

# Regelungstechnik für die Hausheizung der Zukunft

Untersuchungen zur Regelung von Biomasse-  
Feuerungen zur emissions- und effizienzoptimierten  
Beheizung von Wohn- und Bürobauten

R. Padinger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**5/2002**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>  
oder unter:

Projektfabrik Waldhör  
Nedergasse 23, 1190 Wien  
Fax 01 /36 76 151 - 11  
Email: projektfabrik@nextra.at

# Regelungstechnik für die Haustechnik der Zukunft

Untersuchungen zur Regelung von Biomasse-  
Feuerungen zur emissions- und effizienzoptimierten  
Beheizung von Wohn- und Bürobauten

Auftragnehmer: Joanneum Research

Autor: Reinhard Padinger  
Joanneum Research  
Institut für Energieforschung

In Zusammenarbeit und mit Unterstützung von  
Fa. Herz-Feuerungstechnik Ges.m.b.H., Sebersdorf

Graz, Dezember 2001





## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der zweiten Ausschreibung der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie *Haus der Zukunft* intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept soll eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger, nachwachsender und ökologischer Rohstoffe, sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten und Nutzerakzeptanz bei vergleichbaren Kosten zu konventionellen Bauweisen erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizientem Bauen und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit dem Forschungsförderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie auch in der Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret" publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse [www.hausderzukunft.at](http://www.hausderzukunft.at) dem Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Abstract .....	5
Kurzfassung.....	6
Summary .....	8
1. Einleitung und Projektziel .....	10
2. Aufbau eines Regelungs-Versuchsstands mit Gebäudesimulator.....	13
2.1 Integration der Versuchsfeuerungsanlage .....	13
2.2 Adaptierung des Regelungs-Versuchsstands zur Realisierung einer optimierten Verbrennungsregelung.....	15
2.3 Eigenschaften der Versuchsfeuerungsanlage .....	19
2.4 Adaptierung des Regelungs-Versuchsstands zur Realisierung einer optimierten Leistungsregelung.....	25
3. Test und Optimierung der Verbrennungsregelung .....	27
3.1 Regelungstechnisch relevante Vorgänge bei der Verbrennungs- regelung einer Biomassefeuerung .....	27
3.1.1 Betriebscharakteristik von Biomassefeuerungen .....	27
3.1.2 Regelungstechnisch relevant chemische Reaktionen .....	30
3.1.3 Regelungstechnisch relevante physikalische Abläufe.....	35
3.2 CO-Minimierung durch Verbrennungsregelung .....	36
3.2.1 Betriebscharakteristik der Versuchsfeuerungsanlage .....	36
3.2.2 CO-Minimierung über CO-Sensor .....	36
3.2.3 CO-Minimierung über CO-Sensor und Lambda-Sonde.....	38
3.2.4 CO-Minimierung über CO-Sensor und Brennkammertemperatur .....	40
3.2.5 CO-Minimierung über CO-Sensor und Brennstoffmenge.....	46
3.3 NO <sub>x</sub> Minimierung durch Verbrennungsregelung .....	49

4.	Test und Optimierung der Leistungsregelung .....	52
4.1	Regelungstechnisch relevante Vorgänge bei der Leistungsregelung .....	52
4.2	Algorithmen zur Leistungsregelung .....	53
4.2.1	Proportionalregelung der Kesseltemperatur.....	54
4.2.2	„PID“-Regelung der Kesseltemperatur .....	56
4.2.3	„PID“-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauftemperatur.....	57
4.2.4	„PID“-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauftemperatur und der Brennkammertemperatur.....	61
4.3	Einfluss der Betriebsart der Feuerung auf den Jahresnutzungsgrad der Gebäudeheizung .....	63
4.4	Betriebesergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Beheizung eines simulierten Gebäudes .....	69
5.	Einsatz einer Combustion-Control-Unit .....	73
6.	Verringerung des Energieeinsatzes im „Haus der Zukunft“ durch Fernkontakt .....	77
7.	Empfehlungen für die „Hausheizung der Zukunft“ .....	79
8.	Ergebnisverwertung und mögliche weiterführenden Arbeiten .....	80
9.	Zusammenfassung.....	82
10.	Literatur .....	103
9.1	Zitierte Literatur .....	103
9.2	Weiterführende Literatur zum Thema Verbrennungsregelung .....	104
11.	Anhang.....	108
11.1	Schaltplan zur Beschaltung des CO-Sensors FIGARO TGS 816 .....	108
11.2	Beschreibung der verwendeten Analysatoren und Messgeräte.....	108
11.3	Berechneter Wärmebedarf des „Hauses der Zukunft“ (Szenario aus /4/) .....	112
11.4	Technische Informationen zur Combustion-Control-Unit .....	113



## **ABSTRACT**

Durch Optimierung der Regelung können Schadstoffemissionen und Energieverluste bei Biomassefeuerungen erheblich verringert werden. Zunächst wurden die diesbezüglichen Möglichkeiten unter Zugrundelegung des zeitlichen Verlaufs des Wärmebedarfs eines „Hauses der Zukunft“ im praktischen Versuch an einer 50 kW-Hackgutfeuerung analysiert. Aufgrund der Ergebnisse wurde ein Regelungssystem entwickelt, das den Anlagenbetrieb sowohl im Hinblick auf geringe Schadstoffemissionen (Verbrennungsregelung) als auch im Hinblick auf größtmöglichen Nutzungsgrad (Leistungsregelung) optimiert. Für dieses Regelungssystem wurde eine kompakte Einheit (Combustion Control Unit, „CCU“) konzipiert, die in unterschiedlichen Biomassefeuerungen eingesetzt werden kann.

## **ABSTRACT**

*With optimized control systems a considerable reduction of harmful emissions and energy losses in biomass furnaces is possible. These possibilities have been analyzed in a 50 kW wood chip boiler for the time-dependent heat demand of a „Building of Tomorrow“. Based on the results, an optimized control system for a biomass furnace has been developed and tested. The control system is capable of reducing emissions (combustion control) while minimizing energy losses (power control) of the furnace. For this control system a compact combustion control unit („CCU“) has been designed, which may be integrated in different wood chip boilers.*

## **KURZFASSUNG**

Die Nutzung von Biomasse, zur Erzeugung von Raumwärme gehört zu den wichtigsten Elementen des „nachhaltigen Wirtschaftens“. Voraussetzung für den Einsatz dieses Energieträgers sind optimierte Verbrennungsanlagen mit hoher Effizienz und geringen schädlichen Emissionen. Aufgrund der aktuellen Einschätzung der Bedeutung der Biomasse in der Raumwärmeversorgung ist zu erwarten, dass automatisch beschickte Biomassefeuerungen bei der Beheizung des „Hauses der Zukunft“ eine wichtige Rolle spielen werden. Im größeren Leistungsbereich (ab etwa 300 kW) sind bereits automatisch beschickte Feuerungsanlagen mit hoher Effizienz und geringen Emissionen verfügbar. Diese Anlagen sind verfahrenstechnisch optimiert und mit fortschrittlichen, emissionsgeführten Regelungssystemen ausgestattet. Die dabei eingesetzten Techniken zur Verbrennungsoptimierung sind jedoch für den Einsatz in kleineren Feuerungsanlagen im Allgemeinen zu teuer. Darüber hinaus erfüllen diese Techniken im Allgemeinen nicht die spezifischen Anforderungen von Gebäuden mit niedrigem Leistungsbedarf. Es bestand somit der Wunsch, an den Bedarf des „Hauses der Zukunft“ angepasste und optimierte Biomassefeuerungen mit einem Regelungssystem, das sowohl in Hinblick auf die Verbrennungsregelung an sich wie auch in Hinblick auf die Regelung des gesamten Heizsystems den Anforderungen des „Hauses der Zukunft“ entspricht, zu entwickeln. Ziel des Projekts war daher die Durchführung grundlegender Untersuchungen zum Einsatz einer solchen Regelung für Kleinfeuerungsanlagen als Basis für eine Produktentwicklung, die in einem nachfolgenden Entwicklungsvorhaben erfolgen soll. Dieses Ziel konnte erreicht werden.

Die entwickelte Regelung erfüllt folgende Anforderungen:

- Optimierende Verbrennungsregelung mit ständiger Kontrolle der Verbrennungsgüte nach dem Vorbild der Regelung von Großfeuerungsanlagen und
- Leistungsregelung unter optimaler Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des „Hauses der Zukunft“.

Die Regelung ist grundsätzlich für automatisch beschickte Holzhackgut- oder Pelletfeuerungen wie auch für Stückholzfeuerungen geeignet. Sie weist in Bezug auf die Stellglieder (Brennstoffzuführungseinrichtungen, Ventilatoren, Mischventile, etc.) eine hohe Flexibilität auf und ist geeignet, verschiedene Regelungsprogramme zu

speichern, die an die spezifischen Bedingungen verschieden ausgeführter Feuerungen angepasst sind. Sie hat den Charakter einer „Black Box“, an die verschiedene Feuerungen und Komponenten der Hausheizung angeschlossen werden können, und die schließlich mit Hilfe ihrer eingespeicherten Programme die optimale Regelung von Heizsystemen für das „Haus der Zukunft“ übernimmt.

Das Projekt umfasste die folgenden Arbeitsschritte:

- Anpassung von vorhandenen Einrichtungen zum Aufbau eines Regelungs-Versuchsstandes für verschiedene Versuchsfeuerungsanlagen mit programmierbarer Wärmesenke („Gebäudesimulator“),
- Test und Optimierung der Verbrennungsregelung anhand einer ausgewählten Feuerungsanlage,
- Test und Optimierung der Leistungsregelung anhand eines simulierten Referenzgebäudes und
- Zusammenstellung von Empfehlungen für die optimale Ausführung der Heizungsregelung für das „Haus der Zukunft“.

Die Ergebnisse des Projekts sind experimentell überprüfte Erkenntnisse über Möglichkeiten der Regelung von Feuerungen für die Beheizung des „Hauses der Zukunft“ und zwar in Bezug auf

- größtmögliche Effizienz der Gebäudeheizung,
- geringst mögliche Schadstoffemissionen,
- Eignung für Feuerungsanlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken und
- Eignung für verschiedene Wohn- und Bürobauten.

Die Ergebnisse liegen in Form einer Projektdokumentation vor. Darüber hinaus kann die Funktion der Regelung im Labor demonstriert werden.

## **SUMMARY**

*The use of biomass for space heating is one of the most important features of „sustainable development“. Precondition for the use of this fuel are optimized combustion plants with high efficiency and low emissions of harmful substances. It can be expected, that automatically fuelled biomass furnaces will play an important part in room heating in the future. In the higher power range (more than 300 kW) optimized combustion plants equipped with advance control systems have already been developed and are commercially available. These systems however normally are too expensive to be used in smaller furnaces. Moreover, these plants are not adjusted to the specific requirements of the „building of tomorrow“ (very low power range, partial load, changing heat requirement) and therefore the development of a biomass furnace, adjusted to the requirements of the „building of tomorrow“ is necessary. The most important component of such a biomass furnace is the control system, not only to control the combustion process itself, but to control the entire heat management of the building also. The aim of the project therefore was to carry out basic investigations on the use of such a control system for small biomass furnaces. The results of the project should be used to develop an optimized furnace for practical application in further activities.*

*The control system developed is suitable for the following demands:*

- Optimizing control of the combustion process with online monitoring of the combustion quality (emissions of unburned substances) as it is already possible in large combustion plants.*
- Power control respecting the specific demands of the „building of tomorrow“.*

*The control system is suitable for different automatically fuelled wood chip- or pellet furnaces as well as for wood log furnaces. Therefore it is very flexible regarding different feeding systems of the fuel and the combustion air. It is further able to be equipped with different control programs which are adjusted to the conditions of different combustion technologies. The control system has been realized as a „black box“ which can be applied in different furnaces and heating systems of the „building of tomorrow“.*

*The project work contained the following tasks:*

- *Adjustment of the laboratory equipment for the installation of a control facility for different furnaces with a programmable heat sink („building simulator“).*
- *Test and optimization of the combustion control with a selected furnace.*
- *Test and optimization of the power control with the „building simulator“.*
- *Compilation of the recommendations of an optimized construction of a heating system for the „building of tomorrow “.*

*The results of the project have increased the knowledge of the possibilities of combustion control regarding the*

- *highest possible efficiency of the heating system of the building,*
- *least possible emissions of harmful substances,*
- *suitability for different combustion technologies, and*
- *suitability for different residential and office buildings.*

*The results are available as a documentation. Furthermore the function of the control system can be demonstrated in the laboratory.*

## **1. EINLEITUNG UND PROJEKTZIEL**

Die Beheizung von Wohn- und Bürobauten mit Biomassefeuerungen ist eine der wichtigsten Maßnahmen zur Erreichung eines verstärkten Einsatzes des erneuerbaren Energieträgers Biomasse. Voraussetzung für den Einsatz dieses Energieträgers sind allerdings optimierte Verbrennungsanlagen mit hoher Effizienz und geringen schädlichen Emissionen. Im größeren Leistungsbereich (ab etwa 300 kW) sind bereits automatisch beschickte Feuerungsanlagen mit hoher Effizienz und geringen Schadstoffemissionen verfügbar. Diese Anlagen sind verfahrenstechnisch optimiert und mit emissionsgeführten Regelungssystemen ausgestattet. Die dabei eingesetzten Techniken zur Verbrennungsoptimierung waren jedoch für den Einsatz in kleineren Feuerungsanlagen bisher zu teuer. Darüber hinaus sind diese Anlagen im Allgemeinen nicht an die spezifischen Anforderungen der betrachteten Gebäude (Leistung im Bereich weniger kW, Lastschwankungen etc.) angepasst. Es besteht daher der Wunsch, an den Bedarf des „Hauses der Zukunft“ angepasste und optimierte Biomassefeuerungen zu entwickeln. Besondere Bedeutung kommt hierbei dem eingesetzten Regelungssystem zu, und zwar sowohl in Hinblick auf die Verbrennungsregelung an sich als auch in Hinblick auf die Regelung des gesamten Heizsystems.

Ziel des gegenständlichen Projekts ist daher die Durchführung grundlegender Untersuchungen zum Einsatz einer solchen Regelung für Kleinfeuerungsanlagen als Basis für eine Produktentwicklung, die in einem nachfolgenden Entwicklungsvorhaben erfolgen soll.

Die zu untersuchende Regelung soll folgende Anforderungen erfüllen:

### **Anforderung 1: Optimierende Verbrennungsregelung mit ständiger Kontrolle der Verbrennungsgüte nach dem Vorbild der Regelung von Großfeuerungsanlagen**

Entsprechend dem technischen Standard bei Großfeuerungsanlagen soll die Regelung mit einem Sensor ausgestattet sein, der die Emissionen unverbrannter Rauchgaskomponenten (Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe) kontinuierlich misst. Auf Basis dieser Messgröße sowie weiterer

einfach zu messender Verbrennungsgrößen, z. B. der Brennkammer-temperatur, soll die Regelung mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen die Stellgrößen der Feuerung, insbesondere die Verbrennungsluftmenge, laufend so einstellen, dass die Emissionen der unverbrannten Rauchgaskomponenten minimiert werden. Dadurch wird die Luftreinhaltung sichergestellt und der feuerungstechnische Wirkungsgrad hoch gehalten. Darüber hinaus kann der Zustand der Anlage in Bezug auf die Emissionen unverbrannter Rauchgaskomponenten anhand des Signals des CO-Sensors vom Betreiber ständig kontrolliert werden. Der Nachweis des umweltgerechten Betriebs der Feuerungsanlage, bzw. das rechtzeitige Eingreifen bei Auftreten etwaiger Probleme wird auf diese Weise möglich.

Ähnliche Regelungen werden im Bereich der Großfeuerungsanlagen mit sehr guten Ergebnissen eingesetzt /1, 2/. Der Übertragung dieser Techniken auf Kleinfeuerungsanlagen mit vertretbaren Kosten können angesichts der mittlerweile verfügbaren kostengünstigen elektronischen Komponenten gute Chancen eingeräumt werden. Allerdings sind bei Kleinfeuerungsanlagen ein Reihe von weiteren Randbedingungen, z. B. „unprofessionelle“ Betriebsbedingungen, Wartungsfreiheit etc., zu beachten, die die Anwendung dieser Techniken erschweren können und die im Detail experimentell zu untersuchen sind, um den erfolgreichen Einsatz in der Praxis zu gewährleisten. In der Analyse und Behebung dieser Probleme bzw. im Down-Scaling des Verfahrens bestand letztlich eine der Aufgabenstellungen des gegenständlichen Projekts.

### **Anforderung 2: Leistungsregelung unter optimaler Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des „Hauses der Zukunft“**

Die Regelung soll neben der Optimierung der Verbrennung auch in der Lage sein, spezifische Lastgänge des „Hauses der Zukunft“ optimal zu berücksichtigen. Sie soll weiters die Einbindung anderer Wärmequellen, z. B. aus passiver Sonnenenergienutzung und aus weiteren aktiven Komponenten wie Solarheizungen und Wärmepumpen, in das Heizsystem ermöglichen, die Anforderungen der Brauchwassererwärmung erfüllen und, gegebenenfalls unter Einsatz eines Pufferspeichers, ein optimiertes Wärmemanagement sicher-

stellen. Die Regelung soll weiters den Zustand der Heizanlage in Bezug auf die Temperaturen und Wärmeströme anzeigen und über einen gewissen Zeitraum abrufbar speichern. In Anbetracht der mehr und mehr genutzten Möglichkeiten der Datenfernübertragung soll die Regelung auch mit entsprechenden Schnittstellen ausgestattet werden, so dass sie die Möglichkeit bietet, das Heizsystem über die Telefonnetze und/oder über das Internet von der Ferne aus zu überwachen und gegebenenfalls zu steuern. Dabei ist selbstverständlich auf Datenschutz bzw. Schutz vor Fremdeingriffen zu achten.

Bei der Entwicklung der Regelung wurde weiters darauf geachtet, dass sowohl der Gesteigungs- als auch der betriebliche Aufwand möglichst klein gehalten werden. Dies ist insbesondere bei „Passivhäusern“ von relativ großer Bedeutung, weil der Wärmebedarf dieser Häuser an sich sehr gering ist, und somit die Gefahr besteht, dass der Aufwand bezogen auf die Leistung sehr hoch wird.

Die Regelung soll für automatisch beschickte Holzhackgut- oder Pelletfeuerungen wie auch für Stückholzfeuerungen verschiedener Bauart geeignet sein. Sie muss daher in Bezug auf die Stellglieder (Brennstoffzuführungseinrichtungen, Ventilatoren, Mischventile, etc.) eine hohe Flexibilität aufweisen und über verschiedene Programme verfügen, die an die spezifischen Bedingungen verschieden ausgeführter Feuerungen angepasst sind. Sie soll somit den Charakter einer Black-Box („Combustion-Control-Unit“) haben, an die verschiedene Feuerungen und Komponenten der Hausheizung angeschlossen werden können, und die schließlich mit Hilfe ihrer eingespeicherten Programme die optimale Regelung von Heizsystemen, die für das „Haus der Zukunft“ aus jetziger Sicht in Frage kommen, übernimmt.

Im gegenständlichen Projekt wurden die für eine spätere Produktentwicklung notwendigen grundlegenden Untersuchungen durchgeführt. Sie umfassen die folgenden Arbeitsschritte:

- Arbeitsschritt 1: Anpassung der bei Antragsteller vorhandenen Einrichtungen zum Aufbau eines Regelungs-Versuchsstandes für verschiedene Versuchsfeuerungsanlagen mit programmierten Wärmesenke („Gebäudesimulator“), (Kapitel 2)
- Arbeitsschritt 2: Test und Optimierung der Verbrennungsregelung anhand einer ausgewählten Feuerungsanlage (Kapitel 3)

- Arbeitsschritt 3: Test und Optimierung der Leistungsregelung anhand eines simulierten Referenzbaus (Kapitel 4, sowie mit speziellem Bezug auf die Möglichkeiten der Combustion-Control-Unit: Kapitel 5 und 6)
- Arbeitsschritt 4: Zusammenstellung von Empfehlungen für die optimale Ausführung der Heizungsregelung für das „Haus der Zukunft“ (Kapitel 7).

Die Ergebnisse des Projekts sind experimentell erarbeitete Erkenntnisse über Möglichkeiten der Regelung von Feuerungen in Bezug auf

- größtmögliche Effizienz der Gebäudeheizung,
- geringst mögliche Schadstoffemissionen,
- Eignung für Feuerungsanlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken und
- Eignung für verschiedene Wohn- und Bürobauten.

## **2. AUFBAU EINES REGELUNGS-VERSUCHSSTANDS MIT GEBÄUDESIMULATOR**

In diesem Arbeitsschritt wurde durch Anpassung bzw. Ergänzung der vorhandenen Einrichtungen (Feuerungs-Versuchsstand) ein Regelungs-Versuchsstand realisiert.

### **2.1 Integration der Versuchsfeuerungsanlage**

Hierzu wurde zunächst eine von der Fa. Herz beigestellte 50 kW-Biomassefeuerung des Typs „FIRESTAR“ für die Durchführung der Untersuchungen umgebaut und mess- sowie regelungstechnisch ausgestattet. Abbildung 1 zeigt die Biomassefeuerung „FIRESTAR“ im Originalzustand. Abbildung 2 zeigt die Biomassefeuerung nach Durchführung der in den Abschnitten 2.2 und 2.3 durchgeführten Adaptierungen sowie nach Einbindung der Feuerung in die übrigen Komponenten des Feuerungsversuchsstands.



Abbildung 1: 50 kW Biomassefeuerung „FIRESTAR“ der Fa. Herz im Originalzustand



Abbildung 2: 50-kW Biomassefeuerung nach Einbindung in die übrigen Komponenten des Feuerungsversuchsstands. Man erkennt links neben der Bildmitte (erhöht) den zylindrischen Brennstoffvorratsbehälter mit dem Aufzug für dessen Beschickung. Links unten neben dem Brennstoffvorratsbehälter ist die Versuchsfeuerungsanlage mit der schrägen Brennstoffzuführungsschnecke zu erkennen.

Im Einzelnen wurden an der Biomassefeuerung bzw. am Regelungs-Versuchsstand die in den folgende Kapiteln 2.2 - 2.4 beschriebenen Adaptierungen vorgenommen.

## **2.2 Adaptierung des Regelungs-Versuchsstandes zur Realisierung einer optimierenden Verbrennungsregelung**

Bei einer Verbrennungsregelung auf Basis einer ständigen Kontrolle der Verbrennungsgüte (gemäß Projektziel, Anforderung 1, siehe Kapitel 1) werden die oxidierbaren Gasbestandteile (also im wesentlichen das Kohlenmonoxid und die Kohlenwasserstoffe) im Rauchgas der Feuerung ständig mit Hilfe eines speziellen Sensors gemessen. Geeignete Regelungsalgorithmen verändern die Verbrennungsluftmenge (im Allgemeinen die Sekundärluftmenge) sodann ständig so, dass unter allen Betriebsbedingungen der Feuerung das in Bezug auf die Verbrennungsluftmenge mögliche Minimum der oxidierbaren Rauchgasbestandteile erreicht wird. Erfahrungen beim Einsatz derartiger Regelungen in Großfeuerungsanlagen sind in /1/ beschrieben. Da die größte Wirkung auf diese Sensoren vom Kohlenmonoxid ausgeübt wird, sollen sie hier vereinfacht als „CO-Sensoren“ und die Regelung als „CO-geführte Verbrennungsregelung“ bezeichnet werden.

Bei Großfeuerungsanlagen wurden bisher CO-Sensoren der Type FIGARO TGS 109 eingesetzt. Diese Sensoren haben eine hohe Signalspannung, dazu benötigen sie aber für den Betrieb eine relativ hohe Gleichspannung von 100 V. Dies kann bei Kleinfeuerungsanlagen aus zwei Gründen nachteilig sein:

- Eine Gleichspannungsquelle mit 100 V (Transformator mit Gleichrichter) ist kein Standardprodukt am Markt. Insbesondere muss der Transformator eigens gewickelt werden. Die Spannungsversorgungseinheit für den CO-Sensor kommt daher relativ teuer.
- Eine Spannung von 100 V liegt über der sogenannten „Kleinspannung“ von 65 V, die ohne besondere Schutzmaßnahmen überall angewendet werden darf. Installationen mit höherer Spannung hingegen unterliegen den Normen und Sicherheitsvorschriften für Niederspannungsnetze. Dies bringt insbesondere im Bereich der heißen Teile einer Feuerungsanlage einen erhöhten technischen Aufwand für die Gewährleistung der Betriebssicherheit und für die Vorbeugung von Gefahren mit sich.

Aus diesem Grund wurde im gegenständlichen Projekt erstmals versuchsweise ein CO-Sensor der Type FIGARO TGS 816 eingesetzt, der mit 24 V Gleichspannung betrieben wird. Das Ausgangssignal dieses Sensors ist allerdings auch entsprechend schwächer. Es sei hier schon vorweggenommen, dass sich auch dieser Sensor für den Einsatz in einer CO-geführten Verbrennungsregelung bewährt hat (Näheres hierzu findet sich in Abschnitt 3). Abbildung 3 zeigt den CO-Sensor FIGARO TGS 816. Ein elektrisches Schaltbild für die Beschaltung des CO-Sensors findet sich im Anhang (siehe Abschnitt 11.1)

Abbildung 4 zeigt die Charakteristik des CO-Sensors FIGARO TGS 816 in Bezug auf verschiedene Gasbestandteile, insbesondere Kohlenmonoxid (Angaben des Herstellers). Die exponentielle Abnahme des Widerstandes des Sensors (y-Achse, oberste Linie) mit zunehmender CO-Konzentration (x-Achse) ist gut zu erkennen.



