wenig, rechts: zu viel -

Erweiterungen der Reglerstruktur ließen sich insbesondere bei der Verwendung von Fuzzy-Logic durchführen, um bestimmte wiederkehrende Situationen auf dem Rost zu erkennen und eine richtige Reaktion einzuleiten.

Weiterhin ist zu beachten, dass das Vorhaben einen vorwettbewerblichen Charakter besitzt. Für eine kommerzielle Anwendung lassen sich Vorschläge zur Verbesserung machen zu:

- **Fuzzy-Regelung:** Erweiterung der Regelsätze zur Steigerung der Anzahl abgedeckter verfahrenstechnischer Situationen.
- **Adaptiver Regler:** - Erkennung der Brennstoffqualität verbessern.
- Reglerparameter für verschiedene Brennstoffqualitäten verbessern.
- **Prädiktiver Regler:**
 - Implementierung von individuellen Netzen für einzelne vorherzusagende Größen
 - Verbesserte Behandlung seltener Betriebszustände
 - Einsatz des KNN in Großanlagen als Vorhersagemodul
 - Kombination vom Adaptiven Regler mit dem KNN.

13 Industrielle Anwendbarkeit der Ergebnisse

Die Implementierung von PID und Fuzzy Logic als Regelungskonzepte auf einer Technikumsanlage war die notwendige Voraussetzung zur Erreichung der Projektziele. Beide Systeme sind Stand der Technik; im Rahmen des Vorhabens wurde keine Verbesserung erzielt und auch nicht beabsichtigt.

Herausgearbeitet wurde an verschiedenen Stellen die hohe Bedeutung schneller Signale (z.B. IR-Pyrometer → *Wärmeentwicklung* und -kamera → *Brennbettlage*) für die Güte der Regelung. Die Anpassung eines Radarmessgerätes zur Bestimmung der Brennbetthöhe ist als innovativ zu bezeichnen. Die Prüfung der Einsatzfähigkeit in kommerziellen Anlagen verdient Beachtung.

Die guten Ergebnisse des Adaptiven Reglers geben Anlaß, dieses System in der Müllverbrennung verstärkt auf seine Einsatzmöglichkeiten zu prüfen.

Für die Müllverbrennung interessant, aber derzeit am wenigsten konkret umsetzbar sind die Ergebnisse zum KNN. So zeigte der Versuch, dieses Konzept als Regler einzusetzen, dass ein hohes Risiko für die Anlagensicherheit besteht. Es ist eine hohe Zahl an Anlagenzuständen, besonders im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb notwendig, um das System anzulernen. Treten im Betrieb Umstände ein, welche nicht bekannt sind, so kann das System zwar auf bekannte ähnliche Zustände schließen, aber daraus völlig falsche Signale für die Aktorik ableiten. Ein erneuter Versuch, ein Reglersystem aus dem im weiteren Projektverlauf verbesserten KNN zu entwickeln, scheiterte an der zu geringen Anzahl der Versuchswochen.

Der Aufbau des KNN mit den Modulen SOM und BBP zeigte für alle betrachteten Müllverbrennungsanlagen gute Ergebnisse hinsichtlich einer Trendanalyse für bestimmte verfahrenstechnische Größen. Mit der Aufteilung in Unternetze für schnelle und langsame Signale sowie der eingesetzten Seltenheitsanalyse ließen sich zuverlässige Voraussagen für Parameter wie die Wärmefreisetzung bzw. Dampfmenge oder den O₂-Wert erzielen. Die Vorgehensweise ist neu beim Einsatzfall der Müllverbrennung.

Die Kopplung des PID mit dem KNN als Trendanalyse („*Prädiktiver Regler*“) und dem Blick in die Zukunft über einen Zeitraum von ca. 3 Minuten verbesserte die Regelungsgüte an der Technikumsanlage. Wegen des Nachweises, dass das KNN mit der aufgezeigten Struktur auch für Großanlagen nutzbar ist, sollte eine schnelle Anwendung in kommerziellen Anlagen möglich sein. Optimale Ergebnisse sind zu erwarten, wenn das KNN mit dem Adaptiven Regler gekoppelt würde. Der Nachweis innerhalb des Vorhabens war leider aufgrund des nahenden Projektendes nicht mehr möglich.