C type : ceramic base + metal cover

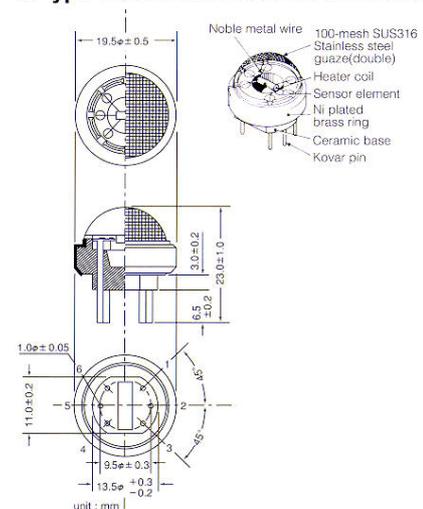
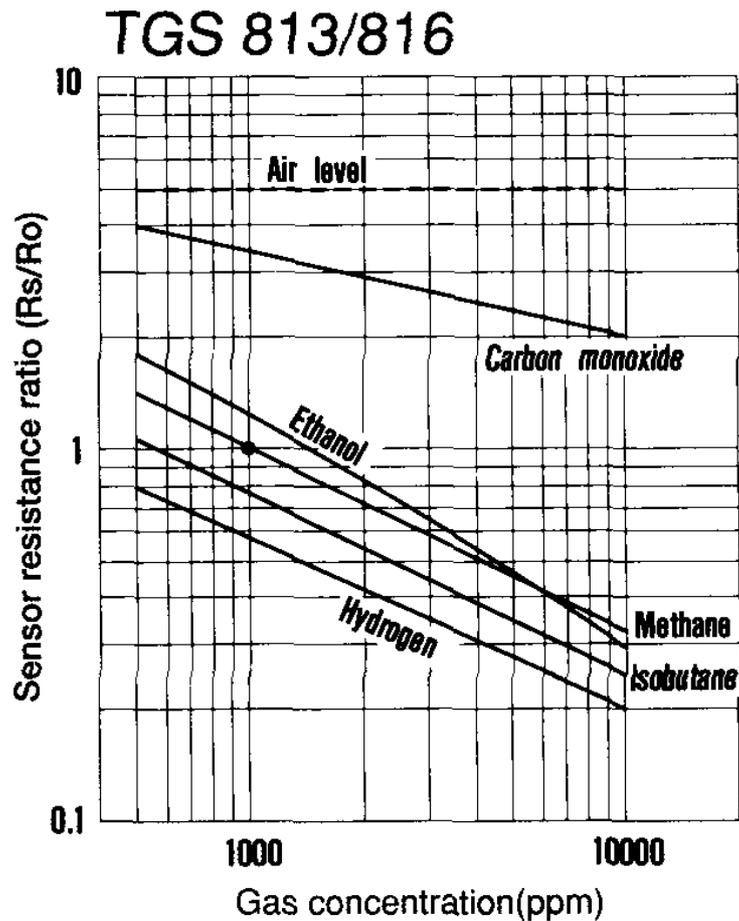
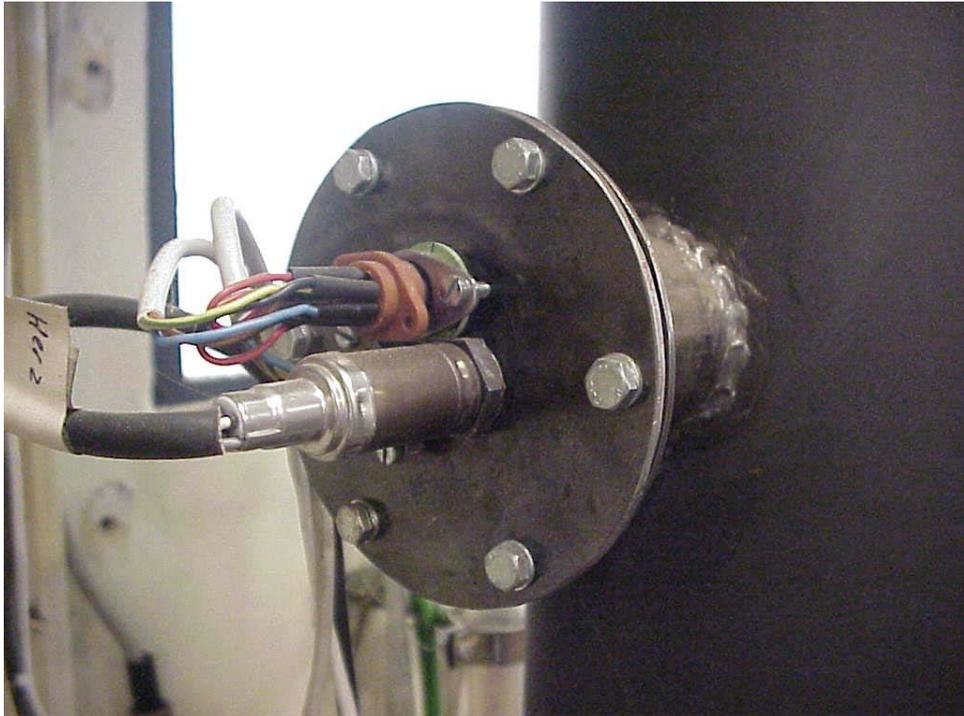


Abbildung 3: Details zum CO-Sensor FIGARO TGS 816 (links Foto, rechts Schnittbild)



**Abbildung 4:** Charakteristik des CO-Sensors FIGARO TGS 816 in Bezug auf verschiedene Gasbestandteile, insbesondere CO (oberste Linie) (Angabe des Herstellers). Die exponentielle Abnahme des elektrischen Widerstandes des CO-Sensors mit zunehmender CO-Konzentration ist deutlich zu erkennen.

In **Abbildung 5** ist der CO-Sensor FIGARO TGS 816 im eingebauten Zustand in einem am Rauchrohr angeschweißten Messflansch (oberer Sensor) zu sehen. Unter dem CO-Sensor ist eine Lambda-Sonde zusehen, mit der die Sauerstoffkonzentration im Rauchgas gemessen werden kann. Diese Messgröße wurde aber aufgrund verschiedener Nachteile (siehe Abschnitt 3.2.3) für die Regelung der Feuerungsanlage in diesem Projekt nicht verwendet.



**Abbildung 5:** CO-Sensor FIGARO TGS 816 (oben) im eingebauten Zustand im Deckel eines am Rauchrohr (rechts) angebrachten Messflansches. Unter dem CO-Sensor ist eine Lambda-Sonde zu sehen, mit der die Sauerstoffkonzentration gemessen wird.

Der CO-Sensor ist für eine maximale Rauchgastemperatur von ca. 240 °C geeignet. Diese Rauchgastemperatur wird bei Feuerungsanlagen normalerweise nicht überschritten, bei stark verschmutztem Kessel und/oder bei starker Überlast sind Rauchgastemperaturen in dieser Höhe jedoch nicht auszuschließen. Der CO-Sensor wurde daher in einem gewissen Sicherheitsabstand (ca. 1 m entlang des Rauchrohres) vom Ausgang des Kessels in einem am Rauchrohr angeschweißten Messflansch, der unter anderem eine gewisse Kühlung der Umgebung des Sensors bewirken soll, installiert. Die Reaktionszeit des Sensorsignals auf Änderungen der Verbrennungsbedingungen erhöht sich dadurch nur unwesentlich.

**Abbildung 6** zeigt die Rückseite der Feuerung des Regelungs-Versuchsstandes mit dem Rauchrohr. Man erkennt links im Bild den in Abbildung 5 im Detail gezeigten Messflansch mit den beiden Sensoren. Rechts im Bild ist die Versuchsheizungsanlage mit dem Antriebsmotor für das Saugzuggebläse zu sehen. In den beiden von der Feuerungsanlage nach oben führenden isolierten Leitungen wird das Heizwasser dem (in diesem Bild nicht sichtbaren) Gebäudesimulator zugeleitet.

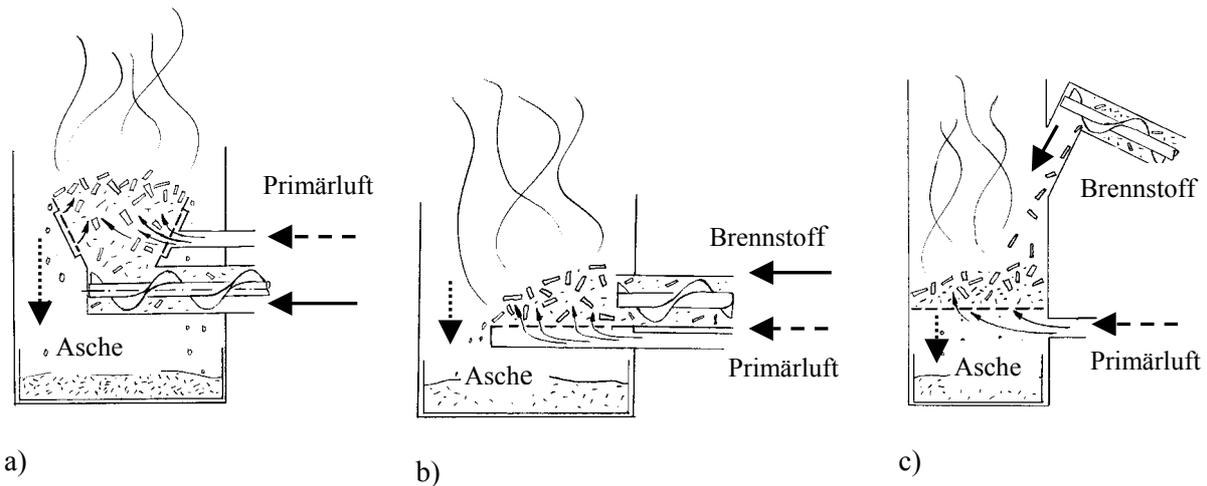


Abbildung 6: Rauchrohr der Versuchsfeuerungsanlage mit Messflansch (links im Bild)

### **2.3 Eigenschaften der Versuchsfeuerungsanlage**

Mit der Installation des CO-Sensors wurde eine der Voraussetzungen für eine CO-geführte Verbrennungsregelung erfüllt. Eine weitere Voraussetzung ist allerdings eine optimierte Verbrennungstechnik an sich, die eine ergänzende „feinfühligere“ optimierende Regelung der Verbrennungsqualität über die Verbrennungsluft anhand der CO-Emissionen überhaupt möglich macht. Die Feuerungsanlage muss hierzu im Stande sein, die gewünschten niedrigen Emissionen grundsätzlich zu erreichen. (Salopp ausgedrückt: „Was die Brennkammer prinzipiell nicht schafft, kann die Verbrennungsluftregelung auch nicht mehr retten!“). Dies ist nur bei gut wärmegeämmter Brennkammer, hinreichender Verweilzeit der Rauchgase und kontrollierbarer Brennstoffzuführung bzw. Abbrandgeschwindigkeit möglich. Bei schlecht kontrollierbarer Abbrandgeschwindigkeit kann eine CO-geführte Verbrennungsluftregelung rasch instabil werden, wie Erfahrungen in Großfeuerungsanlagen gezeigt haben /1/. Die Kontrollierbarkeit der Abbrandgeschwindigkeit ist bei verschiedenen Verbrennungsverfahren unterschiedlich.

In Abbildung 7 (aus /3/) sind die drei in Kleinfeuerungsanlagen gängigen Verbrennungsverfahren für Schüttgutbrennstoffe in Prinzipskizzen gegenübergestellt.



**Abbildung 7:** Prinzipskizzen der in Kleinf Feuerungsanlagen angewandten Verbrennungsverfahren für Schüttgut-Brennstoffe (aus [3]):

- a) Gleichstromverfahren in Unterschubfeuerungen,
- b) Querstromverfahren in seitlich beschickten Feuerungen,
- c) Gegenstromverfahren in von oben beschickten Feuerungen

Im Gleichstromverfahren (a), das bei Unterschubfeuerungen angewandt wird, bewegt sich der Brennstoff während des Abbrandes in einer Brennschale nach oben. Die Asche wird über den Rand der Brennschale abgeführt. Dabei muss sichergestellt werden, dass kein unverbrannter Brennstoff mit in die Aschenlade fällt. Auch darf die Aschenschicht nicht zu dick werden, da sonst die Verbrennung schlechter wird und die Gefahr von Schlackenbildung entsteht. Mit Hilfe entsprechender mechanischer oder optischer Niveauregler kann diese Forderung auch bei verschiedenen Leistungen weitgehend erfüllt werden. Die Primärluft wird ab einer bestimmten Höhe von der Seite durch kleine Öffnungen in die Glut eingebracht. Die Wände der Brennschale wirken somit als Rost. Auch die Primärluft strömt im Wesentlichen nach oben, also in die gleiche Richtung wie der Brennstoff.

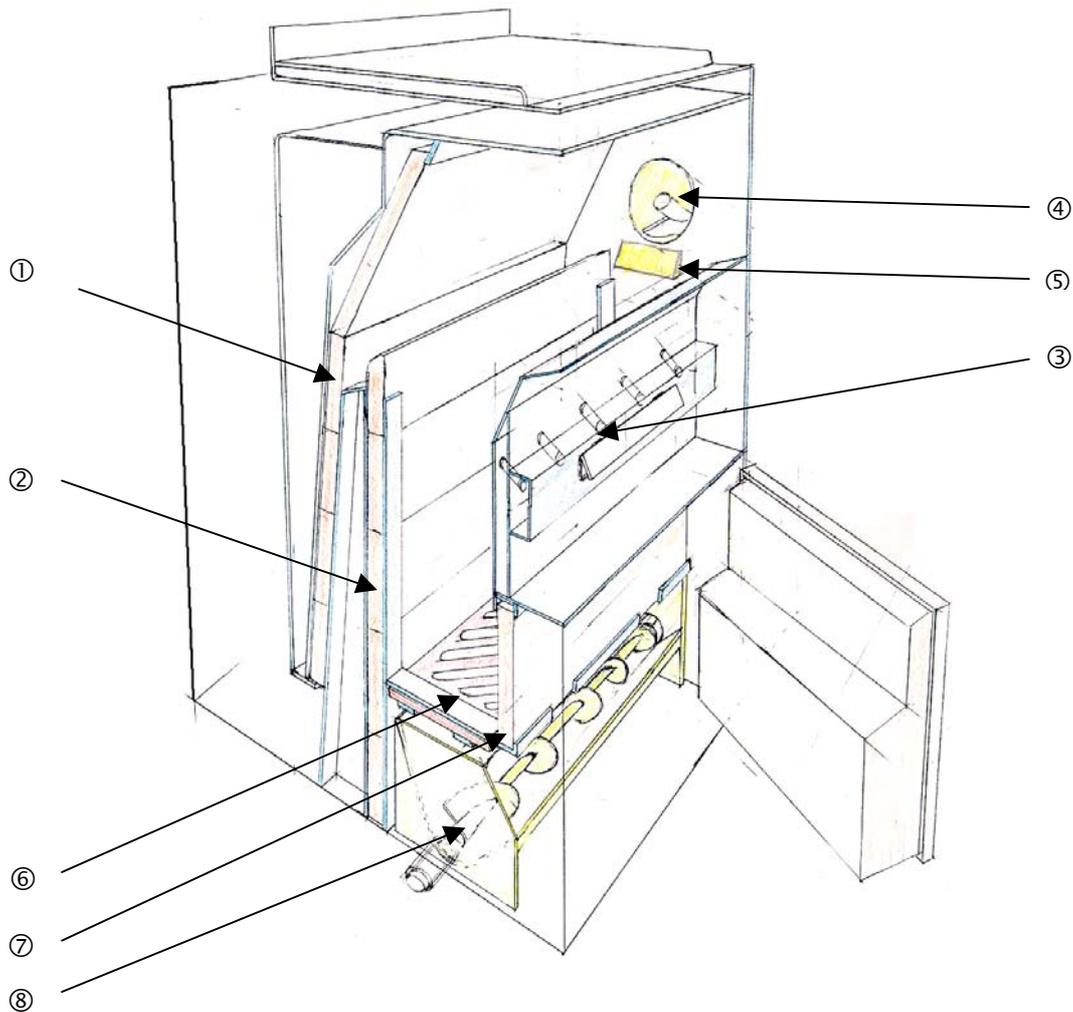
Eine ähnliche Situation ist auch im Querstromverfahren (b), das bei den seitlich beschickten Feuerungen angewandt wird, gegeben. Hier wird der Brennstoff im Wesentlichen horizontal voranbewegt während die Primärluft von unten nach oben durch die Glut strömt. Die Anforderungen an die Geometrie des Rostes und an die Regelung des Glutbetts sind ähnlich wie bei Unterschubfeuerungen.

Unterschubfeuerungen und seitlich beschickte Feuerungen haben - bei Installation der Feuerung und des Lager-Raumes auf gleicher Höhe - den Vorteil, dass der

Brennstoff vor dem Einbringen in die Feuerung nicht in besonderem Ausmaß in die Höhe transportiert werden muss.

Beim Gegenstromverfahren (c), das in den von oben beschickten Feuerungen angewendet wird, fällt der Brennstoff - meist über eine schräge Zuführungsrinne - von oben annähernd gleichmäßig verteilt auf das brennende Glutbett und sinkt während des Verbrennungsvorganges nach unten. Die Asche fällt durch den Rost nach unten. Meist wird der Rost hierzu periodisch gerüttelt oder in Drehung um die vertikale Achse versetzt. Die Primärluft kann von unten sowie ergänzend auch von der Seite zugeführt werden. Durch hinreichend lange Verweilzeiten der Asche wird erreicht, dass keine unverbrannten Brennstoffteilchen durch den Rost fallen. Verschlackung ist hier kein Problem, weil die Asche unter der Glut in der von der Primärluft gekühlten Zone liegt. Die Glutbetthöhe kann je nach Feuerungsleistung unterschiedlich hoch sein. Die Glutbettregelung wird dadurch einfacher und die Brennstoffmenge kann ohne Bedachtnahme auf die Glutbetthöhe ausschließlich nach Maßgabe des momentanen Leistungsbedarfs zugeführt werden.

Das in (c) skizzierte Gegenstromverfahren mit Brennstoffzuführung über eine Fallstrecke kommt dem in Großfeuerungsanlagen eingesetzten Verfahren mit Wurfbeschickung, bei dem mittlerweile mehrjährige sehr gute Erfahrungen mit CO-geführten Verbrennungsregelung vorliegen /1/, am nächsten. Um Risiken, die sich durch das Down-Scaling ergeben können, möglichst klein zu halten wurde daher auch die Versuchsfeuerungsanlage (ursprünglich ein Stückholzkessel) zu einer von oben beschickten Feuerung umgebaut. Hierzu wurden an der Brennkammer der Feuerung eine Reihe von Änderungen vorgenommen, die anhand der in Abbildung 8 dargestellten Schnittzeichnung erläutert werden. Da die Feuerungsanlage in der adaptierten Form wesentlichen Eigenschaften nicht mehr mit dem Originaltyp übereinstimmt und einen Versuchs-Prototyp darstellt, soll sie im Folgenden als „Versuchsfeuerungsanlage“ bezeichnet werden.



**Abbildung 8:** Schnittzeichnung der Versuchsfeuerungsanlage

- ① Schamottierung der rückwärtigen Brennkammerwand
- ② Trennwand aus Schamotte zur Teilung der Brennkammer in zwei Kammern: Primärbrennkammer (vorne, Gasbewegung nach oben) und Sekundärbrennkammer (hinten zwischen Trennwand und rückwärtiger Brennkammerwand, Gasbewegung nach unten)
- ③ Sekundärluftdüsen
- ④ Brennstofföffnung im oberen Bereich der Brennkammer mit Brennstoffzuführungsschnecke und
- ⑤ Fallrampe
- ⑥ Rüttelrost
- ⑦ Verschlussklappe aus Schamotte für den Glutbettbereich
- ⑧ Aschen-Austragsvorrichtung (nur eingezeichnet, jedoch noch nicht realisiert, da für den wissenschaftlichen Aspekt des gegenständlichen Projekts ohne Bedeutung)

Zur Verbesserung der Wärmedämmung der Brennkammer wurde zunächst die Kesselwand mit einer Schamottierung ① versehen. Weiters wurde die Brennkammer durch eine Trennwand ② aus Schamotte in 2 Kammern unterteilt: In eine Primärbrennkammer (vorne, mit Strömungsrichtung nach oben), in der sich das Glutbett befindet und in der überwiegend die heterogenen Reaktionen ablaufen, und in eine Sekundärbrennkammer (hinten, mit Strömungsrichtung nach unten), in der überwiegend die homogenen Reaktionen der Sekundärverbrennung ablaufen sollen. Zur Einbringung der Sekundärluft in die Sekundärbrennkammer wurden Sekundärluftdüsen ③ installiert, deren Strömungsrichtung in die Sekundärbrennzone weist. Zur Einbringung der Brennstoffs im Gegenstromverfahren wurde im oberen Bereich der Brennkammer eine Öffnung ④ installiert, durch die der Brennstoff mit der Brennstoffschnecke eingebracht wird. Zur besseren Verteilung des Brennstoffs auf dem Glutbett wurde eine Fallrampe ⑤ angebracht. Der Brennstoff fällt annähernd gleichmäßig verteilt auf einen Rüttelrost ⑥ und bildet dort ein Glutbett, das in Richtung zur Ofentüre durch eine Verschlussklappe aus Schamotte ⑦ gehalten wird. Diese Verschlussklappe ist überdies weitgehend luftdicht ausgeführt, damit gewährleistet ist, dass die unter dem Rost zugeführte Primärluft nur durch den Rost in das Glutbett und keinesfalls unter Umgehung des Glutbetts in den Gasraum der Brennkammer gelangt. In Abbildung 8 ist der Vollständigkeit halber weiters eine automatische Aschenausstragsvorrichtung ⑧ eingezeichnet. Die Installation einer solchen Aschenausstragsvorrichtung ist seitens der Fa. Herz für die spätere Vermarktung vorgesehen. In der Versuchsfeuerungsanlage wurde sich jedoch noch nicht realisiert, weil sie für den wissenschaftlichen Aspekt des gegenständliche Projekt ohne Bedeutung ist.

Abbildung 9 zeigt weitere Ansichten der Versuchsfeuerungsanlage (oberes Bild: Ansicht von schräg hinten ohne Wärmedämmung, unteres Bild: Ansicht von schräg vorne mit Wärmedämmung)



**Abbildung 9:** 2 Ansichten der Versuchsfeuerungsanlage: oberes Bild: Ansicht von schräg hinten ohne Wärmedämmung, unteres Bild: Ansicht von schräg vorne mit Wärmedämmung. Zu erkennen ist die schräg nach oben führende Brennstoffschnecke für die Beschickung „von oben“, unter der Brennstoffschnecke die Teile des Lichtschrankens für die optische Einrichtung für die Überwachung der Glutbetthöhe. An der Vorderseite des Kessels (unteres Bild) ist das Stellglied für die Sekundärluftzuführung zu erkennen.

Man erkennt in den beiden Fotos von Abbildung 9 die Feuerungsanlage mit der schräg nach oben führende Brennstoffschnecke für die Beschickung „von oben“ (in Abweichung von der Zeichnung in Abbildung 8 führt sie hier von links statt von rechts in die Brennkammer) sowie an der Vorderseite der Feuerung (unteres Bild) das Stellglied (geregelt Klappe) für die Sekundärluftzuführung durch die oben beschriebenen Sekundärluftdüsen. Man erkennt weiters die unter der Brennstoffschnecke angebrachten Teile eines Lichtschrankens zur Überwachung der Glutbetthöhe durch mit Quarzglasscheiben verschlossene Öffnungen in der Brennkammer. Im unteren Bereich der Feuerung ist der Rüttel-Motor für den Antrieb des Rüttelrosts zu sehen. Bei der oben erläuterten Ausstattung der Brennkammer wurden im Wesentlichen alle bekannten Möglichkeiten zur Verbrennungsoptimierung durch Maßnahmen im Bereich der Brennkammergestaltung genutzt. Es konnten somit optimale Voraussetzungen für den Einsatz der CO-geführten Verbrennungsregelung in der hier betrachteten Kleinferungsanlage im Sinne des Projektziels „Optimierende Verbrennungsregelung mit ständiger Kontrolle der Verbrennungsgüte nach dem Vorbild der Regelung von Großfeuerungsanlagen“ geschaffen werden, die einen erfolgreichen Einsatz dieser Technik in der Versuchsfeuerungsanlage erwarten ließen.

Eine Beschreibung der am Regelungs-Versuchsstand eingesetzten Analysatoren und Messgeräte findet sich im Anhang (siehe Abschnitt 11.2).

#### **2.4 Adaptierung des Regelungs-Versuchsstandes zur Realisierung einer optimierten Leistungsregelung**

Zur Realisierung einer Leistungsregelung unter optimaler Berücksichtigung der Anforderungen des „Houses der Zukunft“ gemäß Projektziel, Anforderung 2 (siehe Kapitel 1) wurde die Versuchsfeuerungsanlage an eine bereits vorhandene programmierbare Wärmesenke angeschlossen. Abbildung 10 zeigt ein Foto dieser Wärmesenke. Durch Programmierung dieser Wärmesenke zur Einstellung verschiedenener Szenarien der Wärmeabnahme, wie sie gemäß vorangegangenen Arbeiten im „Haus der Zukunft“ /4/ zu erwarten sind, wurde ein Gebäude simuliert, das mit der Feuerungsanlage beheizt werden soll. Eine der Aufgaben im Rahmen dieses Projekts bestand nun darin, die Leistungsregelung der Feuerung für diese

Einsatzfälle zu optimieren. Sowohl die Regelung der Verbrennungsgüte als auch für die Leistungsregelung erfolgten zunächst mit einem den entsprechenden elektrischen Aus- und Eingängen bestückten Personalcomputer. Später wurde dieser Personalcomputer durch eine „Combustion-Control-Unit („CCU“) ersetzt (siehe Abschnitt 5).

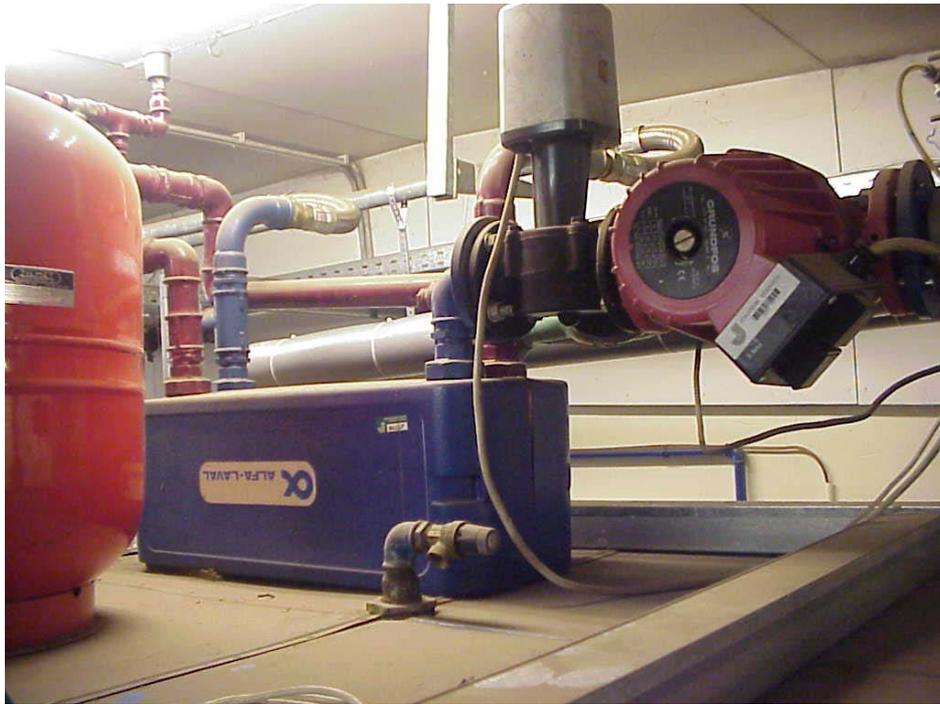


Abbildung 10: Programmierbare Wärmesenke („Gebäudesimulator“) des Regelungs-Versuchsstandes. Ganz links das Ausgleichsgefäß des Heizwasserkreises, rechts daneben der Wärmetauscher mit den Wasseranschlüssen, in Bildmitte das Regelventil, ganz rechts die Umwälzpumpe.

### **3. TEST UND OPTIMIERUNG DER VERBRENNUNGSREGELUNG**

In diesem Arbeitsschritt wurden am Regelungs-Versuchsstand verschiedene Regelungsstrategien anhand einer auf Basis der Ergebnisse des Projekts „Anforderungsprofile für Biomassefeuerungen zur Wärmeversorgung von Objekten mit niedrigem Energiebedarf“ /4/ ausgewählten Feuerungsanlage erprobt.

#### **3.1 Regelungstechnisch relevante Vorgänge bei der Verbrennungsregelung einer Biomassefeuerung**

Die regelungstechnisch relevanten Vorgänge bei der Verbrennungsregelung einer Biomassefeuerung werden anhand der Betriebscharakteristik von Biomassefeuerungen (Abschnitt 3.1.1), der regelungstechnisch relevanten chemischen Reaktionen (Abschnitt 3.1.2) und der regelungstechnisch relevanten physikalischen Abläufe (Abschnitt 3.1.3) erläutert.

##### **3.1.1 Betriebscharakteristik von Biomassefeuerungen**

Unter „Betriebscharakteristik“ einer Biomassefeuerung sei hier die Abhängigkeit verschiedener Betriebsparameter (Emissionen und Temperaturen) von einem Stellparameter (zumeist die Verbrennungsluftmenge) verstanden. Die Aufgabe der „Verbrennungsregelung“ besteht darin, zu bewirken, dass die Verbrennung möglichst vollständig abläuft. Genaugenommen müsste man hier somit von einer „Verbrennungs-Qualitätsregelung“ sprechen, im Gegensatz zur Leistungsregelung, die in Kapitel 4 behandelt wird. Die Betriebscharakteristik der Feuerung ist somit die Basis für den Entwurf jeder Verbrennungsregelung.

Das Maß für die Vollständigkeit der Verbrennung (eigentlich das Maß für die „Unvollständigkeit“ der Verbrennung) sind die Kohlenmonoxid und die Kohlenwasserstoffemissionen. Diese beiden Stoffe müssen bei der Regelung von Biomassefeuerungen aber nicht getrennt betrachtet werden, weil sie sich erfahrungsgemäß „ähnlich“ verhalten. Das heißt, wenn die Kohlenmonoxidemissionen relativ niedrig sind, sind immer auch die Kohlenwasserstoffemissionen relativ niedrig. Dieser empirische Sachverhalt wurde bereits 1992 beschrieben /2/. Abbildung 11 zeigt die Kohlenwasserstoffemissionen in Abhängigkeit von den Kohlenmonoxidemissionen

für drei verschiedene Feuerungsarten: a) Geschlossener Kaminofen, b) Stückholz mit unterem Abbrand, c) Automatische Hackgutfeuerung (aus /2/). Weitere Bestätigungen der strengen Korrelation der Kohlenmonoxid- und der Kohlenwasserstoffemissionen finden sich in /1/.

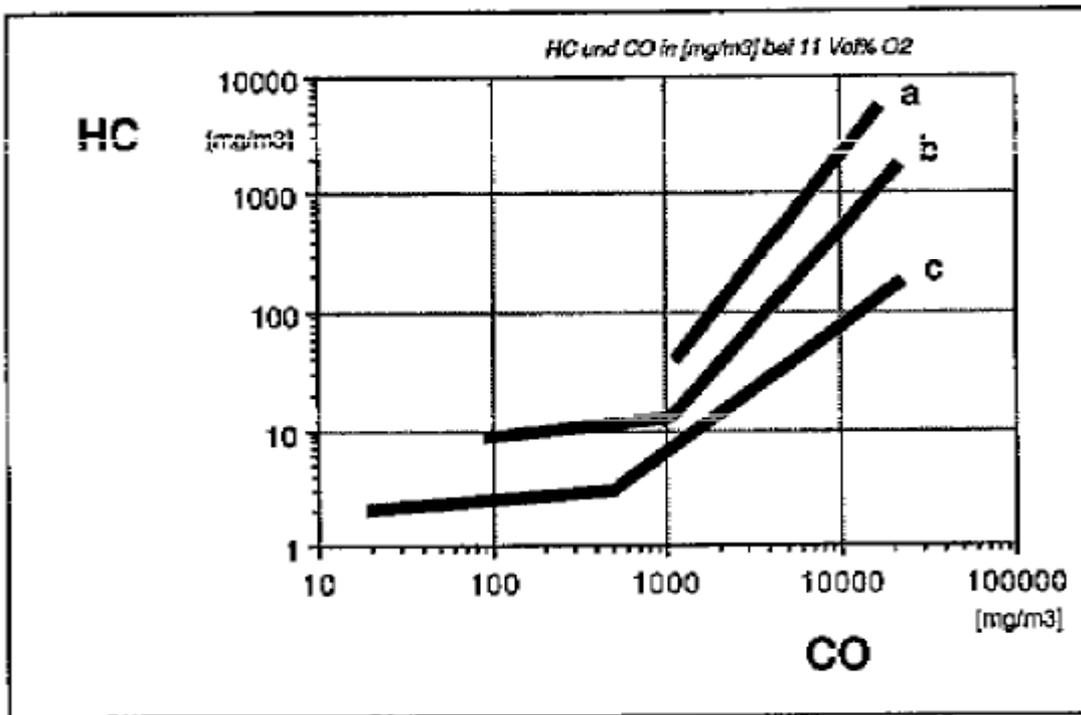
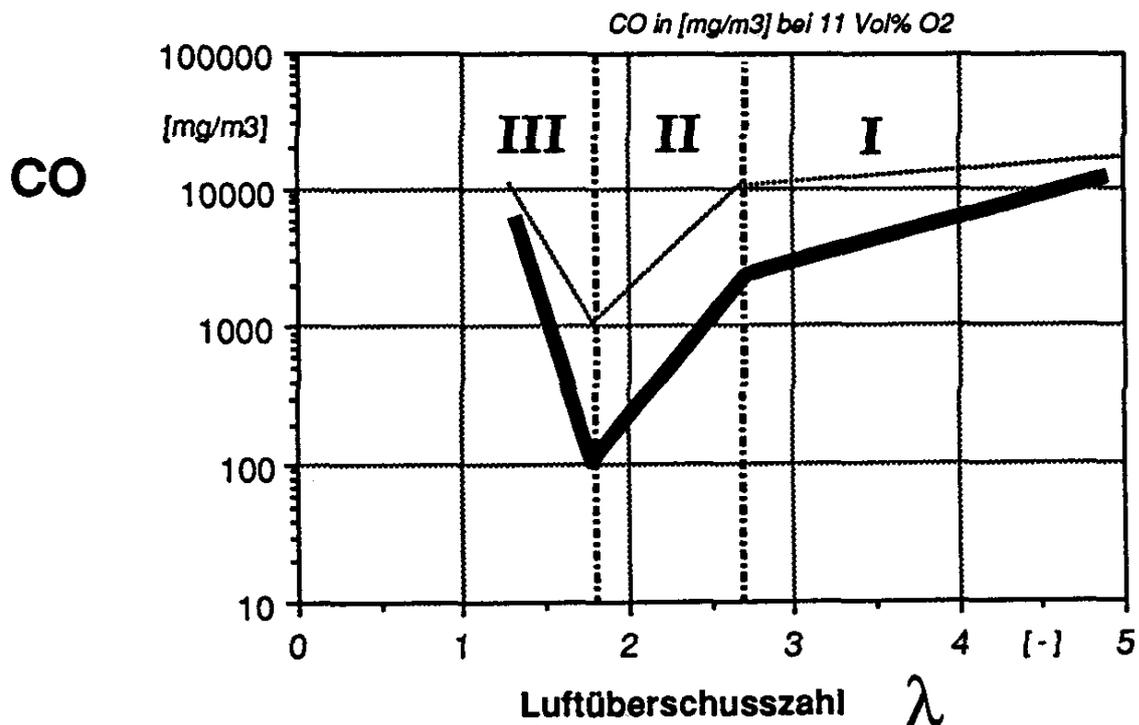


Abbildung 11: Kohlenwasserstoffemissionen (HC) als Funktion der Kohlenmonoxidemissionen (CO) für 3 verschiedene Feuerungsarten. (Aus /2/)

- a) Geschlossener Kaminofen
- b) Stückholzkessel mit unterem Abbrand
- c) Automatische Hackgutfeuerung

Bei der Verbrennungsregelung von Biomassefeuerungen ist es somit möglich, nur einen der beiden Stoffe als Leitsubstanz für das Maß der Vollständigkeit der Verbrennung zu berücksichtigen. Üblicherweise ist dies das Kohlenmonoxid, weil es wesentlich einfacher als die Kohlenwasserstoffe gemessen werden kann. Als Betriebscharakteristik einer Biomassefeuerung kann daher die Kohlenmonoxidkonzentration in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis „Lambda“ (bzw. „ $\lambda$ “) angesehen werden. Dies wurde bereits 1989 in /9/ beschrieben und 1992 in /2/ durch weitere Untersuchungen an verschiedenen Feuerungsanlagen bestätigt. Sie ist durch den in Abbildung 12 ersichtlichen Verlauf der CO-Emissionen gekennzeichnet.



**Abbildung 12:** Abhängigkeit der CO-Emissionen vom Verbrennungsluftverhältnis Lambda (hier als „Luftüberschusszahl „ $\lambda$ “ bezeichnet) zweier verschiedener Biomassefeuerungsanlagen. (Aus /2/)

Bereich I: Verbrennungsluftüberschuss

Bereich II: Optimale Verbrennungsluftmenge

Bereich III: Verbrennungsluftmangel

Man erkennt in Abbildung 12, dass die Kohlenmonoxidemissionen und damit, wie oben erläutert, auch die Kohlenwasserstoffemissionen bei einem bestimmten Wert von Lambda ein signifikantes Minimum aufweisen. Links neben dem Minimum, im Bereich III, wird die Verbrennung aufgrund von Verbrennungsluftmangel unvollständig und die Kohlenmonoxidemissionen steigen aus diesem Grund an. Rechts neben dem Minimum, im Bereich I, herrscht Verbrennungsluftüberschuss. Die Verbrennungsgase werden durch die überschüssige Verbrennungsluft abgekühlt und die Verbrennung wird aus diesem Grund unvollständig, das heißt die Kohlenmonoxidemissionen steigen an. Dieser Umstände wurde in der Zwischenzeit mehrfach bestätigt. Insbesondere wurde auch für die Versuchsfeuerungsanlage die Betriebscharakteristik sehr detailliert gemessen (siehe Abschnitt 3.2.1).

Das Minimum der Kohlenmonoxidemissionen liegt leider nicht unter allen Bedingungen beim gleichen Wert von Lambda. Ausschlaggebend für die Lage des Minimums in Bezug auf den Lambda-Wert sind unter anderem:

- Die Brennstoffbeschaffenheit, insbesondere der Wassergehalt,
- der Leistungszustand (Volllast - Teillast) und
- der zeitliche Verlauf der Leistung - das heißt: Bei zunehmender Leistung z. B. in der ansteigenden Flanke beim Taktbetrieb, ist ein höherer Wert von Lambda erforderlich.

Die Aufgabe der Verbrennungsregelung besteht daher im besonderen darin, den optimalen Betriebspunkt unter allen Betriebsbedingungen zu finden und bestmöglich einzustellen. Hierzu wurden in /1/ und /9/ Untersuchungen durchgeführt, die in der Folge zur Entwicklung einer Verbrennungsregelung für den Einsatz in Großfeuerungsanlagen auf Basis einer CO-Messung geführt haben.

### 3.1.2 Regelungstechnisch relevante chemische Reaktionen

Abbildung 13 (siehe Seite 34) zeigt schematisch die regelungstechnisch relevanten Vorgänge bei der Holzverbrennung. Die chemischen Vorgänge sind in Abbildung 13 sehr vereinfacht im Sinne von Brutto-Reaktionsgleichungen dargestellt. Diese Darstellung ist aber für die Erläuterung der regelungstechnisch relevanten Vorgänge im Grunde ausreichend. Ausführliche Beschreibungen der chemischen Vorgänge bei der Holzverbrennung finden sich zum Beispiel in /5/.

Für die Verbrennungsregelung relevant sind vor allem

- Reaktion (1):  $2 \text{ C} + \text{ O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ CO}$ , und
- Reaktion (2):  $2 \text{ CO} + \text{ O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ CO}_2$

Reaktion (1) bestimmt die Geschwindigkeit der Entgasung der festen Phase des Brennstoffs und somit auch die Wärmeleistung. Der in Reaktion 1 umgesetzte Sauerstoff stammt bei modernen Feuerungsanlagen überwiegend aus der Primärluft. Somit ist die Primärluftmenge die wichtigste Stellgröße zur Regelung der Wärmeleistung der Feuerungsanlage.

Reaktion (2) bestimmt die Umsetzung des in Reaktion (1) gebildeten Kohlenmonoxids zu Kohlendioxid. Der in Reaktion (2) umgesetzte Sauerstoff stammt bei modernen Feuerungsanlagen im allgemeinen überwiegend aus der Sekundärluft. Ist zuwenig Sekundärluft vorhanden, so kann das aus Reaktion (1) stammende Kohlenmonoxid nicht vollständig zu Kohlendioxid umgesetzt werden. Erhöhte Kohlenmonoxidemissionen infolge von „Verbrennungsluftmangel“ sind die Folge. (vergl. Abbildung 12, auf Seite 29, Bereich III des Diagramms)

Die vollständige Umsetzung des Kohlenmonoxids zu Kohlendioxid erfordert immer einen gewissen Überschuss an Sauerstoffmolekülen für Reaktion (2). Auch für Reaktion (1) ist grundsätzlich ein Sauerstoffüberschuss erforderlich, der aber im allgemeinen nicht explizit wirksam wird, weil der Überschuss an Primärluft anteilig zu Sekundärluft wird. Er ist aber für die Stickoxidemissionen von Bedeutung (siehe Abschnitt 3.3). Dieser Sauerstoffüberschuss geht ungenutzt durch die Feuerungsanlage hindurch. Weil er mit Umgebungstemperatur (also kalt) in die Feuerungsanlage eintritt und mit Abgastemperatur (also warm) durch den Schornstein entweicht führt zu Wärmeverlusten. Man trachtet also den Sauerstoffüberschuss möglichst klein zu halten, ohne dabei aber in den Bereich von „Verbrennungsluftmangel“ zu geraten. Der Betriebspunkt der Feuerungsanlage liegt dann im Minimum der CO-Emissionen (vergl. wiederum Abbildung 12, Seite 29).

Der sog. „Lambda-Wert“ ist das Verhältnis der tatsächlichen Verbrennungsluftmenge zur stöchiometrisch erforderlichen Verbrennungsluftmenge. Er liegt bei Holzfeuerungsanlagen zwischen optimalerweise 1,4 und 2,0. Ist zuviel Sekundärluft vorhanden, kann die Brennkammer soweit abgekühlt werden, dass Reaktion (2) nicht mehr vollständig abläuft. Bei zuviel Sekundärluft ergeben sich somit erhöhte Kohlenmonoxidemissionen aufgrund der unvollständigen Umsetzung des Kohlenmonoxids zu Kohlendioxid infolge einer zu niedrigen Brennkammertemperatur (vergl. Abbildung 12 auf Seite 29, Bereich I des Diagramms).

Die Verbrennungsgüte, gekennzeichnet durch

- niedrige Kohlenmonoxidemissionen (vollständigen Ausbrand) einerseits und
- niedrige Wärmeverluste (hohen feuerungstechnischen Wirkungsgrad) andererseits

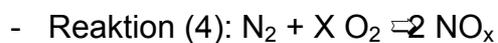
wird also überwiegend durch die Sekundärluftmenge beeinflusst. Es liegt also nahe die Sekundärluftmenge als Stellgröße für die Regelung der Verbrennungsgüte einzusetzen.

Reaktion (3) bestimmt die Umsetzung des im Brennstoff enthaltenen (zunächst chemisch gebundenen) Wasserstoffs zu Wasserdampf.



Sie läuft normalerweise vollständig ab und kann in Zusammenhang mit der Verbrennungsregelung unberücksichtigt bleiben.

Reaktion (4) bestimmt die Umsetzung des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffs zu Stickoxiden:



Wie ersichtlich ist auch für diese Reaktion hauptsächlich die Primärluft maßgebend. Die Primärluft kann aber nur begrenzt reduziert werden, weil sich ja mit der Primärluftmenge wie schon erläutert die Geschwindigkeit von Reaktion (1) und damit die Leistung ändert. Das einzige was reduziert werden kann ist der oben bereits erläuterte Primärluftüberschuss. Dies gelingt bei Betrieb der Feuerung mit möglichst hohem Glutbettvolumen. Die Stickoxidemissionen werden in diesem Fall tatsächlich signifikant reduziert /5 - 7/.

Reaktion (5) lautet als Brutto-Reaktionsgleichung formal gleich wie Reaktion (4) und wird daher hier nicht noch einmal dargestellt. Gemäß Reaktion (5) können sich grundsätzlich auch aus dem Sauerstoff und dem Stickstoff der Sekundärluft Stickoxidemissionen bilden. Es hat sich aber gezeigt, dass Reaktion (5) bei der Holzverbrennung nicht in nennenswertem Maß abläuft /8/. Der Grund dafür liegt darin, dass bei der Holzverbrennung die für Reaktion (5) erforderliche Rauchgastemperatur ( $> 1800 \text{ °C}$ ) im Allgemeinen nicht erreicht wird. Reaktion (5) hat daher bei der Regelung von Holzfeuerungsanlagen keine wesentliche Bedeutung. Bei Öl- und Gasbrennern wird die entsprechende Rauchgastemperatur allerdings sehr wohl erreicht und Reaktion (5) ist in Zusammenhang mit den Stickoxidemissionen zu berücksichtigen.

Reaktion (6) bestimmt die Bildung von Kohlenwasserstoffen.



Kohlenwasserstoffe stellen eine Zwischenstufe der Verbrennung dar. Sie sind grundsätzlich brennbar und reagieren daher bei geeigneten Umgebungsbedingungen zu Kohlendioxid und Wasserdampf. Durch Sauerstoffmangel oder zu niedrige Brennkammertemperatur können die Kohlenwasserstoffe aber - gleich wie das Kohlenmonoxid - unvollständig verbrannt werden und somit als Emissionen auftreten. Die Bedingungen für die Vermeidung von Kohlenwasserstoffemissionen sind bei der Holzverbrennung im Wesentlichen die gleichen wie jene zur Vermeidung von Kohlenmonoxidemissionen. Somit werden mit einer Regelung, die die Kohlenmonoxidemissionen minimiert, gleichzeitig auch die Kohlenwasserstoffemissionen minimiert.

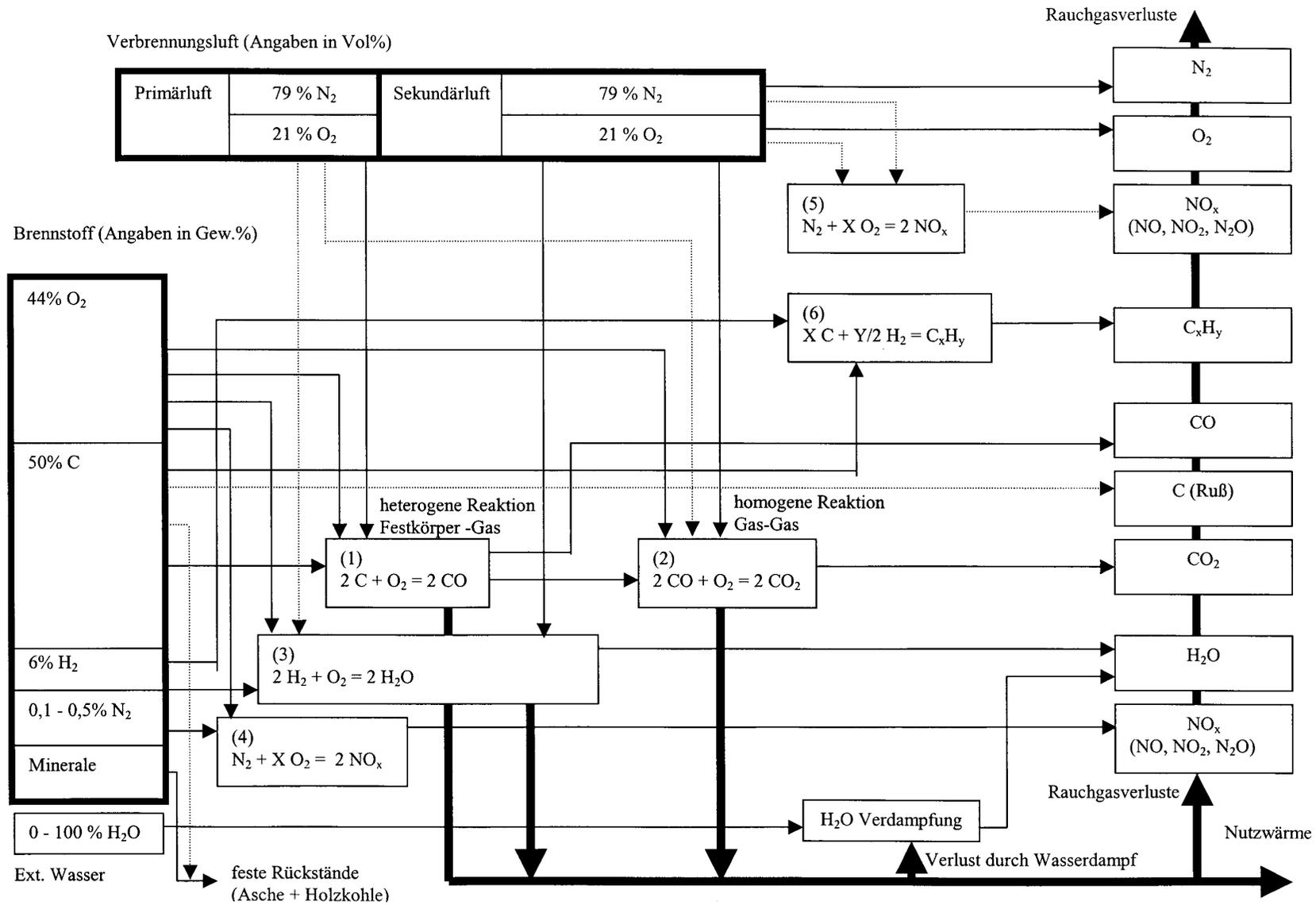


Abbildung 13: Regelungstechnisch relevante Vorgänge bei der Holzverbrennung



Die Primärluftregelung (10) für die Zufuhr der Primärluft (14) arbeitet meist auf Basis der Brennstoffmenge. Oft wird auch das Signal der Lichtschranke in den Algorithmus für die Primärluftregelung einbezogen. Bei Stückholzfeuerungen wird die Abbrandgeschwindigkeit über die Primärluft auf Basis der Kesseltemperatur geregelt.

Die Sekundärluftregelung (11) für die Zufuhr der Sekundärluft (15) arbeitet bei einfachen Regelungen ebenfalls auf Basis der Brennstoffmenge. Verbesserte Regelungssysteme arbeiten auf Basis des mit einer Lambda-Sonde (12) gemessenen Luftverhältnisses. Weitere Verbesserungen sind durch Einbeziehung des Signals eines CO-Sensors (13) möglich.

Die detaillierte Beschreibung der Regelungskomponenten und der verschiedenen möglichen Regelungsalgorithmen sowie deren Vor- und Nachteile erfolgt im folgenden Abschnitt 3.2.

### **3.2 CO-Minimierung durch Verbrennungsregelung**

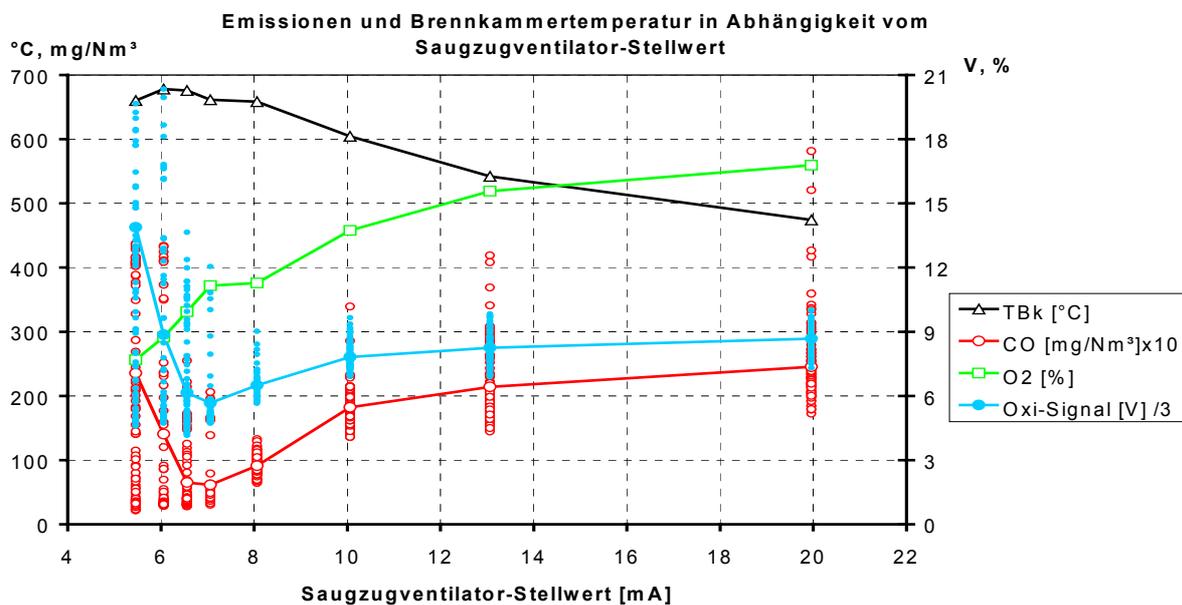
In diesem Abschnitt werden ausgehend von einer Messung der Betriebscharakteristik der Versuchsfeuerungsanlage (Abschnitt 3.2.1) verschiedene Techniken zur CO-Minimierung durch Verbrennungsregelung (Abschnitte 3.2.2 - 3.2.5) experimentell untersucht.