Aufgrund der Vorgaben der AiF wurde darauf geachtet, dass alle Ergebnisse einen vorwettbewerblichen Charakter besitzen und keine kommerziellen Produkte geschaffen werden. Mit den aufgezeigten Regelungskonzepten und den Empfehlungen für den Aufbau des KNN sollte für Fachfirmen aber eine schnelle Anwendbarkeit gegeben sein.

14 Danksagung

Das Vorhaben ermöglichte die **AiF** - *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.* (Köln) unter dem Förderkennzeichen 14557 N durch ihre finanzielle Förderung. Als AiF-Mitgliedsvereinigung unterstützte die *VGB-Forschungsstiftung* (Essen) das Zustandekommen des Vorhabens unter der VGB-Nr. 271 fachlich und verwaltungstechnisch.

Vom organisatorischen Blickwinkel aus ist zu bemerken, dass die Zusammenarbeit der Forschungsstelle mit den Mitgliedern des PA konstruktiv funktionierte. Der Erfolg des Vorhabens wäre ohne den fachlichen Input, die Audits sowie die sachliche und finanzielle Unterstützung durch die beteiligten Unternehmen nicht möglich gewesen.

Die Forschungsstelle dankt allen genannten Institutionen und den beteiligten Personen.

15 Unterschrift

Clausthal-Zellerfeld, den 31.07.2008

Ort, Datum



Dr.-Ing. Stefan Vodegel

16 Projektspezifische Veröffentlichungen

- [1] Vodegel, S.; Reuter, M.; Davidovic, M.; Harpeng, J.; Reindorf, T.; Tadjine, H.; Tölle, R.; Knapp, P.; Schreiner, R.: *Innovative Regelungssysteme für Rostfeuerungen*; in *Optimierung der Abfallverbrennung 3*; Hrsg: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Beckmann, M.; TK Verlag, Neuruppin 2006; ISBN 3-935317-21-2
- [2] Vodegel, S.; Reuter, M.; Davidovic, M.; Tadjine, H.; Tölle, R.; Knapp, P.; Schreiner, R.: *Innovative Regelungssysteme für Rostfeuerungen*; VDI-FA-Sitzung *Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung*, Neumünster, 03+04.05.2006
- [3] Vodegel, S.; Reuter, M.; Davidovic, M.; Harpeng, J.; Reindorf, T.; Tadjine, H.; Tölle, R.; Knapp, P.; Schreiner, R.: *Optimierte Ausbeute*; Müllmagazin, Juni 2006, S. 16-21
- [4] Tadjine, H.; Reuter, M.; Vodegel, S.: *Control of Combustion Based on Neuro-Hybrid Model*; International Conference on Information & Communication Technologies: From Theory to Applications; 24-28. April 2006, Damaskus (Syrien), ISBN 0-7803-9521-2, IEEE Catalog Number 06EX1220
- [5] Goronczy, A.; Vodegel, S.; Tölle, R.; Knapp, P.; Schreiner, R.: *Vergleich und Entwicklung innovativer Regelungssysteme für Rostfeuerungen*; VDI-FA-Sitzung *Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung*, Leverkusen, 12.+13. März 2007
- [6] Goronczy, A.: *Grundlagen konventioneller und neuer Feuerungsregelungen*; VDI-Wissensforum *Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in Großanlagen*, Frankfurt, 12.+ 13. Juni 2007
- [7] Birkenfeld, S.; Reuter, M.; Vodegel, S.: *Modellprädiktive Regelung von Müllverbrennungsanlagen mit neuronalen Netzen*; 11. Workshop ‚Modellierung und Simulation von Ökosystemen‘, Gesellschaft für Informatik, Fachausschuß 4.6.3, ASIM-Fachgruppe SUGMB, Kölpinsee / Usedom 2007
- [8] Goronczy, A.; Vodegel, S.: *Vergleichende Untersuchung der Feuerungsregelung mit Fuzzy, PID und Künstlichen Neuronalen Netzen*, VDI-Wissensforum *Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in Großanlagen*, Oberhausen, 12+13. Juni 2008
- [9] Goronczy, A.; Vodegel, S.: *Innovative Regelungssysteme für Rostfeuerungen*; VGB-Konferenz *Thermische Abfallbehandlung 2008*, Fellbach, 17.+18. Juni 2008
- [10] Birkenfeld, S.: *Prediction of waste incinerators' operating conditions with neural networks*; World Automation Congress, ISSCI, Waikoloa / USA 2008