#### **3.2.1 Betriebscharakteristik der Versuchsfeuerungsanlage**

Die Betriebscharakteristik der Versuchsfeuerungsanlage, also die Abhängigkeit der verschiedenen relevanten Verbrennungsgrößen von einer Stellgröße (in diesem Fall der Steuerstrom bzw. das Steuersignal für den Frequenzumformer des Saugzugventilators) ist in Abbildung 15 dargestellt. Abbildung 15 zeigt im Prinzip die in Abbildung 12 (siehe Seite 29) dargestellte Charakteristik, gemessen an der Versuchsfeuerungsanlage, mit dem Unterschied, dass auf der Abszisse anstatt des Lambda-Wertes die genannte Stellgröße aufgetragen ist. Dies ist insofern von Relevanz, als ja das Regelverhalten der Feuerungsanlage primär durch das Stellglied und erst in weiterer Folge durch den Lambda-Wert bestimmt wird. Die Reaktion der Feuerung auf eine Änderung des Steuersignals für das Stellglied wird somit direkt sichtbar. Hierzu sei bereits an dieser Stelle vorweggenommen, dass sich

in der Darstellung gemäß Abbildung 15 eine regelungstechnisch sehr wichtige Eigenschaft der Charakteristik zeigt: Der jeweils rechte Ast der „U“-förmigen Kurven für die Kohlenmonoxidkonzentration und das CO-Sensorsignal verläuft deutlich flacher als der linke. Dieser Umstand konnte zur Lösung spezifischer Probleme bei der Entwicklung der Regelungsalgorithmen vorteilhaft ausgenutzt werden.

Abbildung 15 zeigt die messtechnisch ermittelte Charakteristik der CO-Emissionen (rote Linie, „CO“), der O<sub>2</sub>-Konzentration (grüne Linie, „O<sub>2</sub>“) und der Brennkammertemperatur der Versuchsfeuerungsanlage (schwarze Linie, „TBk“) in Bezug auf das Stellsignal für den Saugzugventilator als Stellglied für die Verbrennungsluftmenge. Man erkennt, dass sowohl die mit einem Analysator gemessene CO-Konzentration im Rauchgas, als auch das entsprechende Signal des CO-Sensors (blaue Linie, „Oxi-Signal“) bei einem bestimmten Saugzugventilator-Stellwert, ähnlich wie in Großfeuerungsanlagen, ein ausgeprägtes Minimum aufweisen. Dieses Minimum ist letztendlich die Leitgröße bzw. der Zielpunkt der Verbrennungsluftregelung.



**Abbildung 15:** Charakteristik der Brennkammertemperatur (TBk), der O<sub>2</sub>-Konzentration (O<sub>2</sub>), der CO-Konzentration (CO) und des Signal eines CO-Sensors (hier als „Oxi-Signal“ bezeichnet) der Versuchsfeuerungsanlage in Abhängigkeit vom Saugzugventilator-Stellwert. Die Linien verbinden die Mittelwerte der - jeweils aus stationären Betriebszuständen stammenden - Messwerte.

In Abbildung 15 ist weiters zu erkennen, dass die Versuchsfeuerungsanlage im optimalen Betriebspunkt (Minimum des Verlauf der CO-Kurve) sehr niedrige CO-Emissionen, deutlich unter  $100 \text{ mg/Nm}^3$  aufweist, womit die Voraussetzung für eine sehr gute Verbrennungsqualität gegeben ist.

### 3.2.2 CO-Minimierung über CO-Sensor

Wie bereits erwähnt, besteht das Ziel einer CO-geführten Verbrennungsregelung in Hinblick auf CO-Minimierung darin, das in Abbildung 15 (siehe Seite 37) ersichtliche Minimum der CO-Emissionen bzw. des CO-Sensors unter allen Betriebsbedingungen der Feuerung anzusteuern und letztendlich einzustellen.

Bei Großfeuerungsanlagen gelang dies mit Hilfe eines Regelungsalgorithmus, der im Prinzip auf folgender Logik beruht:

- Die Verbrennungsluftmenge (bzw. im gegenständlichen Fall der Saugzugventilator) wird ständig (im gegenständlichen Fall 1 mal pro Sekunde) variiert. War sie im letzten Messintervall auf „zunehmend“ eingestellt und hat das Signal des CO-Sensors in dieser Zeit ebenfalls zugenommen, so wird sie auf „abnehmend“ umgeschaltet.
- War die Verbrennungsluftmenge im letzten Messintervall auf „zunehmend“ eingestellt und hat das Signal des CO-Sensors in dieser Zeit abgenommen (oder ist gleich geblieben), so bleibt sie auf „zunehmend“ eingestellt.
- War die Verbrennungsluft im letzten Messintervall auf „abnehmend“ eingestellt und hat das Signal des CO-Sensors in dieser Zeit zugenommen, so wird sie auf „zunehmend“ umgeschaltet.
- War die Verbrennungsluftmenge im letzten Messintervall auf „abnehmend“ eingestellt und hat das Signal des CO-Sensors in dieser Zeit abgenommen (oder ist gleich geblieben), so bleibt sie auf „abnehmend“ eingestellt.

Vereinfacht ausgedrückt: Nach jeder Änderung der Verbrennungsluftmenge wird geprüft, ob das Signal des CO-Sensors in der Folge größer oder kleiner wurde. Wurde es größer, dann „kehrt die Veränderung der Verbrennungsluftmenge um“. Wurde es hingegen kleiner oder bleib es gleich, dann „fährt die Veränderung der Verbrennungsluftmenge in der gleichen Richtung weiter“. Man erkennt anhand von

Abbildung 15 sehr leicht, das der obige Algorithmus dazu führt, dass die Verbrennungsluftmenge bzw. das entsprechende elektrische Stellsignal schrittweise zum Minimum des CO-Sensorverlaufs wandert und auch dort bleibt.

Bei der Versuchsfeuerungsanlage (die ja eine Kleinfeuerungsanlage ist) ergaben sich bei Anwendung dieses Algorithmus allerdings folgende Probleme:

- Das Signal des CO-Sensors der Versuchsfeuerungsanlage zeigt wesentlich höhere (nicht durch regelungstechnische, sondern durch chemisch-physikalische Vorgänge der Verbrennung an sich bedingte) Fluktuationen als dies bei Großfeuerungsanlagen normalerweise der Fall ist. Jede „unbegründete“ Fluktuation führt aber gemäß dem obigen Algorithmus zu eine Reaktion des Stellgliedes, das in der Folge oft lange „an einer Stelle vor- und zurückschreitet“ und daher nur sehr langsam dem Minimum des Signals des CO-Sensors zustrebt.
- Leistungsänderungen finden bei Kleinfeuerungsanlagen wesentlich rascher statt als üblicherweise bei Großfeuerungsanlagen. Die Verbrennungsregelung muss bei Leistungsänderungen die Verbrennungsluftmenge rasch genug anpassen können. Sie sollte bei Kleinfeuerungsanlagen somit rascher arbeiten. Wie im vorigen Absatz beschrieben arbeitet die Verbrennungsregelung mit dem obigen Algorithmus tatsächlich aber sogar langsamer, als bei Großfeuerungsanlagen.

Solche Probleme wurden bereits 1989 in /9/ beschrieben. Später wurden Lösungsansätze, insbesondere die Einbeziehung einer Lambda-Sonde („CO-Lambda Regelung“) und die Einbeziehung einer Brennkammertemperatur („CO-Brennkammertemperatur-Regelung“) in die Regelung von Kleinfeuerungsanlagen vorgeschlagen /10/. Im gegenständlichen Projekt wurden diese Möglichkeiten speziell auf ihre Eignung zur Regelung von Kleinfeuerungsanlagen untersucht (CO-Minimierung über CO-Sensor und Lambda-Sonde, siehe Abschnitt 3.2.3; CO-Minimierung über CO-Sensor und Brennkammertemperatur, siehe Abschnitt 3.2.4; CO-Minimierung über CO-Sensor, Brennkammertemperatur und Brennstoffmenge, siehe Abschnitt 3.2.5).

Weiters wurde eine neue Lösungsmöglichkeit, bei der der zeitliche Gradient der Brennstoffmenge im Regelungsalgorithmus berücksichtigt wird, untersucht (siehe Abschnitt 3.2.5)

### 3.2.3 CO-Minimierung über CO-Sensor und Lambda-Sonde

Die Regelung der Verbrennung über die Sauerstoffkonzentration mittels Lambda-Sonde ist seit langem bekannt. Bei dieser Art der Regelung wird über den gemessenen Lambda-Wert eine bestimmte Sauerstoffkonzentration im Rauchgas eingestellt. In Abbildung 15 (siehe Seite 37) erkennt man, dass unter den gegebenen Bedingungen eine Sauerstoffkonzentration von ca. 11,5 % gerade ideal wäre. Nun besteht aber das Problem, dass die ideale Sauerstoffkonzentration unter anderen Bedingungen eine ganz andere sein kann. Die „Lambda-Sonden Regelung hat somit aus heutiger Sicht folgende Nachteile gegenüber der Regelung mittels CO-Sensors:

- a) Die Sauerstoffkonzentration sagt nur indirekt bzw. nur bedingt etwas über die Vollständigkeit der Verbrennung aus. Das heißt, bei gleicher Sauerstoffkonzentration kann, z. B. abhängig von der Leistung oder dem Brennstoff-Wassergehalt, einmal mehr und einmal weniger CO im Rauchgas sein. Der Sollwert der Sauerstoffregelung muss daher immer so hoch gewählt werden, dass auch bei ungünstigen Randbedingungen ein hinreichend guter Ausbrand gewährleistet ist. Bei günstigen Randbedingungen (trockener Brennstoff, Nennlast) ergeben sich damit unnötige Verluste. Die CO-Konzentration stellt hingegen in jedem Fall die direkte Information über die Vollständigkeit der Verbrennung dar.
- b) Die Lambda Sonden sind für den Einsatz in Kfz-Motoren ausgelegt, die mit einem Lambda-Wert knapp bei 1 betrieben werden. Im Rauchgas von Feuerungen herrscht ein Lambda-Wert in der Größenordnung von 1,4 – 2 vor. Die Lambda Sonden werden dabei in einem Messbereich betrieben, in dem die Empfindlichkeit sehr klein ist (siehe Abbildung 16). Das Signal einer Lambda-Sonde muss somit erheblich verstärkt werden, damit es für die Regelung einer Biomassefeuerung eingesetzt werden kann. Dabei werden aber auch die Signalfluktuationen mit verstärkt und der Zusammenhang zwischen dem Signal der Lambda-Sonde und der tatsächlichen Sauerstoffkonzentration ist mit einer großen Streubreite behaftet. Dieser Umstand wurde anhand der Versuchsf Feuerungsanlage im Detail untersucht.

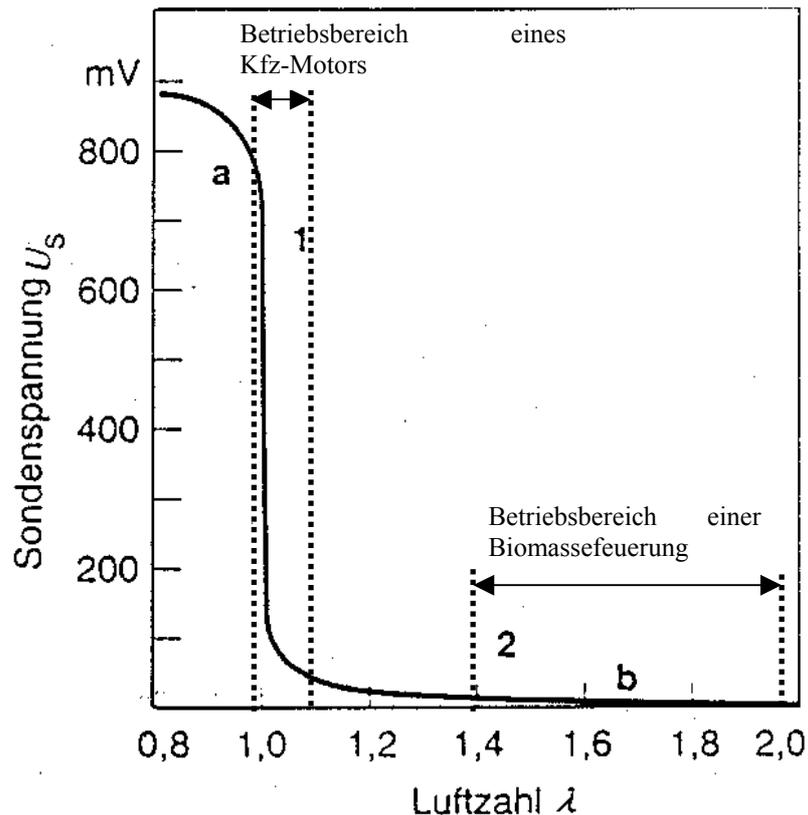
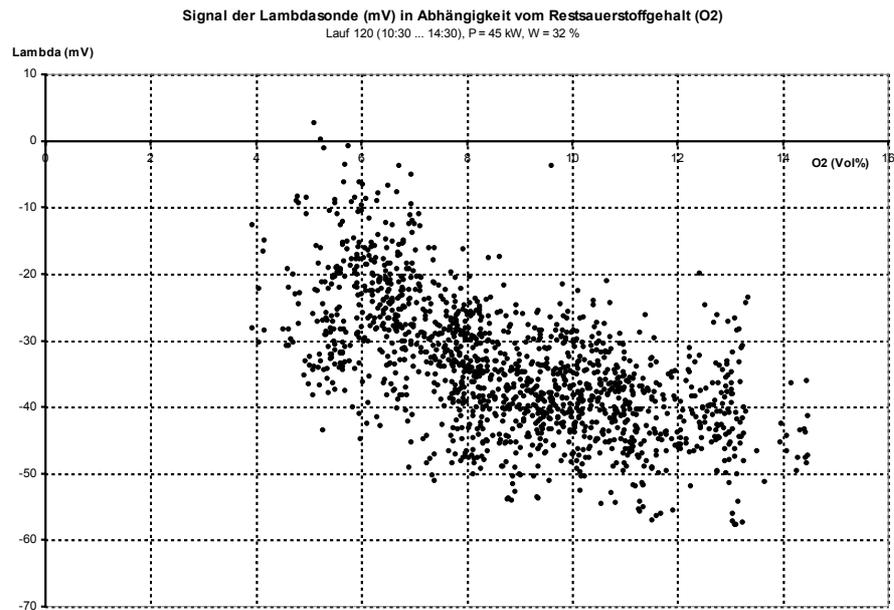


Abbildung 16: Signalcharakteristik einer Lambda-Sonde am Beispiel der Sonde Bosch LSM 11

Abbildung 17 zeigt die im Betrieb der Feuerung gemessenen Lambda-Werte als Funktion der tatsächlichen (mit dem Sauerstoffanalysator gemessenen) Sauerstoffkonzentration. Die unterschiedlichen Signallaufzeiten der beiden Messverfahren wurden berücksichtigt, das heißt, die beiden Zeitverläufe der Messdaten wurden zunächst nachträglich „übereinandergeschoben“, erst dann wurde die Korrelation vorgenommen. Man erkennt einerseits den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen dem Signal der Lambda-Sonde und der Sauerstoffkonzentration, andererseits aber auch die erhebliche Streuung, die bei Verwendung des Signals als Sollwert für eine Regelung zu erheblichen Problemen führen kann.



**Abbildung 17:** Korrelation des Ausgangssignals einer Lambda-Sonde Bosch LSM 11 mit der tatsächlichen Sauerstoffkonzentration, gemessen mit einem Sauerstoffanalysator (unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Signallaufzeiten) an der Versuchsfeuerungsanlage

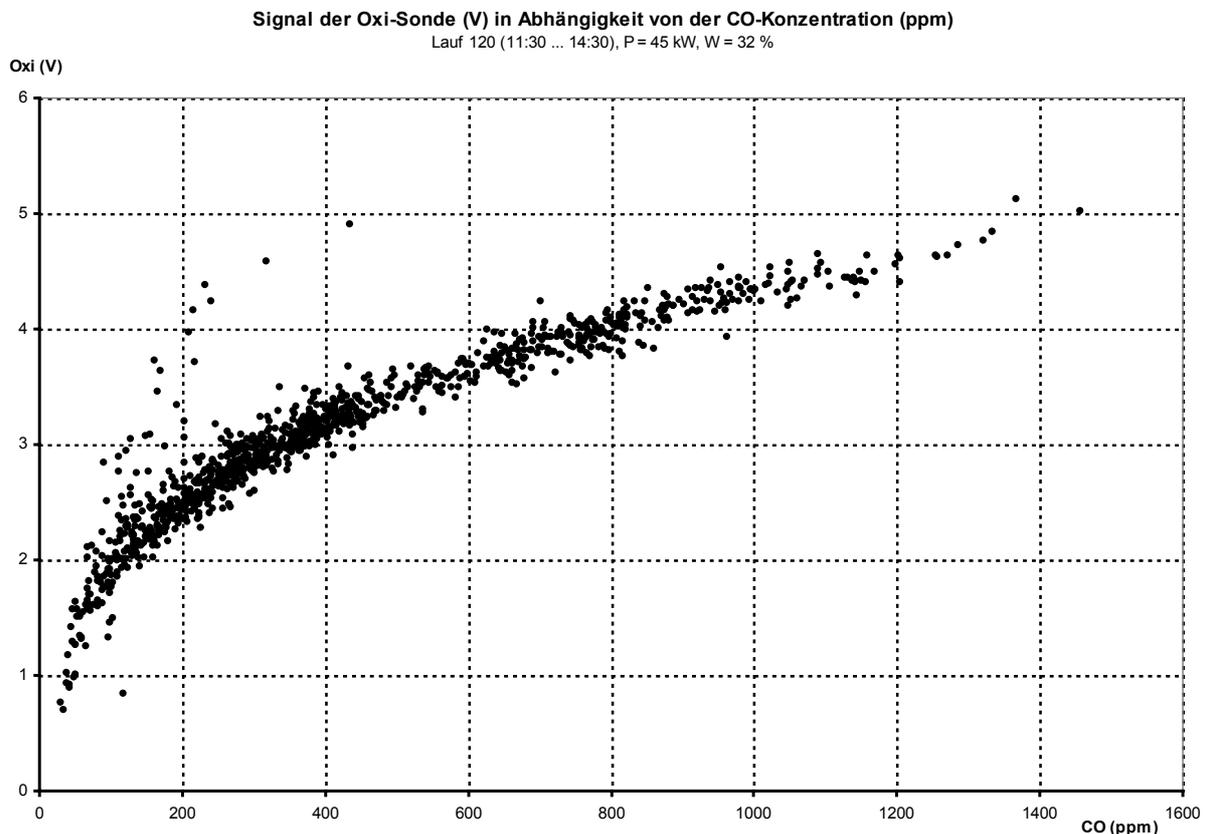
- c) Die Lambda-Regelung arbeitet mit der absoluten Höhe des Messwerts. Langzeitdrift oder Querempfindlichkeiten der Sonde (z. B. gegenüber der Gas-temperatur oder der Gaszusammensetzung) verändern daher den Betriebspunkt der Regelung. Eine CO-Regelung hingegen arbeitet wie schon erwähnt nicht mit dem Absolutwert sondern lediglich mit dem zeitlichen Gradienten des Signals.

Aufgrund der oben beschriebenen Nachteile der Lambda-Sonde wurde wie erwähnt bereits 1992 /10/ die Kombination der Lambda-Sonde mit einem CO-Sensor vorgeschlagen. Die oben erwähnte Anpassung des Sollwertes des Lambda-Regelung soll dabei aufgrund des Signals des CO-Sensors erfolgen. Damit kann aber grundsätzlich nur der unter Absatz a) beschriebene Nachteil (Sollwert-anpassung) beseitigt werden. Möglicherweise ergibt sich indirekt auch eine gewisse „Entschärfung“ des unter Absatz c) beschriebenen Problems. Was aber jedenfalls bleibt, ist der in Absatz b) beschriebene Nachteil der großen Streubreite.

Abbildung 18 zeigt im Vergleich zu Abbildung 17 das Signal des CO-Sensors als Funktion der tatsächlichen (mit dem CO-Analysator gemessenen) Kohlenmonoxid-

konzentration. (Die unterschiedlichen Signallaufzeiten der beiden Messverfahren wurden auch hier berücksichtigt). Man erkennt, dass diese Korrelation eine wesentlich kleinere Streubreite aufweist, als dies bei einer Lambda-Sonde der Fall ist. Für die „Ausreißer“ links oben kann zwar keine Begründung angegeben werden, sie treten jedoch nur sehr vereinzelt auf und haben auf das Regelverhalten der Feuerungsanlage dementsprechend wenig Einfluss.

Da der Einsatz zweier Sonden natürlich auch mit höheren Kosten verbunden ist, wurde das Verfahren der „CO-Lambda-Regelung“ schließlich nicht mehr weiter verfolgt, sondern die weiteren Arbeiten konzentrierten sich darauf, eine Lösung mit einem CO-Sensor alleine oder in Kombination mit einer unproblematischeren Größe als dem Signal einer Lambda-Sonde zu finden.



**Abbildung 18:** Korrelation des Ausgangssignals eines CO-Sensors FIGARO TGS 109 mit der tatsächlichen Kohlenmonoxidkonzentration, gemessen mit einem Kohlenmonoxidanalysator (unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Signallaufzeiten) an der Versuchsfeuerungsanlage

### 3.2.4 CO-Minimierung über CO-Sensor und Brennkammertemperatur

Wie in Abbildung 15 (siehe Seite 37) ersichtlich stellt neben der Sauerstoffkonzentration auch die Brennkammertemperatur ein Signal dar, das gewisse Aussagen über den Betriebszustand der Feuerungsanlage enthält und somit als ergänzende Information zur Verbesserung einer CO-geführten Verbrennungsregelung dienen kann.

Die Brennkammertemperatur ist leicht und kostengünstig messbar. Die Messsignale weisen nur eine sehr geringe Streubreite auf.

Allerdings ist die Brennkammertemperatur in besonders hohem Maß von den übrigen Verbrennungsbedingungen, insbesondere vom Wassergehalt des Brennstoffs, vom Lastzustand der Feuerungsanlage, und vom Verbrennungsluftüberschuss abhängig. Der Absolutwert der Brennkammertemperatur kann daher im allgemeinen nur für die Regelung stationärer Zustände, in denen die Brennkammertemperatur im wesentlichen eine Funktion der Stellgrößen ist, herangezogen werden.

Der zeitliche Gradient des Verlaufs der Brennkammertemperatur enthält jedoch wesentlich allgemeingültigere Informationen. Insbesondere ist es möglich, anhand des zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur (siehe wiederum Abbildung 15, Seite 37) in Kombination mit dem Signal einer CO-Sonde einer CO-geführten Verbrennungsregelung die Information zu gewinnen, ob sie sich die Feuerungsanlage momentan gerade im linken oder im rechten Ast des Signalverlaufs des CO-Sensors befindet. Dabei wird der Umstand ausgenützt, dass im linken Ast die Abnahme des Signals des CO-Sensors statistisch häufiger mit einer Abnahme der Brennkammertemperatur einhergeht und umgekehrt: Die Steigungen der beiden Kurvenverläufe haben links neben dem Minimum des Signals des CO-Sensors beide einen negativen Wert. Im rechten Bereich geht die Zunahme des Signals des CO-Sensors statistisch häufiger mit einer Abnahme der Brennkammertemperatur einher bzw. umgekehrt: Die Steigungen der beiden Kurvenverläufe haben rechts neben dem Minimum des Signals des CO-Sensors unterschiedliche Vorzeichen.

Die Realisierung dieser Regelung erfolgt dadurch, dass das Stellglied zunächst gemäß den bereits in Abschnitt 3.2.3 erläuterten Algorithmen in kleinen Schritten verstellt wird und im Anschluss daran in weiteren kleinen Schritten verstellt wird, die

durch den Vergleich der zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur und des Signals des CO-Sensors begründet sind.

Die ergänzenden Regelungsalgorithmen lauten daher im Prinzip wie folgt:

- Haben sich bei der letzten Änderung des Verbrennungsluft-Stellgliedes CO-Sensorsignal und Brennkammertemperatur in unterschiedliche Richtungen verändert (rechter Ast des CO-Kurvenverlaufs in Abbildung 15), dann erfolgt ein zusätzlicher Schritt in Richtung „weniger Verbrennungsluft“, haben sich die beiden Signale hingegen in gleicher Richtung verändert, dann erfolgt ein zusätzlicher Schritt in Richtung „mehr Verbrennungsluft“.

Diese ergänzend eingeführten Änderungsschritte führen dazu, dass die Regelung das Minimum der CO-Emissionen rascher auffindet. Sie können das Regelungsverhalten im Bereich starken Verbrennungsluftmangels allerdings auch verschlechtern, weil dort die Steigungen des Verlauf der Brennkammertemperatur und des CO-Sensorsignals wiederum verschiedenes Vorzeichen haben sind - gleich wie bei Verbrennungsluftüberschuss (siehe Abbildung 15, Seite 37) Bereich des Diagramms unter 6 % Sauerstoff). Bei bestimmungsgemäßer Funktion der Regelung sollte die Feuerungsanlage aber normalerweise nie in einen solchen Zustand hineingeraten. Trotzdem sind Maßnahmen zu treffen, die dazu führen, dass die Regelung die Feuerungsanlage gegebenenfalls aus einem solchen Zustand wieder hinausführen kann. Die einfachste Möglichkeit hierzu besteht darin, den Absolutwert des Sensorsignals ergänzend als Information in die Regelung mit einzubeziehen. Wie in Abbildung 15 ersichtlich, können die Signalspannungen im linken Bereich eine Höhe erreichen, die im rechten Bereich nicht auftritt (im gegenständlichen Fall liegt die obere Grenze der Signalspannung des Sensors TGS 816 im rechten Bereich bei rund 10 Volt).

Man kann daher den obigen Algorithmus noch um eine weitere Option ergänzen, die lautet:

- Wenn die Signalspannung des CO-Sensors größer als ein bestimmter Grenzwert ist, dann soll die Verbrennungsluftmenge um einen relativ großen Schritt erhöht werden.

Dieser Grenzwert ist allerdings wiederum von verschiedenen Bedingungen abhängig und für die Feuerungsanlage charakteristisch. Er ist daher nicht allgemein gültig,

sondern muss für die verschiedenen Typen von Feuerungsanlagen und Typen von CO-Sensoren eingestellt werden. Wenn man ihn hoch genug wählt (zum Beispiel größer als 12 Volt) gilt er nach bisherigen Erfahrungen unter allen Bedingungen. Man nimmt damit allerdings in Kauf, dass unter gewissen ungünstigen Umständen (zum Beispiel im instationären Betrieb) vorübergehend höhere Emissionsspitzen im Bereich des Verbrennungsluftmangel auftreten können. Um diesen Nachteil zu vermeiden wurde noch nach weiteren Verbesserungsmöglichkeiten gesucht. Eine sehr gute Möglichkeit, das Regelverhalten in instationären Betriebszuständen zu verbessern besteht darin, den zeitlichen Gradienten der Brennstoffmenge im Regelungsalgorithmus zu berücksichtigen. Diese Möglichkeit wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

### **3.2.5 CO-Minimierung über CO-Sensor, Brennkammertemperatur und Brennstoffmenge**

Die in Abschnitt 3.2.4 beschriebene Verbrennungsregelung zeigt erwartungsgemäß umso besseres Regelverhalten, je stationärer der Betrieb der Feuerungsanlage ist. Im instationären Fall, also insbesondere bei Vergrößerung oder Verkleinerung der Brennstoffmenge, verschiebt sich der optimale Betriebspunkt der Feuerung und die Verbrennungsregelung muss ihn ständig neu „suchen“. Rasche Änderungen der Brennstoffmenge und damit des optimalen Betriebspunktes wirken sich hierbei nachteilig aus. Eine Verbesserungsmöglichkeit in instationären Zuständen besteht somit darin, die Verbrennungsluft gegenüber dem Momentanwert grundsätzlich um Schritte zu erhöhen, die der Erhöhung der Brennstoffmenge proportional sind, und umgekehrt. Diese Option wird somit nur bei Änderung der Brennstoffmenge wirksam und „nimmt die Verbrennungsluft näherungsweise in den neuen optimalen Betriebspunkt mit“. Die überlagerte CO-Brennkammertemperaturregelung findet den tatsächlichen neuen optimalen Betriebspunkt somit sehr viel rascher, weil sie sich ja schon „in der Nähe“ befindet. Im stationären Fall, also bei gleichbleibender Brennstoffmenge, hat diese Option keinen Einfluss. Mit diesem Algorithmus konnte ein sehr gutes Regelverhalten der Versuchsfeuerungsanlage erreicht werden. Abbildung 19 (siehe Seite 48) zeigt beispielhaft Betriebsergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage. Um das Verhalten der Verbrennungsluftregelung selektiv zu unter-

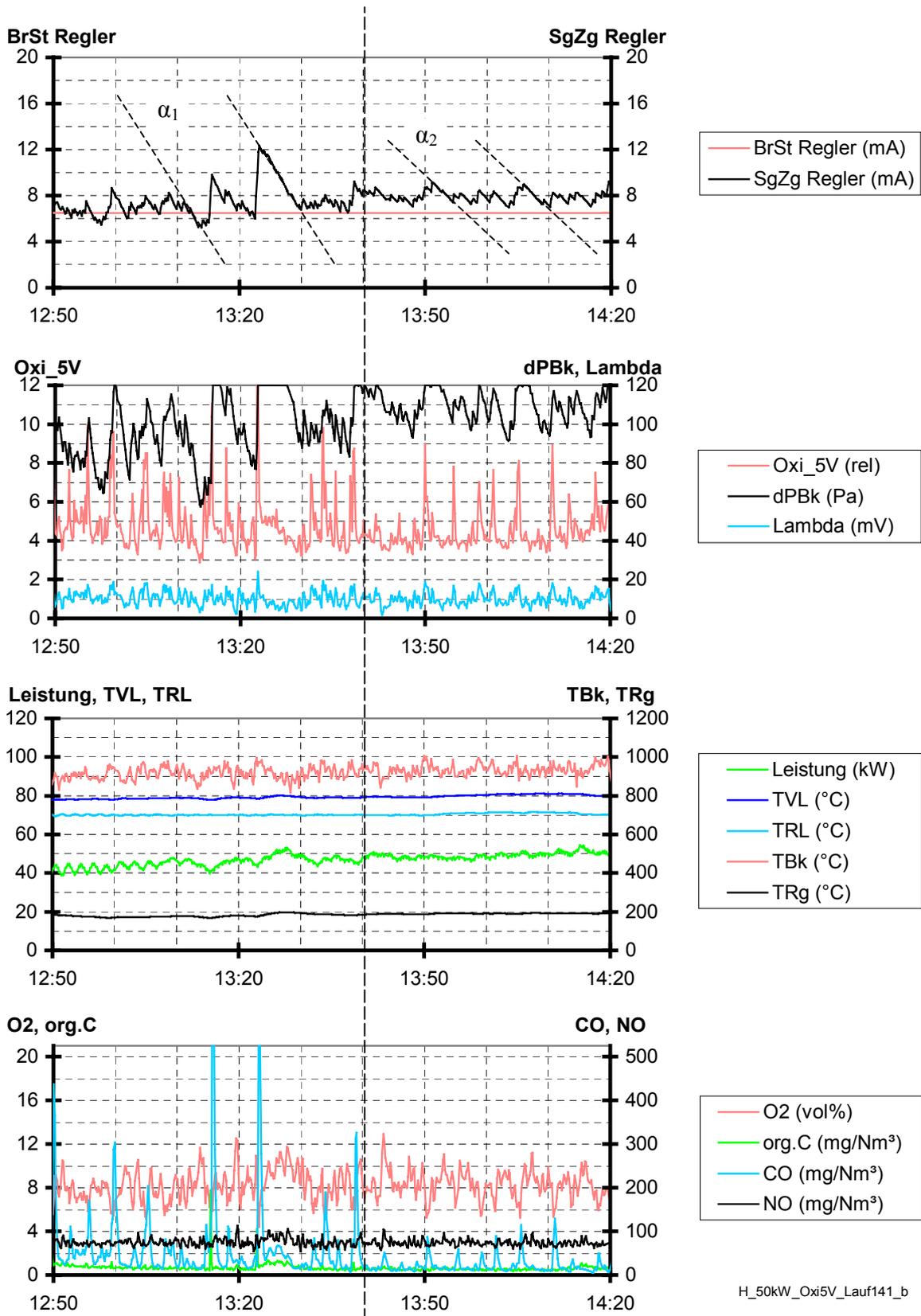
suchen wurde der Brennstoffregler (oberstes Diagramm, rote Linie, „BrSt Regler“) bei diesem Versuch konstant gehalten. Man erkennt im obersten Diagramm weiters das Verhalten des Stellsignals (oberstes Diagramm, schwarze Linie, „SgZg Regler“ = Ausgangsstrom des Reglers zum Frequenzumformer des Saugzuggebläses als Stellglied für die Verbrennungsluft). Auffällig ist der sägezahnartige Zeitverlauf des Signals mit steilen Anstiegsflanken und flacheren abfallenden Flanken. Dies ist dadurch begründet, dass sich das Stellsignal bei der Suche nach dem Minimum der CO-Emissionen stets in kleineren Schritten abwärts, also in Richtung weniger Verbrennungsluft, und in größeren Schritten aufwärts, also in Richtung mehr Verbrennungsluft bewegt. Allfällige kurzzeitige Emissionsspitzen, begründet durch das zufällige Hineinfallen etwas größerer Portionen von Brennstoff vom Austritt der Zuführungsschnecke auf das Glutbett, können auf diese Weise rascher abgefangen werden.

Im zweiten Diagramm ist der Verlauf des Signals des CO-Sensors (rote Linie, „Oxi-5V“) und des Unterdrucks in der Brennkammer (schwarze Linie, „dPBk“) als Folge der Drehzahl des Saugzuggebläses zu sehen. Weiters enthält das zweite Diagramm den Zeitverlauf des Signals eine Lambda-Sonde (blaue Linie, „Lambda“), das jedoch nur gemessen und nicht in der Regelung berücksichtigt wurde.

Im dritten Diagramm sind Leistung (grüne Linie, „Leistung“), Vorlauftemperatur (dunkelblaue Linie, „TVL“), Rücklauftemperatur (hellblaue Linie, „TRL“) Brennkammertemperatur (rote Linie, „TBk-1“) und Rauchgastemperatur (schwarze Linie, „TRg“) zu sehen.

Das vierte Diagramm zeigt die Rauchgasbestandteile Sauerstoff (rote Linie, „O<sub>2</sub>“), Kohlenwasserstoffe (grüne Linie, „C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>“), Kohlenmonoxid (blaue Linie, „CO“) und Stickoxid (schwarze Linie, „NO“).

Die Kohlenmonoxidemissionen hielten sich überwiegend unter 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Der Zeitraum zwischen 13:00 und 13:40 ist noch durch drei größere CO-Emissionsspitzen zwischen 200 und knapp über 300 mg/Nm<sup>3</sup> und zwei weitere Emissionsspitzen von knapp über 500 mg/Nm<sup>3</sup> gekennzeichnet.



H\_50kW\_Oxi5V\_Lauf141\_b

**Abbildung 19:** Versuchslauf mit konstanter Brennstoffmenge entsprechend Vollast (50 kW) zur selektiven Untersuchung des Verhaltens der Verbrennungsluftregelung. Ab ca. 13:40 (strichlierte senkrechte Linie) optimal angepasste Regelparameter, (langsamere Reduktion der Sekundärluft gemäß Winkel  $\alpha_2$  statt  $\alpha_1$ )

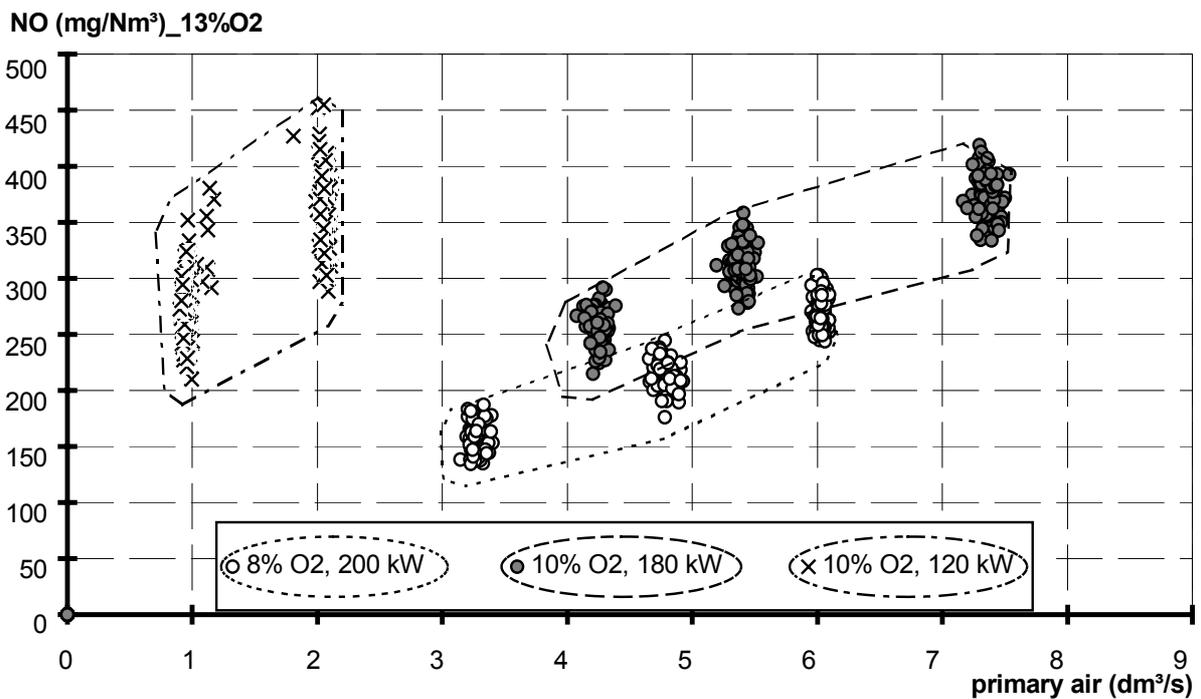
Diese Emissionsspitzen wurden - wie im obersten Diagramm anhand des Verlaufs des Stellsignals (schwarze Linie, SgZg Regler“) erkennbar - in jedem Fall durch das Regelungssystem sofort abgefangen, sind aber trotzdem unerwünscht. Aus diesem Grund wurde in der Zeit nach 13:40 (strichlierte senkrechte Linie) die Schrittweite der Abnahme der Verbrennungsluft etwas verkleinert. Man erkennt dies unter anderem auch daran, dass die abfallende Flanke der „Sägezahnkurve“ des Saugzugventilators ab diesem Zeitpunkt in einem flacheren Winkel  $\alpha_2$  verläuft als vorher mit  $\alpha_1$ . Der Mittelwert des Stellgliedes und damit der Verbrennungsluftmenge wurden damit etwas erhöht. Die Schwankungsbreite der Regelvorgänge wurde dadurch wesentlich kleiner. Die durch die geringfügigen Diskontinuitäten der Brennstoffzuführung begründeten CO-Emissionsspitzen wurden aufgrund dieser Maßnahme noch rascher abgefangen und blieben zumeist kleiner als  $100 \text{ mg/Nm}^3$ . Die Halbstunden-Mittelwerte der CO-Emissionen lagen von diesem Zeitpunkt an bei ca.  $20 \text{ mg/Nm}^3$ . Die Sauerstoffkonzentration im Rauchgas lag im Mittel bei ca. 8 %. Die Kohlenwasserstoffkonzentration im Rauchgas lag im Mittel bei ca.  $1 \text{ mg/Nm}^3$ . Die Stickoxidkonzentration lag im Mittel bei ca.  $75 \text{ mg/Nm}^3$ . Brennstoff war Fichtenhackgut mit einem Wassergehalt von ca. 25 %.

### 3.3 NO<sub>x</sub>-Minimierung durch Verbrennungsregelung

Die grundsätzlichen Möglichkeiten der NO<sub>x</sub>-Minimierung durch Verbrennungsregelung wurden in /5/ an Großfeuerungsanlagen untersucht. Das wichtigste für die Anwendung dieser Verfahren auch bei Kleinfeuerungsanlagen relevante Ergebnis ist die Tatsache, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch das Einstellen unterstöchiometrischer Bedingungen im Glutbett signifikant verringert werden können. Dies kann im Prinzip durch Verringerung der Primärluftmenge erreicht werden. Die heterogenen Reaktionen werden dadurch naturgemäß verlangsamt womit sich die Verweilzeit der festen Phase erhöht. Gleiche Leistung erfordert daher in diesem Fall ein größeres Glutbettvolumen bzw. eine größere Brennkammer.

Abbildung 20 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emissionen von der Primärluftmenge an einer 250 kW Hackgutfeuerungsanlage mit Wurfbeschickung bei Verwendung von Spanplatten-Sägemehl als Brennstoff unter verschiedenen

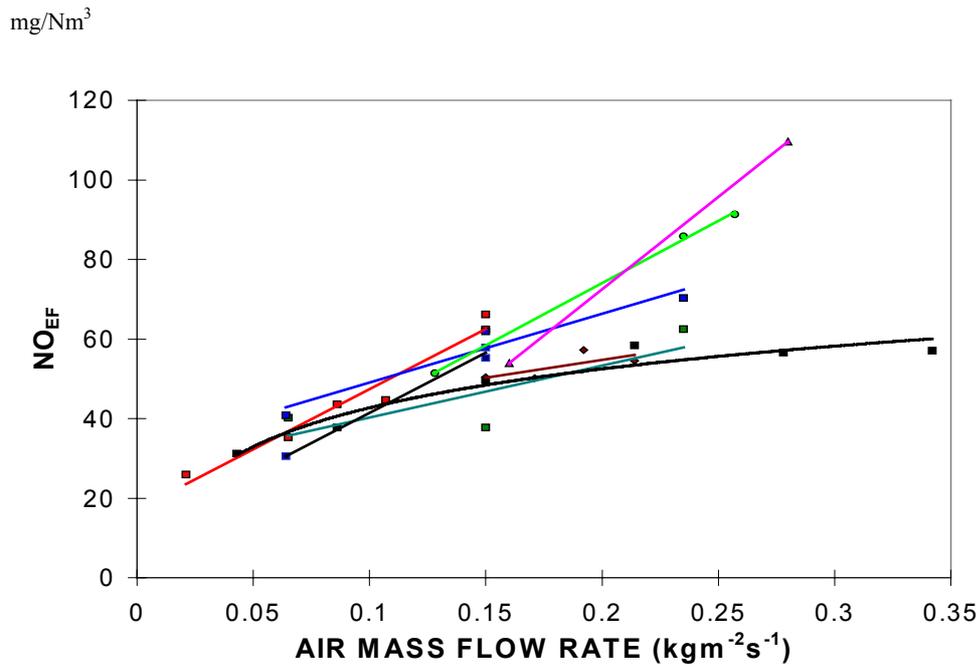
Verbrennungsbedingungen (aus /5/). Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit der NO-Emissionen von der Primärluftmenge. Die niedrigsten NO-Emissionswerte konnten bei hoher Leistung, niedriger Sauerstoffkonzentration im Rauchgas und geringer Primärluftmenge erreicht werden.



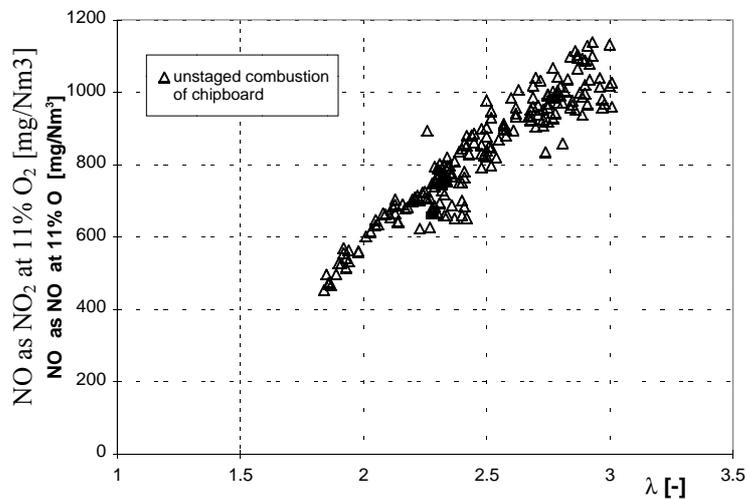
**Abbildung 20:** NO-Emissionen einer 250 kW Holzhackgut-Rostfeuerung mit Wurfbeschickung bei Verwendung von Spanplatten-Sägemehl als Brennstoff in Abhängigkeit von der Primärluftmenge in verschiedenen Leistungsbereichen (aus /5/)

Sehr ähnliche Ergebnisse konnten in Untersuchungen von VTT-Energy /5/ mit einer Durchbrandfeuerung (siehe [Abbildung 21](#)) sowie in Untersuchungen der ETH-Zürich und der Fa. VERENUM in Zürich /5/ mit einer Unterschubfeuerung (siehe [Abbildung 22](#)) erzielt werden.

Bei allen Untersuchungen zeigt sich eine signifikante Abnahme der NO<sub>x</sub>-Emissionen mit der Primärluftmenge.



**Abbildung 21:** NO-Emissionen einer Durchbrandfeuerung in Abhängigkeit von der Primärluftmenge (Ergebnisse von Untersuchungen von VTT-Energy /5/)



**Abbildung 22:** NOx Emissionen in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftüberschuss in einer Unterschubfeuerung (Ergebnisse von Untersuchungen der ETH-Zürich /5/)

Trotz der unterstöchiometrischen Bedingungen im Glutbett und der damit verbundenen hohen CO-Konzentration im Primärbereich der Brennkammer kann der vollständige Ausbrand der Gasphase mit den in den vorigen Abschnitten beschriebenen Regelungsverfahren erfahrungsgemäß sichergestellt werden.

Sowohl für Groß-, als auch für Kleinfeuerungsanlagen erscheint daher in Hinblick auf geringst mögliche NO<sub>x</sub>-Emissionen eine Regelung sinnvoll, die die Primärluft so gering wie möglich hält. Dies kann indirekt dadurch erreicht werden, dass über die Brennstoffzufuhr mit Hilfe eines Lichtschrankens das Glutbett stets so hoch wie möglich gehalten wird. Über die Primärluft wird die Abbrandgeschwindigkeit und damit die Leistung geregelt (siehe Abschnitt 4). Auch der umgekehrte Fall ist möglich: Der Brennstoff wird in Abhängigkeit der Leistung zugeführt und die Primärluft bewirkt die größtmögliche Glutbetthöhe. Aufgrund der Tatsache, dass die Minimierung der CO-Emissionen allein durch Regelung der Sekundärluft gelingt (siehe vorhergehender Abschnitt) steht die Primärluft als Regelparameter für die NO<sub>x</sub>-Emissionen frei zur Verfügung. Das hierzu gültige Regelschema ist bereits in Abbildung 14 (siehe Abschnitt 3.1.3, Seite 35) mit enthalten.

#### **4. TEST UND OPTIMIERUNG DER LEISTUNGSREGELUNG**

In diesem Arbeitsschritt wurde zunächst die Leistungsregelung der Versuchsfeuerungsanlage untersucht und optimiert (Abschnitte 4.1. bis 4.3). Im Anschluss daran wurden mit Hilfe des Regelungs-Versuchsstandes grundlegende Untersuchungen zum optimalen Wärmemanagement des „Hauses der Zukunft“ durchgeführt. Hierzu wird die Versuchsfeuerungsanlage anhand eines im oben bereits erwähnten Projekt „Anforderungsprofile für Biomassefeuerungen zur Wärmeversorgung von Objekten mit niedrigem Energiebedarf“ /4/ ermittelten Szenarios in Bezug auf die optimale Leistungsregelung von „Referenzbauten“ untersucht (Abschnitt 4.4).

##### **4.1 Regelungstechnisch relevante Vorgänge bei der Leistungsregelung**

Die in einer Biomassefeuerung pro Zeiteinheit erzeugte fühlbare Wärme muss im Mittel mit der abgenommenen Leistung übereinstimmen.

Die Parameter, die die abgegebene Leistung bestimmen sind:

- die aus den Reaktionen stammenden Wärmeströme und
- die Wärmeverluste (Rauchgas- und Abstrahlungsverluste).

Die Aufgabe der Leistungsregelung besteht nun darin, einerseits die Wärmeverluste der Feuerungsanlage zu minimieren und andererseits die abgegebene Wärmeleistung der gebrauchten bzw. genutzten Wärmeleistung anzupassen.

Bei Vorhandensein eines externen Pufferspeichers muss die von der Feuerungsanlage abgegebene Wärmeleistung nicht mit der momentan genutzten Wärmeleistung übereinstimmen, womit sich ein Freiheitsgrad im Zeitverlauf der abgegebenen Leistung ergibt. Die Feuerungsanlage muss in diesem Fall nicht unbedingt kontinuierlich betrieben werden, sondern sie kann im Taktbetrieb betrieben werden.

Ist kein externer Pufferspeicher vorhanden, so werden kleine Unterschiede zwischen der abgegebenen und genutzten Wärmeleistung durch Erwärmung oder Abkühlung der übrigen Wärmespeichermassen der Heizanlage ausgeglichen. Die wichtigste Speichermasse ist natürlich das Wasser im Heizkreis; der wichtigste regelungstechnisch relevante Parameter ist somit dessen Temperatur. Grundsätzlich kommt sowohl die Vorlauftemperatur (meist auch als „Kesseltemperatur“ bezeichnet) als auch die Rücklauftemperatur als Regelgröße in Frage. Da Regelvorgänge an der Feuerungsanlage allerdings erst mit einer unter Umständen relativ langen „Totzeit“ einen Einfluss auf die Rücklauftemperatur haben, was zu Stabilitätsproblemen der Regelung führen kann, wird der „schnelleren“ Kesseltemperaturregelung im allgemeinen der Vorzug gegeben. Eine Änderung der Rücklauftemperatur gibt allerdings am raschesten Aufschluss über eine Änderung der vom Benutzer abgenommen Leistung. Ihre Berücksichtigung als „Störgröße“ in der Leistungsregelung ist daher von Vorteil (siehe Abschnitt 4.2.3).

Die Kesseltemperaturregelung von Feuerungen kann nach verschiedenen Algorithmen, die im folgenden Abschnitt 4.2 beschrieben werden, erfolgen.

## **4.2 Algorithmen zur Leistungsregelung**

Der gegenständliche Abschnitt enthält im Wesentlichen an sich bekanntes „Schulwissen“ (z. B. /12/). Die Algorithmen sollen aber hier mit besonderem Bezug

auf die bei Biomassefeuerungen regelungstechnisch relevanten Größen noch einmal zusammengefasst und erörtert werden.

#### **4.2.1 Proportionalregelung der Kesseltemperatur**

Die Leistungsregelung einer Feuerungsanlage über eine Proportionalregelung der Kesseltemperatur ist die früher ausschließlich und auch heute noch oft angewandte Methode. Zur Messung der Kesseltemperatur wurde hierzu in den meisten Fällen im Bereich des Vorlaufs im Kessel eine als Temperaturfühler wirkende Bimetallfeder angebracht. Bei Stückholzfeuerungen wurde von dieser Bimetallfeder aus über das bekannte „Ketterl“ mit Hilfe einer Luftklappe die Verbrennungsluft und damit die Abbrandgeschwindigkeit entsprechend gedrosselt.

Wenn sich der Einfluss der Luftklappe auf die Primärluft beschränkt und ergänzend eine leistungsunabhängige Sekundärluftregelung, die die Verbrennungsqualität gemäß den in Abschnitt 3 beschriebenen Methoden sicherstellt, vorhanden ist, ist dagegen auch heute noch nichts einzuwenden. Schlecht sind allerdings Stückholzkessel, bei denen die gesamte Verbrennungsluft über die drosselnde „Primärluftklappe“ eintritt. Aufgrund der starken Sauerstoffzehrung der Primärreaktionen steht bei solchen Feuerungen im Allgemeinen nicht mehr genug Sauerstoff für die Sekundärreaktionen zur Verfügung. Sie fahren somit unvermeidlich die meiste Zeit im Zustand des Verbrennungsluftmangels mit hohen Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen.

Auch bei Hackgutfeuerungen kann die Primärluft zur Leistungs- bzw. Kesseltemperaturregelung herangezogen werden. Die Regelung der Brennstoffzufuhr orientiert sich in diesem Fall an der Höhe des Glutbetts. Die Vorteile dieses Verfahrens in Hinblick auf die Minimierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen wurden bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben. In diesem Fall sind in den folgenden Gleichungen 1 - 5 die Brennstoff-Terme („BR<sub>x</sub>“) durch entsprechende Primärluft-Terme zu ersetzen. Alle anderen Terme bleiben gleich.

Die Regelung der Kesseltemperatur über die Brennstoffmenge erfolgt im Prinzip nach folgendem Algorithmus:

$$BR_P = P_{BR} * (T_{K_{Sollwert}} - T_{K_{Istwert}}) \quad (\text{Gleichung 1})$$

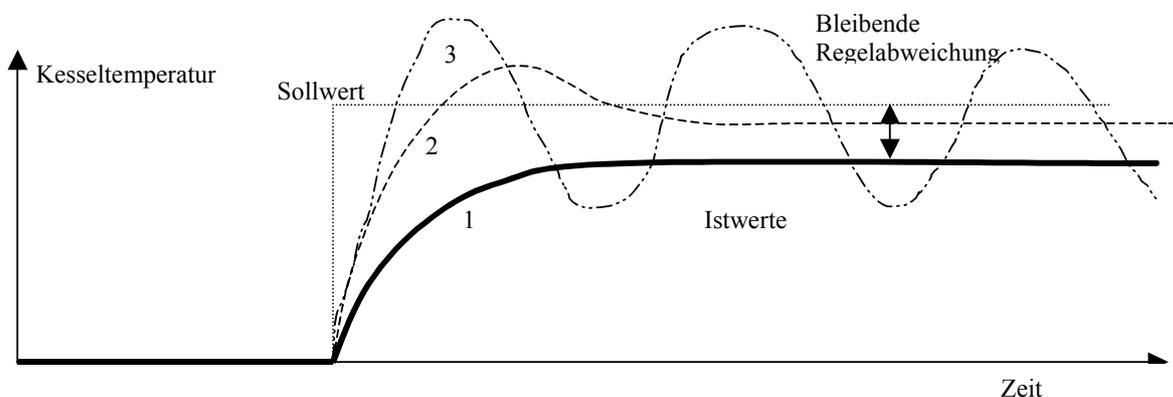
$BR_P$  ..... Brennstoffmenge bei Proportionalregelung

$P_{BR}$  ..... Proportionalitätsfaktor

$T_{K_{Sollwert}}$  ..... Sollwert der Kesseltemperatur

$T_{K_{Istwert}}$  ..... Istwert der Kesseltemperatur

Man erkennt anhand von Gleichung 1, dass ein Proportionalregler nicht ohne Abweichung vom Temperatur-Sollwert regeln kann - die Brennstoffmenge bzw. Primärluftmenge wäre ja dann Null. Der Proportionalregler hat daher grundsätzlich eine „Bleibende Regelabweichung“ (Siehe Kurve 1 in [Abbildung 23](#)). Das heißt, wenn der Betreiber 80 °C im Kesselwasser haben will, dann muss er z. B. 90°C am Handrad als Sollwert einstellen, bei hoher Leistung und hohem Wassergehalt des Brennstoffs mehr, bei geringer Leistung bzw. geringem Wassergehalt des Brennstoffs weniger. Diese Abweichung kann in einem gewissen Maß durch Kalibrierung der Zahlen am Handrad kompensiert werden. Die Kompensation stimmt aber, wie gesagt, immer nur für eine bestimmte Leistung und Brennstoffbeschaffenheit.



**Abbildung 23:** Regelvorgänge bei Proportionalregelung: Verlauf der Kesseltemperatur nach sprunghafter Änderung des Sollwertes bei verschiedenen großen Proportionalitätsfaktoren 1, 2 und 3. (z. B. /12/)

Die bleibende Regelabweichung ist umso kleiner, je größer der Proportionalitätsfaktor ist. Dieser ist bei mechanischen Regelungen durch die Geometrie der Anordnung bestimmt. Es gibt jedoch eine Obergrenze des Proportionalitätsfaktors,

bei der die Regelung beginnt, überzuschwingen (Kurve 2) oder überhaupt instabil wird (Kurve 3). Abhilfe bietet eine sogenannte Proportional-Integral-Differential Regelung („PID“- Regelung), die in Abschnitt 4.2.2 beschrieben wird.

#### 4.2.2 „PID“-Regelung der Kesseltemperatur

Die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Schwingungen können gegebenenfalls durch „Dämpfungsglieder“ gedämpft werden. Sie reagieren auf die zeitliche Kesseltemperaturänderung. Das heißt vom Proportionalanteil der Brennstoffmenge wird ein Anteil abgezogen, der dem Kesseltemperaturanstieg pro Zeiteinheit proportional ist bzw. umgekehrt:

$$BR_{PD} = BR_P - D_K * (Tk_{Istwert(t)} - Tk_{Istwert(t-\Delta t)}) / \Delta t \quad (\text{Gleichung 2})$$

$BR_{PD}$ ..... Brennstoffmenge bei Proportional- und Differentialregelung

$BR_P$  ..... Brennstoffmenge bei Proportionalregelung (siehe Gleichung 1)

$D_K$ ..... Dämpfungsfaktor bezogen auf den Gradienten der Kesseltemperatur

$Tk_{Istwert}$ ..... Istwert der Kesseltemperatur

$t$ ..... Zeit

$\Delta t$ ..... Abtastzeitintervall der Regelung

Um die Kesseltemperaturänderung zu bestimmen muss sie zu zwei verschiedenen Zeitpunkten gemessen werden und die Differenz dieser Messwerte muss gebildet werden. Hierzu muss der erste der Messwerte vorübergehend abgespeichert werden. Dies ist nur mit einem elektronischen Regler sinnvoll. Grundsätzliche gibt es auch mechanische Dämpfungsglieder. Deren Einsatz ist aber für die Leistungsregelung einer Biomassefeuerung nicht sinnvoll, weil die Geschwindigkeit der Abläufe viel zu klein ist.

Aber auch ein Dämpfungsglied bzw. ein PD-Regler löst das Problem der bleibenden Sollwertabweichung nicht vollständig. Dies kann nur der Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler). Er zählt zum Proportional- und Differentialanteil der Brennstoffmenge einen Anteil hinzu, der der Temperaturabweichung vom Sollwert proportional ist und überdies mit der Zeit schrittweise aufsummiert (integriert) wird.

Die Brennstoffmenge wird dabei in kleinen Schritten solange erhöht bzw. verringert, bis keine Sollwertabweichung mehr vorhanden ist.

$$BR_{I(t)} = BR_{I(t-\Delta t)} + I_{BR} * (Tk_{Sollwert} - Tk_{Istwert}) / \Delta t \quad (\text{Gleichung 3a})$$

$$BR_{PID} = BR_{PD} + BR_{I(t)} \quad (\text{Gleichung 3b})$$

$BR_I$  ..... Brennstoffmenge bei Integralregelung

$t$  ..... Zeit

$\Delta t$  ..... Abtastzeitintervall der Regelung

$I_{BR}$  ..... Integrationsfaktor

$Tk_{Sollwert}$  ..... Sollwert der Kesseltemperatur

$Tk_{Istwert}$  ..... Istwert der Kesseltemperatur

$BR_{PID}$  ..... Proportional- Integral- und Differentialanteil der Brennstoffmenge

$BR_{PD}$  ..... Proportional- und Differentialanteil der Brennstoffmenge (siehe Gleichung 2)

Auch bei einem solchen Regler ist die Gefahr von Schwingungen zu berücksichtigen, das heißt der integrierende Anteil muss hinreichend klein gehalten werden.

Noch bessere Resultate (vor allem im instationären Betrieb, also bei Leistungsänderung) erzielt man durch Einbeziehung der Leistung bzw. der Rücklauftemperatur in den Regelungsalgorithmus als „Störgröße“ (siehe Abschnitt 4.2.3).

#### 4.2.3 „PID“-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauftemperatur

Die Rücklauftemperatur reagiert wie schon erwähnt viel rascher auf Änderungen der abgenommenen Leistung als die Kesseltemperatur, nämlich bereits in dem Moment, wo die Wasserteilchen eines in seiner Leistung veränderten Heizkörpers am Rücklaufanschluss des Kessels eintreffen. Eine Verringerung der am Heizkörper abgenommenen Leistung führt somit kurzzeitig zu einem Ansteigen der Rücklauftemperatur. Die Brennstoffmenge bzw. die Leistung kann auf Basis der Rücklauftemperatur somit sozusagen „vorbeugend“ reduziert werden, das heißt, noch bevor die Kesseltemperatur auf die Leistungsänderung überhaupt merklich reagiert hat. Das selbe gilt umgekehrt bei Zunahme der am Heizkörper abgenommenen Leistung mit einem Abfall der Rücklauftemperatur als Folge. Die

Differenz zwischen Kessel- und Rücklauf­temperatur ist unter der Voraussetzung eines invarianten Heizwasser-Massenstromes überdies der abgenommenen Leistung proportional und kann daher bei entsprechender Kalibrierung näherungsweise als Maß für die benötigte Brennstoffmenge herangezogen werden. Die abgenommene Leistung ist im regelungstechnischen Terminus die „Störgröße“ der Leistungsregelung. Eine PID-Regelung, die ergänzend diese Störgröße berücksichtigt, nennt man daher „PID-Regelung mit Störgrößenaufschaltung“. Auch der mathematische Term der Störgrößenaufschaltung kann aus einem Proportionalanteil und einem Dämpfungsanteil zusammengesetzt sein:

Der hierfür geltende Algorithmus lautet:

$$BR_{PID+St} = BR_{PID} + P_S * (T_{K_{Istwert}} - Tr_{(t)}) + D_S * (Tr_{(t)} - Tr_{(t-\Delta t)}) / \Delta t \quad (\text{Gleichung 4})$$

$BR_{PID+St}$  ..... Brennstoffmenge bei PID-Regelung mit „Störgrößenaufschaltung“ der Rücklauf­temperatur

$BR_{PID}$  ..... Brennstoffmenge bei PID-Regelung (ohne Störgrößenaufschaltung, siehe Gleichungen 3a und 3b)

$P_S$  ..... Proportionalitätsfaktor der Störgrößenaufschaltung

$T_{K_{Istwert}}$  ..... Istwert der Kesseltemperatur

$Tr$  ..... Rücklauf­temperatur

$t$  ..... Zeit

$D_S$  ..... Dämpfungsfaktor bezogen auf die Störgrößenaufschaltung

$\Delta t$  ..... Abtastzeitintervall der Regelung

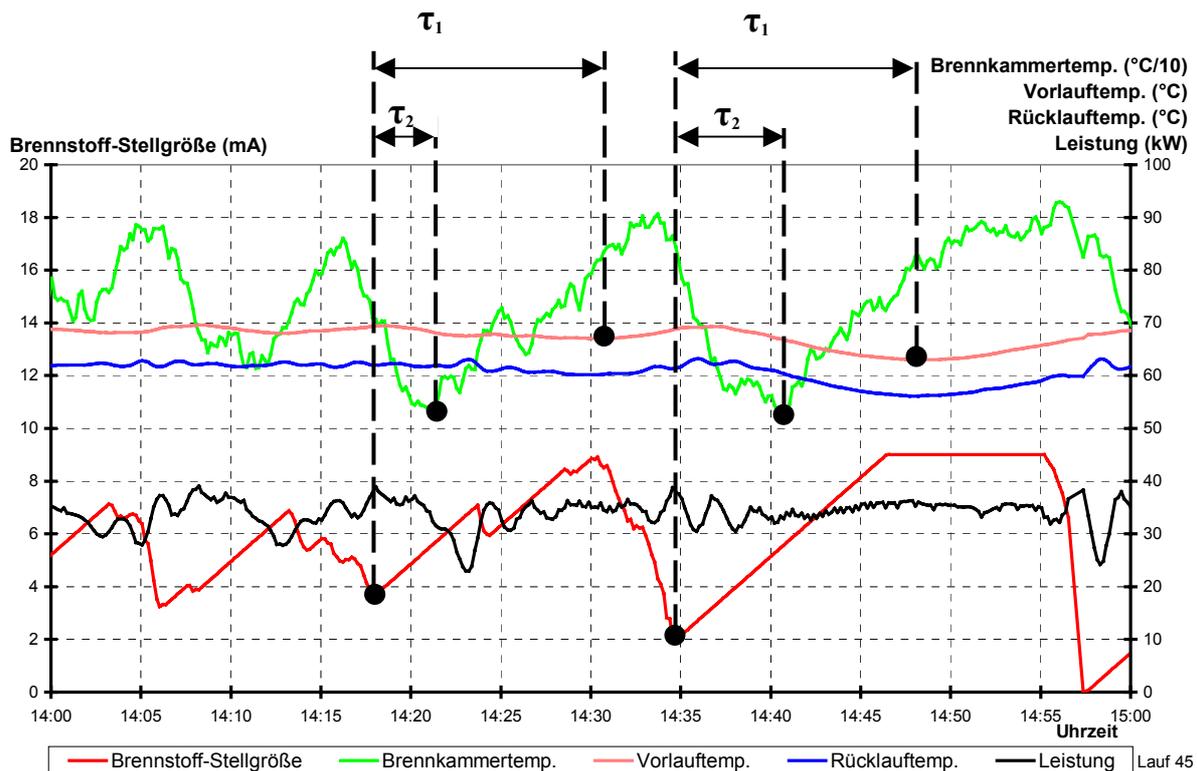
Das oben beschriebene Verfahren der „PID-Regelung mit Störgrößenaufschaltung“ ist bei allen programmierbaren Regelungen Standard und wird bei der Leistungsregelung größerer Feuerungen auch vielfach eingesetzt /1/. Das Vorhandensein einer elektronischen Regeleinheit ist hierzu allerdings unumgänglich. Bei Kleinf Feuerungsanlagen, die über eine elektronische Regeleinheit verfügen, kann dieses Regelungsverfahren mit gleichen Vorteilen wie bei Großfeuerungsanlagen eingesetzt werden. Unter der Annahme, dass die Feuerungsanlagen für das „Haus der Zukunft“ standardmäßig mit elektronischen Regeleinheiten ausgerüstet sein werden, - dies ist ja auch eine Voraussetzung für die Anwendung der in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahren der Verbrennungsregelung - wurde auch für die Versuchsfeuerungsanlage des Projekts eine elektronische Regelungseinheit eingesetzt.

Erste Tests wurden zunächst mit dem hier beschriebenen Verfahren der „PID-Regelung mit Störgrößenaufschaltung“ durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Verfahren der „PID-Regelung mit Störgrößenaufschaltung“ im Fall der Versuchsfeuerungsanlage zwar grundsätzlich ein stabiles Regelungsverhalten erreicht werden kann, hierzu ist aber selbst bei konstanter abgenommener Leistung ein sehr hoher Dämpfungsfaktor zu wählen, der die Leistungsregelung sehr „träge“ macht. Dies führt dazu, dass sich die Leistung der Feuerungsanlage nur sehr langsam an die abgenommene Leistung anpasst und die Feuerungsanlage auch nur sehr langsam hochfährt. Im Taktbetrieb wirkt sich dieser Umstand besonders nachteilig aus.

Wird der Dämpfungsfaktor hingegen verringert, so gerät die Feuerungsanlage unvermeidlich in einen Pendelbetrieb, der nicht nur eine schwankende Kesseltemperatur sondern auch einen ständigen instationären Verbrennungsprozess mit erhöhten CO-Emissionen zur Folge hat. Abbildung 24 zeigt beispielhaft Ergebnisse einer Untersuchung mit „PID-Regelung mit Störgrößenaufschaltung“.

Man erkennt in Abbildung 24 anhand zweier Schwingungsperioden, dass eine Erhöhung der Brennstoff-Stellgröße (rote Linie) aufgrund der großen Speichermassen der Brennkammer erst mit einer Verspätung  $\tau_1$  von ca. 15 Minuten eine Erhöhung der Kesselwassertemperatur (hier: Vorlauftemperatur, rosa Linie) bewirkt, die wiederum zu einer Drosselung der Brennstoffmenge führt. In dieser Zeit ist die Brennstoffleistung aber von ca. 50 % Teillast auf Vollast angestiegen. Das ist vorübergehend erheblich mehr als bei diesem Versuch konstant im Mittel abgenommen wurde, nämlich rund 35 kW. Die gespeicherte Wärme erhöht die Kesseltemperatur wiederum noch lange, obwohl die Brennstoff-Stellgröße aufgrund des erforderlichen hohen Dämpfungsfaktors infolge des Anstiegs der Kesseltemperatur längst wieder verringert wurde. Dies führt wie ersichtlich selbst bei konstanter mittlerer abgenommener Leistung zu einem regelungstechnisch instabilen Zustand. Bei veränderlicher abgenommener Leistung, wie sie im praktischen Betrieb gegeben ist, wäre das Regelverhalten somit noch schlechter. Abhilfe ist wie erwähnt nur durch noch stärkere Dämpfung möglich. Damit würde sich aber die Einschwingdauer der Leistungsregelung auf eine noch längere Zeit erhöhen, was im Sinne des Projektziels nicht als optimierte Leistungsregelung für das „Haus der Zukunft“ bezeichnet werden kann.

Man erkennt aber in Abbildung 24, dass die Brennkammertemperatur (grüne Linie) der Änderung der Brennstoff-Stellgröße mit einer Zeitverschiebung  $\tau_2$  von nur rund 5 Minuten, also erheblich schneller folgt. Eine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem liegt daher in der Einbeziehung des zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur in den Algorithmus der Leistungsregelung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 4.2.4 beschrieben.



$\tau_1$ ....Zeitverschiebung zwischen dem Beginn des Anstiegs der Brennstoffmengen-Stellgröße und dem Beginn der Reaktion der Kesseltemperatur

$\tau_2$ ....Zeitverschiebung zwischen dem Beginn des Anstiegs der Brennstoffmengen-Stellgröße und dem Beginn der Reaktion der Brennkammertemperatur

**Abbildung 24:** Ergebnisse eines Testlaufs zur Leistungsregelung nach dem Algorithmus: „PID-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauftemperatur als Störgröße“. Das zeitweise lineare Ansteigen der Brennstoffmenge ist durch einen limitierenden Faktor im Regelungsalgorithmus begründet, der die Anstiegsgeschwindigkeit begrenzt um Emissionsspitzen zu vermeiden.

#### 4.2.4 „PID“-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauf­temperatur und der Brennkammertemperatur

Wie bereits erwähnt und in Abbildung 24 (siehe Seite 60) ersichtlich, ist der Verlauf der Brennkammertemperatur mit einer wesentlich geringeren Zeitverschiebung in Bezug auf den Verlauf der Brennstoffzufuhr behaftet als jener der Kesseltemperatur. Es bietet sich daher an, ein ergänzendes Dämpfungsglied der Leistungsregelung, das sich anstatt auf den Gradienten der Kesseltemperatur auf den Gradienten der Brennkammertemperatur bezieht, in den Algorithmus aufzunehmen. Der Algorithmus hierfür lautet:

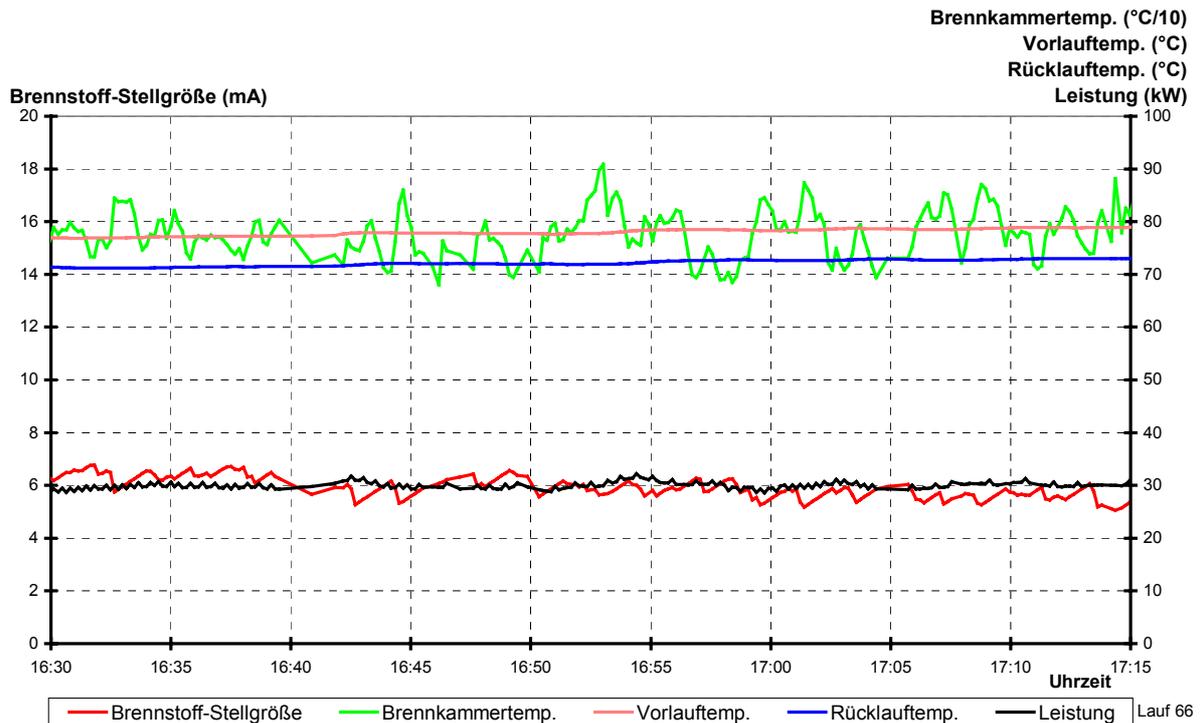
$$BR_{PID+St+\Delta T_{bk}} = BR_{PID+St} - D_{T_{bk}} * (T_{bk}(t) - T_{bk}(t-\Delta t)) / \Delta t \quad (\text{Gleichung 5})$$

- $BR_{PID+St+\Delta T_{bk}}$  .... Brennstoffmenge bei PID-Regelung mit Berücksichtigung der Rücklauf­temperatur als Störgröße und zusätzlicher Dämpfung über den Gradienten der Brennkammertemperatur
- $BR_{PID+St}$  ..... Brennstoffmenge bei PID-Regelung mit Störgrößenaufschaltung (Siehe Gleichung 4, Seite 58)
- $D_{T_{bk}}$  ..... Dämpfungsfaktor bezogen auf den Gradienten der Brennkammertemperatur
- $T_{bk}$  ..... Brennkammertemperatur
- $t$  ..... Zeit
- $\Delta t$  ..... Abtastzeitintervall der Regelung

Durch diese Maßnahme konnte eine stabile Leistungsregelung der Versuchsf Feuerungsanlage auch bei vertretbarer Einschwingzeit erreicht werden. Die Ergebnisse eines entsprechenden Testlaufs sind in [Abbildung 25](#) ersichtlich.

Man erkennt in Abbildung 25 im Vergleich zu Abbildung 24, dass alle relevanten Regelgrößen im regelungstechnischen Sinn stabil verlaufen.

In Abbildung 25 fällt unter Anderem auf, dass Brennstoff-Stellgröße (rote Linie) im Mittel stetig geringfügig abnimmt, obwohl die Leistung konstant ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die wärmespeichernden Komponenten der Feuerungsanlage bei diesem Versuch noch nicht ganz die unter den gegebenen Bedingungen sich einstellende Endtemperatur erreicht haben und daher ein - abnehmender - Teil der zugeführten Wärme die weitere Erwärmung dieser Komponenten anstatt des Kesselwassers bewirkte.



**Abbildung 25:** Ergebnisse eines Testlaufs zur Leistungsregelung mit dem Algorithmus: „PID-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauftemp. als Störgröße unter Einbeziehung des Gradienten der Brennkammertemperatur in das Dämpfungsglied“

Diese Art der Leistungsregelung erfüllte somit die Voraussetzungen für die im gegenständlichen Projekt durchzuführenden Untersuchungen mit einem an der Feuerungsanlage angeschlossenen Gebäudesimulator, der das wärmetechnische Verhalten eines „Hauses der Zukunft“ simuliert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Abschnitt 4.4 beschrieben.

Vorher soll aber noch kurz ein weiteres Problem bei der Leistungsregelung einer Biomasse-Feuerungsanlage behandelt werden: Die Leistung der Feuerungsanlage kann nicht beliebig klein gemacht werden, weil sonst die Brennkammertemperatur unter den bekanntermaßen „kritischen“ Wert von ca. 650 °C, beim dem die Verbrennung unvollständig wird und erhöhte CO-Emissionen auftreten, abfällt. Bei Leistungen unter dieser Grenze muss die Feuerung im Taktbetrieb betrieben werden. Es stellt sich somit die Frage, welche Auswirkungen sich daraus ergeben. Dies wird in Abschnitt 4.3 näher untersucht.

### 4.3 Einfluss der Betriebsart der Feuerung auf den Jahresnutzungsgrad der Gebäudeheizung

Der Jahresnutzungsgrad einer Heizanlage kann, sofern die benötigten Einzelparameter bekannt sind, aus dem Wirkungsgrad der Heizanlage als Funktion ihrer Leistung, zusammen mit dem Leistungsspektrum der bereitgestellten Wärme berechnet werden (aus /4/).

Die Nutzwärme ( $W$ ) wird in bei verschiedenen Leistungen ( $p_i$ ) erbracht, die in unterschiedlich langen Zeitintervallen  $\Delta t_i$  benötigt werden. Für die Nutzwärme ( $W$ ) gilt:

$$W = \sum W(p_i) = \sum p_i * \Delta t_i \quad (\text{Gleichung 6})$$

$W$ ..... Nutzwärme der Feuerungsanlage in kJ

$p_i$  ..... Leistungsbereich der Feuerungsanlage im Zeitintervall  $\Delta t_i$

$\Delta t_i$  ..... Zeitintervall, in dem der Leistungsbereich  $p_i$  gefahren wird

Die benötigten Brennstoffenergien ( $E_i$ ) ergeben sich aus der Nutzwärme durch Division durch den Wirkungsgrad ( $\eta$ ), der, abhängig von der Feuerungsanlage bzw. der Heizungstechnik, eine charakteristische Funktion der Leistung  $p$  (bzw. hier bezogen auf einen diskreten Leistungsbereich  $p_i$ ) ist:

$$E_i = 1/\eta(p_i) * W(p_i) \quad (\text{Gleichung 7})$$

$E_i$  ..... Brennstoffenergie, die im Leistungsbereich  $p_i$  umgesetzt wird in kJ

$\eta$  ..... Wirkungsgrad der Feuerungsanlagen (-)

$p_i$  ..... Leistungsbereich der Feuerungsanlage in kW

$W(p_i)$  ..... Nutzwärme der Feuerungsanlage im Leistungsbereich  $p_i$  in kJ

Die gesamte Brennstoffenergie ergibt sich somit zu

$$E = \sum 1/\eta(p_i) * W(p_i) \quad (\text{Gleichung 8})$$

$E$  ..... Gesamte Brennstoffenergie in kJ

$\eta$  ..... Wirkungsgrad der Feuerungsanlagen (-)

$p_i$  ..... Leistungsbereich der Feuerungsanlage in kW

$W(p_i)$  ..... Nutzwärme der Feuerungsanlage im Leistungsbereich  $p_i$  in kJ

Der Jahresnutzungsgrad ( $\eta_J$ ) ist somit

$$\eta_J = W / E = \frac{W}{\sum 1/\eta(p_i) * W(p_i)} \quad \text{(Gleichung 9)}$$

$\eta_J$ ..... Jahresnutzungsgrad der Feuerungsanlage (-)

$W$ ..... Jahresnutzwärme der Feuerungsanlage in kJ

$E$ ..... Jahresbrennstoffenergie in kJ

$\eta(p_i)$ ..... Wirkungsgrad der Leistungsbereich der Feuerungsanlage im Leistungsbereich  $p_i$  (-)

$W(p_i)$ ..... Nutzwärme der Feuerungsanlage im Leistungsbereich  $p_i$  in kJ

Der Jahresnutzungsgrad kann dadurch optimiert werden, dass man versucht, den Nenner möglichst klein zu halten. Dies gelingt im Prinzip dadurch, dass man die Feuerung bzw. ihre Regelung so auslegt, dass ihr Wirkungsgrad in jenem Leistungsbereich hoch ist, in dem die meiste Wärme erzeugt wird.

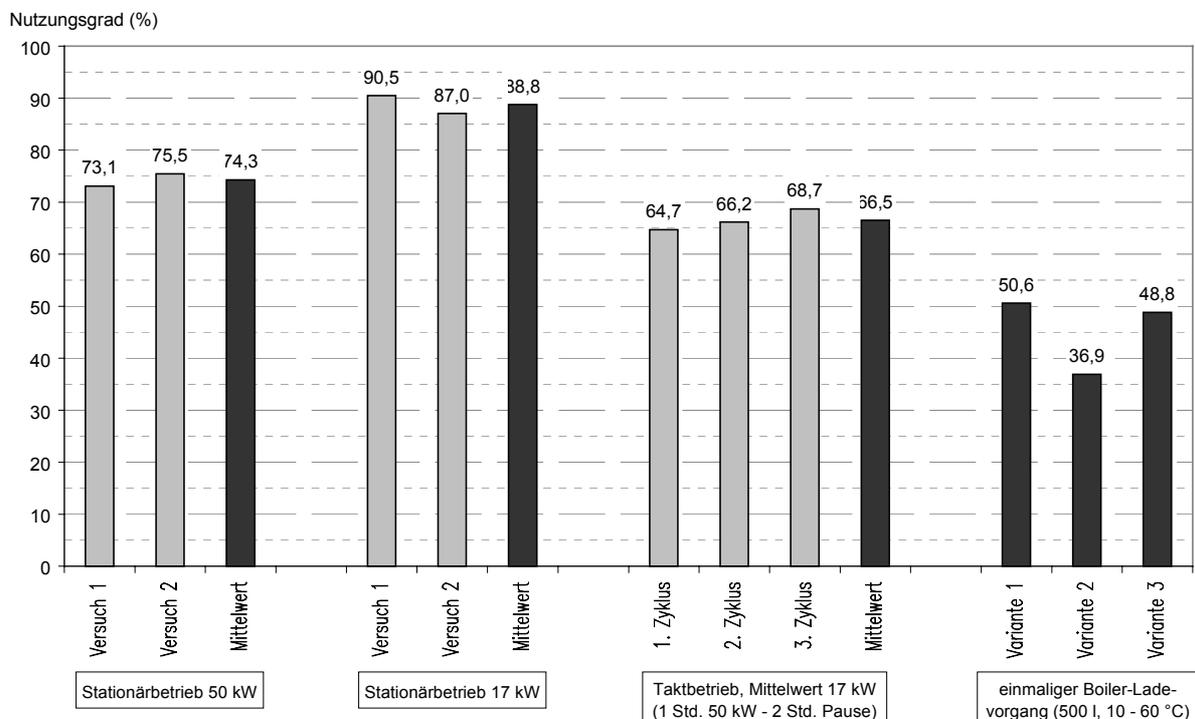
Wie die Ergebnisse von Simulationsrechnungen /4/ gezeigt haben, ist dies - insbesondere unter den in /4/ getroffenen Annahmen - keinesfalls die Heizlast des Gebäudes sondern die Mindestleistung, auf die die Regelung der Feuerung eingestellt ist. Bei Nennleistung und darüber wird kaum ein Zehntel der Wärme erzeugt. Für eine ökonomische Betriebsweise ist es daher besonders wichtig, dass die Feuerungsanlage bei Teillast einen hohen Wirkungsgrad hat.

Wird ein Leistungsbereich der Teillast im Taktbetrieb abgedeckt, so sind die in den dabei zu durchlaufenden instationären Betriebszuständen auftretenden erhöhten Verluste zu berücksichtigen. Quantitative Angaben über Wirkungsgrade von Feuerungen bei Taktbetrieb ( $\eta(p_i)$ ) waren bislang nur vereinzelt verfügbar (z. B. /13/), so dass Gleichung 9 unter der Annahme eines teilweisen Taktbetriebs nicht berechnet werden konnte. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des gegenständlichen Projekts verschiedene Betriebsweisen der Versuchsfeuerungsanlage in Hinblick auf ihre Auswirkungen auf den Nutzungsgrad analysiert und die Ergebnisse gegenübergestellt:

- a) Kontinuierlicher Betrieb bei Volllast (50 kW)
- b) Kontinuierlicher Betrieb bei 1/3 Teillast (17 kW)
- c) Taktbetrieb bei 1/3 Teillast (1 Stunde 50 kW - 2 Stunden Pause)
- d) „Boiler-Ladung“ (einmaliges Anfahren, Laden des mit dem Gebäudesimulator simulierten Boilers mit ca. 29 kWh, anschließendes Abstellen)

In jedem der obigen Betriebsfälle wurde die gesamte Wärmebilanz der Feuerung messtechnisch ermittelt. Als „Nutzungsgrad“ wurde jeweils das Verhältnis der mit dem Brennstoff zugeführten Wärme und der über den Heizkreis abgeführten Wärme errechnet. Die Bestimmung der Brennstoffmenge erfolgte über die Drehzahl der Zuführungsschnecke und ist daher mit einem schwer zu quantifizierenden Messfehler behaftet. Eine gewisse Korrektur konnte durch nachträgliches „Rückkalibrieren“ aufgrund der gewogenen Gesamtbrennstoffmenge durchgeführt werden. Trotzdem bleibt eine gewisse Unsicherheit in Bezug auf eine eventuelle Inhomogenität des Brennstoffs in der Schüttung, die auch die Streubreite der Ergebnisse begründet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 26 ersichtlich bzw. einander gegenübergestellt.



**Abbildung 26:** Ergebnisse der Messungen des Nutzungsgrades der Versuchsf Feuerungsanlage unter verschiedenen Betriebsbedingungen

Man erkennt in Abbildung 26, dass für den Nutzungsgrad der Versuchsf Feuerungsanlage im stationären Betrieb bei 50 kW in Versuch 1 73,1 % und in Versuch 2 75,5 % gemessen wurden. Der Mittelwert beträgt 74,3 %. Die Rauchgastemperatur betrug ca. 210 °C bzw. knapp 250 °C. Der Mittelwert der Rauchgastemperatur beträgt ca. 225 °C.

Beim stationären Betrieb mit 17 kW (bzw. bei rund 1/3 Teillast) wurden Werte für den Nutzungsgrad in Versuch 1 von 90,5 % und in Versuch 2 von 87,0 % gemessen. Der Mittelwert beträgt 88,8 %). Der bessere Nutzungsgrad ist durch die wesentlich niedrigere Rauchgastemperatur bestimmt, die in beiden Versuchen ca. 70 °C betrug.

Bei Taktbetrieb mit 1 Stunde Betrieb mit 50 kW und 2h Pause, also im Mittel 17 kW, wurden 3 Zyklen gefahren. Die gemessenen Werte für die Nutzungsgrade in den 3 Zyklen betragen 64,7 %, 66,2 % und 68,7 %. Der Mittelwert beträgt 66,5 %. Die Rauchgastemperaturen (Mittelwerte während der Betriebs-Perioden der Feuerung) lagen zwischen 175 °C und knapp über 200 °C.

Schließlich wurde noch der Nutzungsgrad der Feuerung bei einem einmaligen Betriebszyklus vom Anfahren aus dem kalten Zustand, dem Erwärmen von 500 Liter Wasser von 10 °C auf 60 °C („Boilerladung“ von 29 kWh zum Beispiel im Sommer, simuliert mit dem Gebäudesimulator) bis zum Abstellen mit anschließender Abkühlphase untersucht und zwar in drei Varianten:

- Variante 1:

Die Feuerung wurde mit einer Brennstoffmenge entsprechend der Nennlast (50 kW) aus dem kalten Zustand heraus gestartet und mit dieser Brennstoffmenge weiterbetrieben, bis die Solltemperatur des mit dem „Gebäudesimulator“ simulierten Boilers (60 °C) erreicht war. Als Mindest-Ladetemperatur wurde ebenfalls 60 °C gewählt. Das heißt, die Wärme aus dem Kessel wurde erst in den Heizkreis übergeführt, wenn die Mindest-Ladetemperatur des Kesselwassers von 60 °C überschritten wurde. Dies war nach ca. 46 Minuten der Fall. Anschließend wurde dem Heizkreis jeweils gerade so viel Wärmeleistung entnommen, dass die Kesseltemperatur auf 60 °C konstant gehalten wurde.

Bei dieser Variante wurde ein Nutzungsgrad von 50,6 % gemessen.

Da bei kontinuierlichen Betrieb bei Nennleistung ein niedriger Nutzungsgrad als bei kontinuierlichem Betrieb bei 1/3 Teillast gemessen wurde, wurde in einer Variante 2 untersucht, ob sich auch bei einer einmaligen „Boilerladung“ ein besserer Nutzungsgrad bei Teillast ergibt.

- Variante 2:

Die Feuerung wurde mit einer Brennstoffmenge entsprechend 1/3 Nennlast (17 kW) gestartet und mit dieser Brennstoffmenge weiterbetrieben, bis die Soll-Temperatur des mit dem „Gebäudesimulator“ simulierten Boilers von 60 °C erreicht war. Auch die übrigen Bedingungen waren gleich wie in Variante 1.

In dieser Variante wurde ein Nutzungsgrad von 36,9 % gemessen. Dieser Nutzungsgrad ist wesentlich kleiner als jener bei „Boilerladung“ mit Vollast. Ein Grund für diesen sehr niedrigeren Nutzungsgrad war offenbar die Tatsache, dass die Feuerung bei 1/3 der Nenn-Brennstoffmenge aus dem kalten Zustand heraus sehr lange brauchte, um die speichernden Massen soweit zu erwärmen, dass in nennenswertem Maß Wärme in das Kesselwasser übertrat. Die Ladetemperatur des Kesselwassers von 60 °C wurde in diesem Fall erst nach 110 Minuten erreicht.

Aus diesem Grund wurde noch eine dritte Variante untersucht, bei der die Feuerung zunächst mit Vollast möglichst rasch auf „Betriebstemperatur“ gebracht und anschließend mit 1/3 Teillast weiterbetrieben wurde.

- Variante 3:

Die Feuerung wurde aus dem kalten Zustand heraus mit der der Nennleistung entsprechenden Brennstoffmenge hochgefahren, bis eine Brennkammertemperatur von 700 °C erreicht war. Anschließend wurde die Brennstoffmenge auf das einem Drittel der Nennleistung entsprechende Maß reduziert. Die übrigen Bedingungen waren wieder gleich wie in den Varianten 1 und 2. Die Aufwärmzeit bis zum Erreichen der Ladetemperatur des Kesselwassers betrug wiederum ca. 46 Minuten, erwartungsgemäß ähnlich wie in Variante 1.

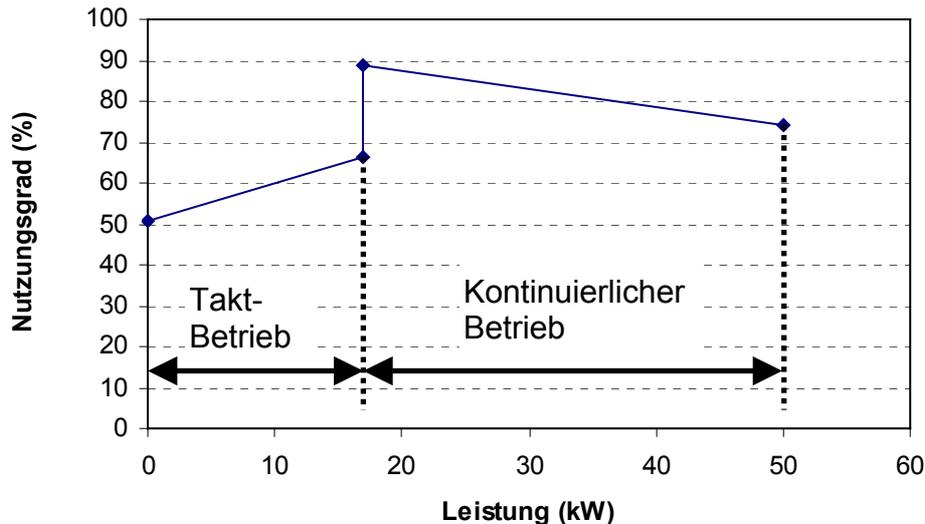
Bei dieser Variante wurde ein Nutzungsgrad der Feuerung von 48,8 % gemessen. Er ist geringfügig kleiner als der gemessene Nutzungsgrad bei „Boilerladung“ mit Vollast.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Varianten 1 und 2 lässt den Schluss zu, dass unter den gegebenen Bedingungen bei einem einmaligen Anfahren aus dem kalten Zustand der Feuerung der negative Einfluss der Temperaturverhältnisse während des „Hochfahrens“ gegenüber dem positiven Einfluss der niedrigeren Rauchgastemperatur bei Teillastbetrieb überwiegt. Je größer der eingesetzte Pufferspeicher, desto günstiger wird die zeitliche Relation zwischen „Anfahrbetrieb“ und kontinuierlichem Betrieb und desto niedriger werden daher im Taktbetrieb die Verluste sein.

Ungeklärt bleibt vorerst allerdings der Umstand, dass Variante 3 kein besseres Ergebnis als Variante 1 zeigte, wie dies aufgrund der durchschnittlich niedrigeren Rauchgastemperatur bei Teillast zu erwarten gewesen wäre. Eine Erklärung kann wahrscheinlich nur durch eine genauere Analyse der instationären Wärmeströme in den Komponenten der Feuerung, die den Rahmen des gegenständlichen Projekts überschreiten würde, gefunden werden.

Durch lineares Verbinden der obigen Messergebnisse ergibt sich nun in erster Näherung der in Abbildung 27 dargestellte Verlauf für die gesuchte Funktion  $\eta(p_i)$  (siehe Gleichung 9, Seite 64). Die einmalige „Boilerladung“ wurde im Nullpunkt der Abszisse aufgetragen. Dies entspricht der idealisierenden Annahme einer einmaligen „Boilerladung“ in einem unendlich langen Zeitraum. (Der Grenzwert der mittleren Leistung eines einmaligen Verbrennungsvorganges für eine gegen Unendlich strebende Mittelungszeit ist ja Null).

Man erkennt in Abbildung 27, dass die Versuchsfeuerungsanlage den größten Nutzungsgrad bei kontinuierlichem Betrieb mit der kleinsten - unter Wahrung niedriger CO-Emissionen - technisch möglichen Teilleistung hat. Damit ergibt sich bei Zugrundelegung der in /4/ berechneten Wärmebedarfsverläufe verschiedener „Häuser der Zukunft“ auch ein hoher Jahresnutzungsgrad der Gebäudeheizung.



**Abbildung 27:** Nutzungsgrad der Versuchsfeuerungsanlage in Abhängigkeit von der Leistung bei Taktbetrieb und bei kontinuierlichem Betrieb

#### 4.4 Betriebesergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Beheizung eines simulierten Gebäudes

Aus den Ergebnissen des Projekts „Untersuchungen zur Regelung von Biomasse-Feuerungen zur emissions- und effizienzoptimierten Beheizung von Wohn- und Bürobauten“ /4/ wurde ein charakteristisches Szenario von insgesamt 9 Stunden Dauer ausgewählt. Der Gebäudesimulator wurde so programmiert, dass er der Versuchsfeuerungsanlage genau entsprechend diesem Szenario Wärme entzog. Als Szenario wurde der berechnete Wärmeverlauf des Referenz-Wohngebäudes am fiktiven Datum „Donnerstag 4. Jänner, zwischen 10:00 und 19:00 Uhr“ gewählt. Grund für die Auswahl waren unter Anderem die in diesem Szenario bestehenden hohen Anforderungen an die Gebäudeheizung. Insbesondere mussten in dieser Zeit verschiedene Betriebszustände der Gebäudeheizung, beginnend mit kontinuierlichem Betrieb bei ca. 25 kW Teillast, anschließend diskontinuierlicher Betrieb mit mehrstündiger Betriebspause, schließlich neues Hochfahren der Feuerung mit Übergang in den kontinuierlichen Betrieb, wiederum mit ca. 25 kW, durchfahren werden. In dem Szenario wurde außerdem der Wärmebedarf für die Brauchwassererwärmung berücksichtigt.

Die vollständige Beschreibung der Berechnung findet sich in /4/, die berechneten Werte sind im Anhang (siehe Abschnitt 11.3) noch einmal zusammengefasst. Die wichtigsten der Berechnung des Wärmebedarfs zugrundegelegten Randbedingungen sind nachstehend noch einmal aufgelistet.

- Anzahl der Wohnungen im Gebäude: .....12
- Belegung:.....29 Personen
- Lüftungsverhalten:.....30 m<sup>3</sup>/ Person, Regelfaktor 2
- Wärmeschutz: .....lt. Norm
- Verglasung: .....U = 1,1 W/m<sup>2</sup>K, g = 0,599
- Wohnnutzfläche: .....929,7 m<sup>2</sup>
- Raumluft Solltemperatur: .....21 °C
- Klimadatensatz:.....Graz 68

Die Betriebsergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Beheizung eines simulierten Gebäudes sind Abbildung 28 ersichtlich. Man erkennt in Abbildung 28 im obersten Diagramm die beiden nahezu gleich verlaufenden Zeitverläufe des in /4/ berechneten Wärmebedarfs des simulierten Gebäudes (blaue Linie, „Soll-Leistung“) und der vom „Gebäudesimulator“ der Versuchsfeuerungsanlage abgenommenen Leistung (grüne Linie, „Ist-Leistung“). Der Verlauf des Wärmebedarfs beginnt wie erwähnt bei ca. 25 kW, sinkt bis etwa 13:30 Uhr auf ca. 4 kW ab und steigt dann wieder auf ca. 25 kW an.

Am Verlauf des Brennstoff-Stellgliedes (rote Linie, „BrSt Regler“) erkennt man, dass die Feuerung knapp nach 10:30 Uhr aufgrund der geringen benötigten Leistung den Heizbetrieb einstellte. Ausschaltkriterium war die eingestellte Minimaldrehzahl des Brennstoffstellgliedes.

Bis ca. 15:15 Uhr war der Wärmebedarf des Gebäudes so niedrig, dass er aus der in der Feuerungsanlage gespeicherten Wärme abgedeckt wurde. Vor- und Rücklauf-temperatur (drittes Diagramm, dunkelblaue bzw. hellblaue Linie, „TVL“ bzw. „TRL“) nahmen bis ca. 12:30, ausgehend von der eingestellten Soll-Vorlauf-temperatur von 70 °C, leicht ab. Das heißt, die aus den festen Komponenten der Feuerungsanlage (vor allem aus dem Schamotte) während dieser Zeit in das Kesselwasser abgegebene Wärme war bis zu dieser Zeit geringfügig kleiner als die vom simulierten Gebäude abgenommene Wärme. Das Heizwasser wirkte während dieser Zeit als Puffer.

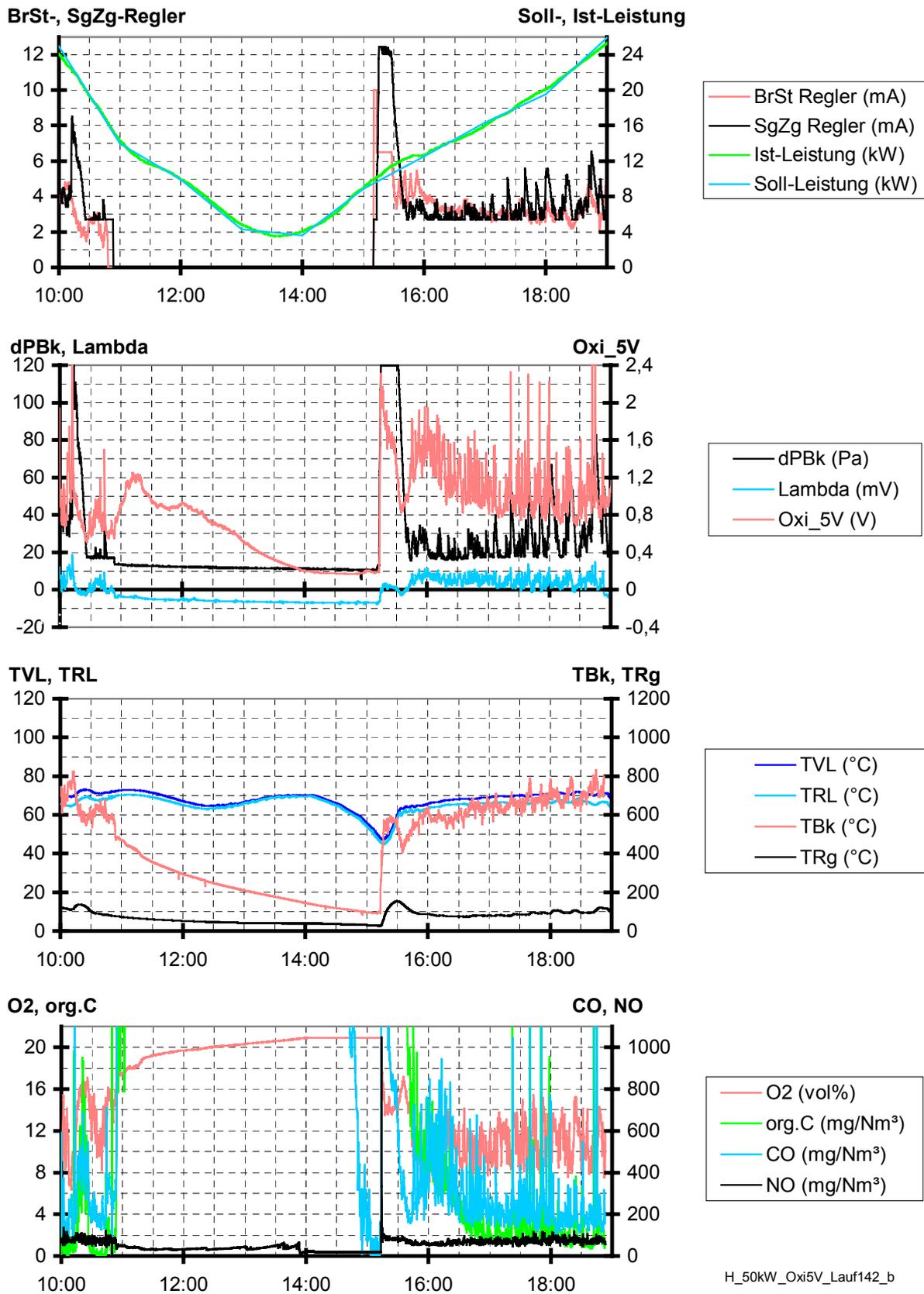


Abbildung 28: Betriebsergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Beheizung eines simulierten Gebäudes nach einem Szenario aus /4/.

Zwischen 12:30 und ca. 14:00 Uhr war die in den Heizkreis abgegebene Wärme geringfügig größer als die vom simulierten Gebäude entzogene Wärme. Die Folge war ein geringfügiges Ansteigen der Vor- und Rücklauftemperatur. Ab ca. 14:00 war die in den Heizkreis abgegebene Wärme wieder kleiner als die vom simulierten Gebäude abgenommene Wärme. Vor- und Rücklauftemperatur fielen dementsprechend ab. Um ca. 15:15 wurde die eingestellten Mindest-Vorlauftemperatur von 50 °C unterschritten und die Feuerung startete selbsttätig neu. Bereits nach ca. 10 Minuten war die Vorlauftemperatur wieder größer als 60 °C und näherte sich wieder dem eingestellten Sollwert von 70 °C. Trotz dieser raschen Reaktionszeit konnte mit dem verwendeten Regelungsalgorithmus (vergl. Abschnitt 4.2.4) ein Überschwingen der Vorlauftemperatur über den Sollwert von 70 °C vermieden werden. Die kurz nach 15:30 durch das Ansteigen der Brennkammertemperatur als Dämpfunggröße ausgelöste Verringerung der Brennstoffmenge (oberstes Diagramm) und der damit verbundene signifikante „Knick nach rechts“ im Verlauf der Vorlauf- und Rücklauftemperatur (drittes Diagramm) sind deutlich zu erkennen.

Die Brennkammertemperatur stieg nach dem Wiederanfahren aufgrund der niedrigen Leistung nur langsam an und lag am Anfang unter dem bereits erwähnten „kritischen“ Wert von 650 °C (siehe Abschnitt 4.2.4). Bei so niedriger Brennkammertemperatur sind die - auch bei optimaler Verbrennungsluftzuführung - erzielbaren CO-Emissionen (unterstes Diagramm, blaue Linie „CO“,) nicht ganz so niedrig wie bei Temperaturen über 650 °C. Man kann jedoch feststellen, dass die CO-Emissionen bereits bei Überschreiten dieser Brennkammertemperatur - kurz nach 18:00 - im Mittel wieder unter 200 mg/Nm<sup>3</sup> lagen - bei weiterhin fallender Tendenz entsprechend der weiterhin ansteigenden Brennkammertemperatur.

Die Sauerstoffkonzentration (unterstes Diagramm, rote Linie, „O<sub>2</sub>“) lag im Mittel bei etwa 10 %. Auch hier macht sich die niedrige Brennkammertemperatur bemerkbar, die bewirkt, dass das Minimum der CO-Emissionen bei einer etwas höheren Sauerstoffkonzentration im Rauchgas liegt.

Die Kohlenwasserstoffemissionen (grüne Linie im untersten Diagramm, „org.C“,) lagen nach dem Wiederanfahren (ab ca. 17:00 Uhr) im Mittel wieder bei ca. 4 mg/Nm<sup>3</sup>.

Die Stickoxidemissionen (schwarze Linie im untersten Diagramm, „NO“) lagen unabhängig von der Leistung bei ca. 75 mg/Nm<sup>3</sup>.

Das zweite Diagramm zeigt den Verlauf des Brennkammer-Unterdrucks (schwarze Linie, „dPBk“), des Signals der Lambda-Sonde (blaue Linie, „Lambda“) und den Verlauf des Signals des CO-Sensors (rosa Linie, „Oxi\_5V“), das die Basis für die optimierende Verbrennungsluftregelung darstellt.

In den in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen konnte anhand eines simulierten praktischen Betriebs gezeigt werden, dass eine Kleinfeuerungsanlage bei Einsatz fortschrittlicher Regelungstechniken den Anforderungen eines „Hauses der Zukunft“ in Bezug auf niedrige Schadstoffemissionen, hohen Wirkungsgrad und gutes Leistungs-Regelvermögen gerecht werden kann. Es konnte insbesondere gezeigt werden, dass der Einsatz fortschrittlicher Regelverfahren, die bislang überwiegend nur in Großanlagen angewendet wurden, auch bei Kleinfeuerungsanlagen technisch zielführend ist.

## **5. EINSATZ EINER COMBUSTION-CONTROL-UNIT**

Die **Combustion-Control-Unit** („CCU“) besteht aus einer SPS-Steuerung und aus einem User-Interface. Die beiden Komponenten müssen nicht notwendigerweise an der selben Stelle der Feuerung installiert werden. Somit ist es möglich, das User Interface an einer gut zugänglichen Stelle (also zweckmäßig an der Vorderseite der Feuerung), die SPS-Steuerung hingegen unabhängig davon an einer technisch vorteilhaften Stelle zu installieren.

Als SPS-Steuerung wurde das Produkt CP430 der österreichischen Firma Bernecker & Rainer ausgewählt. Neben technischen Kriterien waren natürlich vor allem die Kosten für die Auswahl von Bedeutung.

Abbildung 29 zeigt ein Foto der SPS-Steuerung (links im Bild) und des User Interface (rechts im Bild).



Abbildung 29: Foto der SPS-Steuerung (links im Bild) und des User Interface (rechts im Bild)

Zunächst zu den Kosten:

Die CP430 kostet bei Kauf einer einzelnen Einheit derzeit 6.580,- ATS bzw. 478,2 € (exkl. MWSt.). Dies erscheint für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen angesichts der zu erwartenden verbesserten Effizienz der Gebäudeheizung, die zu Kosteneinsparungen beim Betrieb führt, gerechtfertigt. Außerdem reduziert sich beim Kauf größerer Mengen selbstverständlich der Preis. Wenn sich nach ersten Testreihe mit Kleinfeuerungsanlagen der erhoffte Erfolg einstellt und in der Folge die entsprechenden Stückzahlen erreicht werden, dann kann an die Entwicklung einer eigenen, für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen bzw. in Hinblick auf die Kosten optimierten Combustion-Control-Unit mit der gleicher Funktion wie die CP430 gedacht werden.

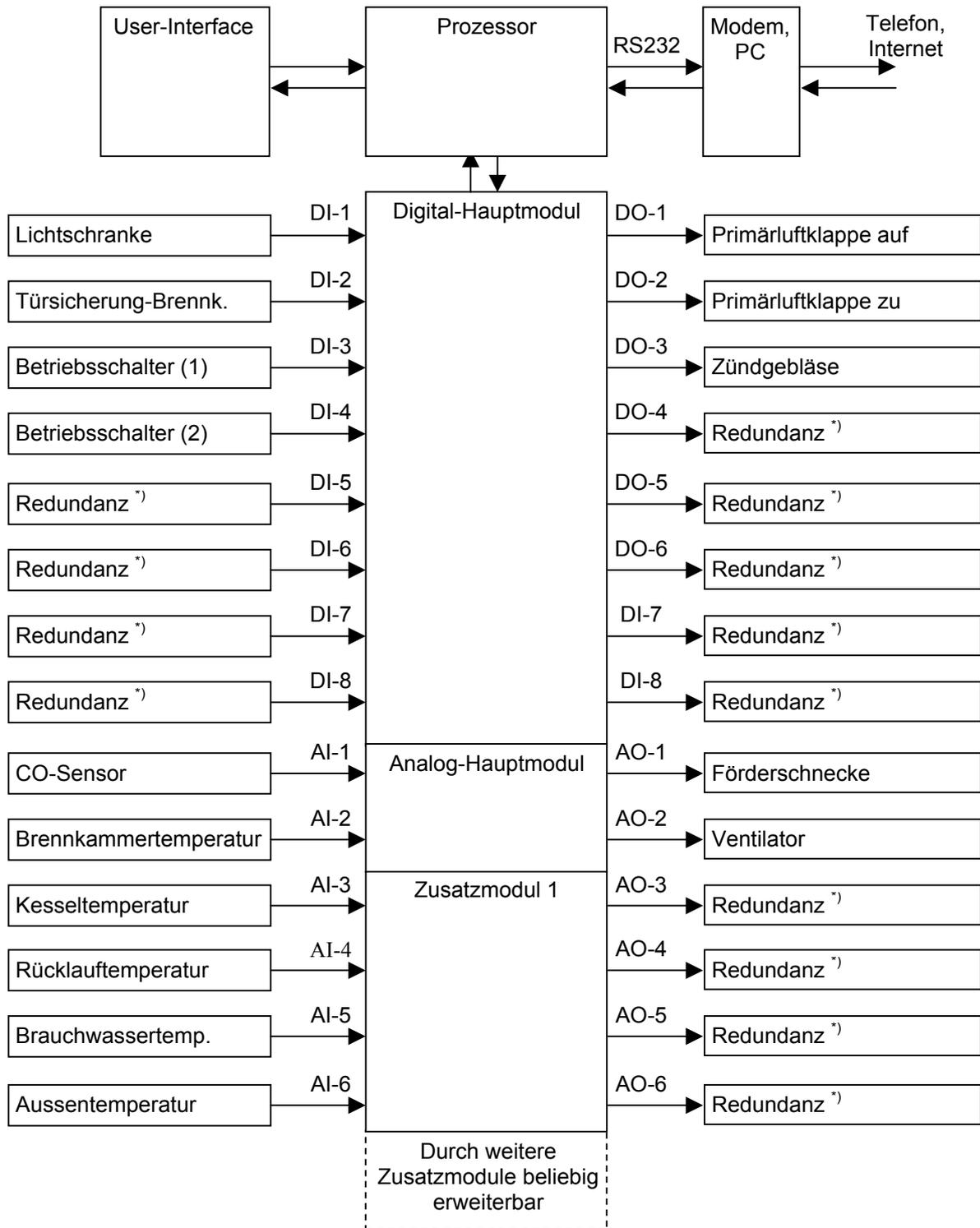
Nun zur Technik:

Die CP430 (siehe Schema in Abbildung 30) besteht im Prinzip aus einem Signalein- und Ausgabeteil (1) und einem Prozessor (2). Der Prozessor weist eine RS-232-Schnittstelle für die Einbindung der CP430 über eine Interface in die verschiedenen Signalübertragungskanäle der heutigen Kommunikationstechnik, insbesondere in die Telefonnetze und ins Internet auf. Auf diese Weise können Betriebsdaten der Feuerung und Eingriffe in den Verbrennungsablauf fernübertragen werden. Darüber hinaus ist über die RS-232 Schnittstelle auch der uneingeschränkte Zugriff auf das Programm der CP430 aus der Ferne möglich, was sowohl für die Heizungsregelung an sich als auch für die Verringerung des Energieeinsatzes für die Gebäudeheizung von Vorteil sein kann (siehe Abschnitt 6).

Die CP430 besitzt

- 2 Analogeingänge im Hauptteil
- 4 Analogeingänge im ersten Erweiterungsmodul
- 2 Analogausgänge
- 8 Digitaleingänge
- 8 Digitalausgänge

Abbildung 30 zeigt ein Schema der CP430 mit den für die Regelung der Feuerungsanlage vorgesehenen Analog Ein- und ausgängen. Man erkennt, dass in der gegenständlichen Ausführung eine erhebliche Redundanz für die Einbeziehung weiterer Mess- und Steuersignale des „Hauses der Zukunft“ in die Heizungsregelung besteht. Die Analogeingänge sind zwar vollständig ausgenützt, die Erweiterung der CP430 durch ein oder mehrere zusätzliche Erweiterungsmodule ist aber jederzeit möglich (Kosten des Erweiterungsmoduls: ca. 1.500,-- ATS bzw. 109,-- € exkl. MWSt.). Man kann somit davon ausgehen, dass der Einsatz der CCU in Heizungen für unterschiedliche „Häuser der Zukunft“ problemlos möglich ist. Das Programm der CP430 muss natürlich darauf abgestimmt sein. Der Programmspeicher ist jedoch groß genug, dass mehrere Programme für verschiedene Feuerungstypen gespeichert werden können. Der Einsatz der CCU an verschiedenen Feuerungstypen ist in diesem Fall durch einfaches Umschalten möglich. Weitere technische Informationen über die CCU finden sich im Anhang (siehe Abschnitt 11.4).



\*) Geeignet für die Einbeziehung weiterer Mess- und Steuerungsdaten des „Hauses der Zukunft“ in die Heizungsregelung

Abbildung 30: Schema der CP430 mit den für die Regelung der Feuerungsanlage vorgesehenen Analog Ein- und Ausgängen.

## **6. VERRINGERUNG DES ENERGIEEINSATZES IM „HAUS DER ZUKUNFT“ DURCH FERNKONTAKT**

Wie in Abschnitt 5 beschrieben ermöglicht die CCU den Fernkontakt des Benutzers mit der Feuerungsanlage über ein Telefonnetz oder einen Internet-Anschluss von nahezu jedem beliebigen Ort aus und zu jeder beliebigen Zeit. Dabei können wie erwähnt nicht nur Daten abgefragt und Steuerbefehle übermittelt werden, sondern das ganze Regelungsprogramm ist bis in den Source-Code hinein zugänglich und von externer Stelle veränderbar.

Die Zunahme der weltweiten Vernetzung der EDV-Einrichtungen, insbesondere auch im privaten Bereich, sowie die weiters lawinenartigen Entwicklungen im Bereich der Mobilfunk-Telefonie (bzw. Mobilfunk-Datenübertragung), haben den Möglichkeiten der Informationstechnologie neue Dimensionen verliehen. Hinzu kommen noch die Entwicklungen im Bereich der individuellen Positionsbestimmung aufgrund von Satellitensignalen (Global-Positioning-Systeme „GPS“). All diese Dinge „gibt es“ nicht nur schon, sondern sie haben bereits weitgehend Einzug in das Leben der „Westlichen Gesellschaft“ gehalten.

Es stellt sich daher auch die Frage, inwieweit der Energieeinsatz im Wohnbau durch den jederzeit möglichen Zugriff auf die Regelung der Heizungsanlage minimiert werden kann bzw. ob es sich nicht lohnen würde, diese Möglichkeiten zu nützen.

Im Vorgriff auf detailliertere Untersuchungen hierzu sollen an dieser Stelle stichwortartig einige mehr oder weniger realistische Visionen für die Verringerung des Energieeinsatzes im „Haus der Zukunft“ durch den möglichen Fernkontakt mit der Heizanlage beschrieben werden.

- Die Temperatur im Haus der Zukunft kann auf ein notwendiges Minimum abgesenkt werden, wenn niemand zuhause ist. Das „Herannahen“ eines Bewohners kann der Heizung über ein Mobiltelefon rechtzeitig angekündigt werden. Bis der Bewohner zu Hause eintrifft ist es bereits wieder warm. Das Gleiche gilt für das Warmwasser.
- Denkbar wäre weiters die automatische Drosselung der Gebäudeheizung, wenn sich alle Bewohner in einer gewissen Mindestentfernung befinden durch Erfassung deren globaler Position über das GPS. Diese Idee mag derzeit in

Bezug auf die breite Anwendung vielleicht noch etwas visionär erscheinen, aber wer kann wirklich sagen, wie lange es noch dauert, bis der Kauf eines PKW oder auch eines Mobiltelefons „zwangsweise“ mit dem Kauf eines GPS verbunden ist, weil etwas Anderes ganz einfach nicht mehr erhältlich ist. Möglicherweise wirkt hier eines Tages sogar der Gesetzgeber mit, in dem er den Einsatz eines GPS z. B. für den Betrieb von Verkehrsinformations- und -leitsystemen, zur Ermittlung von Straßenbenützungsgebühren (“Road pricing”) oder zur Überwachung von Verkehrsbeschränkungen (Fahrverbote, Parkverbote, Höchstgeschwindigkeiten) vorschreibt. Technisch machbar (und auch nicht übermäßig teuer) ist die automatische Einbindung der Daten eines GPS in andere Informationstechnologien jedenfalls bereits heute.

- Die mögliche Einbindung der CCU in die neuen Informationstechnologien ermöglicht grundsätzlich auch das Auffinden von Energieeinsparungsmöglichkeiten durch die mögliche EDV-gestützte Analyse des Betriebsverhaltens der Gebäudeheizung. Hierzu sei darauf hingewiesen, dass durch die mögliche Einbindung der CCU in die neuen Informationstechnologien sämtliche Betriebsdaten der Heizanlage auf einfache Weise zunächst in einem externen Personalcomputer gespeichert und in weiterer Folge in Hinblick auf Energieeinsparungsmöglichkeiten analysiert werden können. In einer solchen Analyse können - vom Benutzer selbst, oder zum Beispiel von einer Energieberatungsstelle - Kenndaten der Gebäudeheizung errechnet und mit Kenndaten anderer Gebäudeheizungen verglichen werden. Dies ermöglicht Planern von „Häusern der Zukunft“ eine auf zahlreichen praktischen Erfahrungen beruhende Prognose der energietechnischen Belange von Gebäuden unter einer Vielzahl von unterschiedlicher Randbedingungen und damit eine zielgerichtete und risikofreie Umsetzung energiesparender Maßnahmen. Auch im juristischen Bereich, z. B. in Fragen der Garantie- oder Gewährleistung, könnte der Zugriff auf gespeicherte detaillierte Daten der Gebäudeheizung bis hin zum Signal eines CO-Sensors von Vorteil sein und der besseren und effizienteren Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeinsparung und zur Luftreinhaltung dienen.
- Durch (aus Gründen des Datenschutzes natürlich eingeschränkten) externen Zugriff auf die CCU könnten auch die Hersteller von Gebäudeheizungen Erfahrungen mit ihren Produkten im praktischen Betrieb sammeln und diese

ständig verbessern. Der Ersatz eines bestehenden Regelungsprogramms gegen eine verbesserte „Update-Version“ wäre außerdem von zentraler Stelle aus automatisiert für alle bereits im praktischen Betrieb befindlichen Anlagen im Sinne eines „Rundmails“ durchführbar.

- Die CCU kann natürlich auch in die derzeit schon bekannten hausinternen Informationssysteme eingebunden werden /11/ und durch optimiertes Wärmemanagement aller wärmetechnisch relevanten Komponenten der Gebäudeheizung einerseits und durch automatisches Erfassen der Standorte der Bewohner andererseits zur Verringerung des Energiebedarfs des „Hauses der Zukunft“ beitragen. Das einfachste Beispiel hierzu wäre die Raumtemperaturabsenkung in Räumen, in denen sich niemand aufhält (etwa über Bewegungsmelder, wie es ja bei der Steuerung von Beleuchtungskörpern schon lange üblich ist).

## **7. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE „HAUSHEIZUNG DER ZUKUNFT“**

Die aus dem gegenständlichen Projekt sich ergebenden Empfehlungen für die optimale Ausführung der „Hausheizung der Zukunft“ sind

- in Bezug auf die Verbrennungsregelung:
  - \* Regelung der Sekundärluft über CO-Sensor und zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur und der Brennstoffmenge in Hinblick auf die Minimierung der Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen in allen Betriebszuständen und bei unterschiedlichen Brennstoffen.
  - \* Regelung der Primärluft mit dem Ziel, zur Minimierung der Stickoxidemissionen das Glutbett möglichst hoch zu halten.
- in Bezug auf die Leistungsregelung:
  - \* PID-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauf-temperatur im Sinne einer „Störgrößenaufschaltung“ sowie mit Berücksichtigung des zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur.
  - \* Bei jedem Neuanfahren, zum Beispiel im Taktbetrieb und bei einmaliger „Boilerladung“, sollte die Feuerung zunächst mit voller Leistung auf eine

entsprechende Betriebstemperatur (Brennkammertemperatur über 650 °C) gebracht werden. Erst dann sollte die reguläre Leistungsregelung, gegebenenfalls für Teillastbetrieb, einsetzen.

- in Bezug auf die Combustion-Control-Unit:
  - \* Einsatz einer SPS-Steuerung mit Interface und Schnittstellen für Fernkontakt des Benutzers zur Gebäudeheizung über die Telefonnetze und das Internet.
- in Bezug auf die Nutzung der Möglichkeiten der Verringerung des Energieeinsatzes im „Haus der Zukunft“ durch Fernkontakt des Benutzers mit der Gebäudeheizung (im Detail noch in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen):
  - \* Überwachung der Betriebszustandes der Heizung
  - \* Eingriff in die Heizungsregelung aus der Ferne
  - \* Nutzung der Möglichkeit der Aufzeichnung von Betriebsdaten an externen Stellen mit dem Ziel, Erfahrungen im praktischen Betrieb von Feuerungen zu gewinnen. Dies könnte vor allem für Hersteller und Entwickler von Nutzen sein und den Servicebetrieb erleichtern.
  - \* Nutzung der Möglichkeit des Lieferanten über Fernkontakt allfällige zwischenzeitlich verbesserte Update-Versionen des Regelungsprogramms an alle im Betrieb befindlichen Feuerungen im „Rundruf“ zu verteilen.

## **8. ERGEBNISVERWERTUNG UND MÖGLICHE WEITERFÜHRENDE ARBEITEN**

Die Ergebnisse des gegenständlichen Projekts sind experimentell abgesicherte Erkenntnisse über Möglichkeiten der Regelung von Feuerungen und zwar in Bezug auf

- größtmögliche Effizienz der Gebäudeheizung,
- geringst mögliche Schadstoffemissionen,
- Eignung für Feuerungsanlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken und
- Eignung für verschiedene Wohn- und Bürobauten.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse ist es möglich, die Beheizung von „Häusern der Zukunft“ mit Biomassefeuerungen zu optimieren und somit der Biomassenutzung zu einem höheren Stellenwert zu verhelfen. Das Projekt ist ein weiterer Schritt zur Entwicklung von optimierten Biomassefeuerungen kleiner Leistung. Durch die Kooperation mit der Fa. Herz ist die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis von vornherein sichergestellt. Es kann erwartet werden, dass die Ergebnisse von allgemeiner Gültigkeit für die Regelung von Kleinfeuerungsanlagen sind. Man kann daher davon ausgehen, dass der Einsatz der CCU in Kleinfeuerungsanlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken mit einem begrenzten Adaptierungsaufwand möglich ist. Dies gilt aller Erwartung nach auch für die derzeit außerordentlich stark boomenden Pelletfeuerungen.

Weiterführende Arbeiten sollten daher zunächst vor allem auf Tests der CCU beim Einsatz in Feuerungen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken abzielen.

Aufgrund der gemachten guten Erfahrungen mit der 50 kW Versuchsfeuerungsanlage kann erwartet werden, dass die CCU auch bei Feuerungen mit noch kleineren Leistungen erfolgreich eingesetzt werden kann. Dieser weite Einsatzbereich der CCU könnte zum Bedarf an hohen Stückzahlen führen, die die Entwicklung eines eigenen, für diesen Einsatzfall optimierten und kostengünstigen elektronischen Bauteils rechtfertigen könnten. Die Entwicklung eines solchen elektronischen Bausteins könnte somit einen Lawineneffekt in der Anwendung der CCU bewirken und sollte daher rasch in Angriff genommen werden. Mit Hilfe eines solchen kostengünstigen elektronischen Bausteines wäre der Einsatz der CCU auch in noch kleineren Feuerungsanlagen, insbesondere in Kaminöfen denkbar. Mit Entwicklungsarbeiten zur Übertragung der beschriebenen Regelungstechniken auf Feuerungen in noch kleineren Leistungsklassen („Kleinstfeuerungen“ im Bereich weniger kW) könnte vorab bereits begonnen werden.

Die Möglichkeit des Fernkontakts mit der CCU über ein Telefonnetz oder über das Internet eröffnet auch eine Reihe von Möglichkeiten, den Energieeinsatz im „Haus der Zukunft“ durch Ferneingriffe in die Heizungsregelung zu verringern. Anhand der nun vorliegenden Erfahrungen mit der CCU zusammen mit den Ergebnissen anderer relevanter Vorarbeiten (z. B. /4/) sollten diese Möglichkeiten quantitativ untersucht werden.

## 9. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines optimierten Regelungssystems für eine Biomassefeuerung für das „Haus der Zukunft“. Das System soll sowohl die Verbrennung an sich in Hinblick auf geringst mögliche Schadstoffemissionen wie auch die Leistung in Hinblick auf größtmöglichen Nutzungsgrad regeln. Das Projekt hat im September 2000 begonnen und wurde im Oktober 2001 abgeschlossen. Es wurde in 4 Arbeitsschritten durchgeführt:

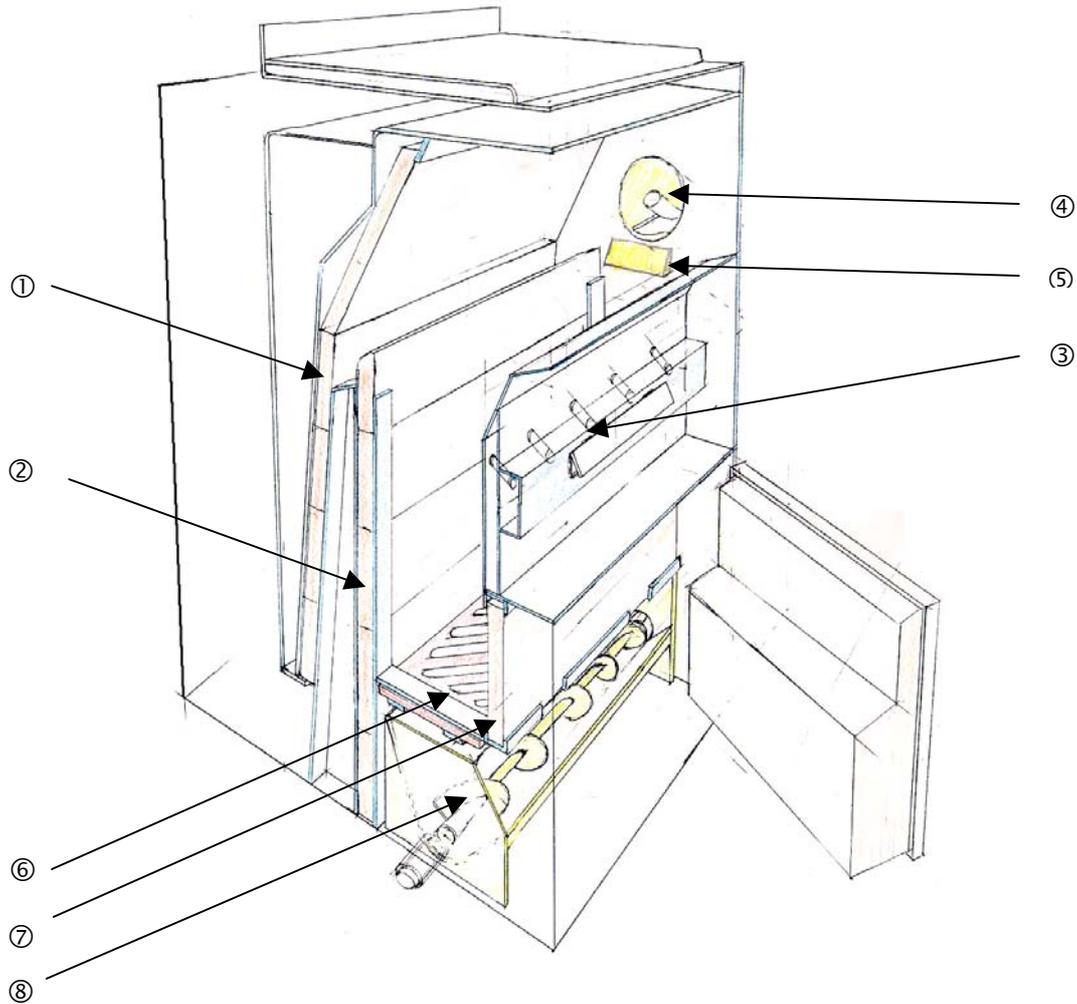
- **Arbeitsschritt 1:** Anpassung der vorhandenen Einrichtungen zum Aufbau eines Regelungs-Versuchsstands für eine Versuchsfeuerungsanlage mit einer auf Basis der Ergebnisse des Projekts „Biomassefeuerungen für das Haus der Zukunft“ /4/ programmierten Wärmesenke („Gebäudesimulator“)

In diesem Arbeitsschritt wurde durch Anpassung bzw. Ergänzung der vorhandenen Einrichtungen (Feuerungs-Versuchsstand mit einer 50 kW Versuchsfeuerungsanlage) ein Regelungs-Versuchsstand realisiert. Die Regelung erfolgte zunächst mit Hilfe eines mit den entsprechenden elektrischen Aus- und Eingängen bestückten PC, später mit Hilfe einer SPS-Steuerung. Der Regelungs-Versuchsstand wurde weiters mit einer regelbaren bzw. in ihrem Leistungsverlauf programmierbaren Wärmesenke ausgestattet. Mit dieser Wärmesenke konnte das wärmetechnische Verhalten verschiedener Gebäude in Bezug auf den Wärmebedarf aus der Feuerung simuliert werden. Die SPS-Steuerung wurde weiters mit elektrischen Aus- und Eingängen für die in der Heizanlage des „Hauses der Zukunft“ zu erwartenden Signalgrößen (Außentemperatur, Zustand der anderen Komponenten der Heizanlage, Benutzer-Interface etc.) versehen, sodass in Bezug auf die Wärmetechnik vollständig simulierte Gebäude an die Versuchsfeuerungen „angeschlossen“ werden konnten („Gebäudesimulator“).

Abbildung I zeigt eine Schnittzeichnung der adaptierten Versuchsfeuerungsanlage des Regelungs-Versuchsstands.

Abbildung II zeigt ein Foto des gesamten Regelungs-Versuchsstands.

Abbildung III zeigt ein Foto des Gebäudesimulators



**Abbildung I:** Schnitzzeichnung der Versuchsfeuerungsanlage

- ① Schamottierung der rückwärtigen Brennkammerwand
- ② Trennwand aus Schamotte zur Teilung der Brennkammer in zwei Kammern: Primärbrennkammer (vorne, Gasbewegung nach oben) und Sekundärbrennkammer (hinten zwischen Trennwand und rückwärtiger Brennkammerwand, Gasbewegung nach unten)
- ③ Sekundärluftdüsen
- ④ Brennstofföffnung im oberen Bereich der Brennkammer mit Brennstoffzuführungsschnecke und
- ⑤ Fallrampe
- ⑥ Rüttelrost
- ⑦ Verschlussklappe aus Schamotte für den Glutbettbereich
- ⑧ Aschen-Austragsvorrichtung (nur eingezeichnet, jedoch noch nicht realisiert, da für den wissenschaftlichen Aspekt des gegenständlichen Projekts ohne Bedeutung)



**Abbildung II:** Regelung-Versuchsstand. Man erkennt links neben der Bildmitte (erhöht) den zylindrischen Brennstoffvorratsbehälter mit dem Aufzug für dessen Beschickung. Links unten neben dem Brennstoffvorratsbehälter ist die Versuchsfeuerungsanlage mit der schrägen Brennstoffzuführungsschnecke zu erkennen.



**Abbildung III:** Programmierbare Wärmesenke des Regelungs-Versuchsstands („Gebäudesimulator“). Man erkennt ganz links das Ausgleichsgefäß des Heizwasserkreises, rechts daneben der Wärmetauscher mit den Wasseranschlüssen, in Bildmitte das Regelventil und ganz rechts die Umwälzpumpe.

## - Arbeitsschritt 2: Test und Optimierung der Verbrennungsregelung

In diesem Arbeitsschritt wurden am Regelungs-Versuchsstand verschiedene Regelungsstrategien bzw. -algorithmen zur Verbrennungsregelung erprobt.

Ergebnis dieses Arbeitsschritts waren Erkenntnisse zur Übertragung fortschrittlicher Regelungstechniken von Großfeuerungsanlagen auf die verwendete Kleinfeuerungsanlage. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die verwendete Kleinfeuerungsanlage eine sehr gute, mit Großfeuerungsanlagen vergleichbare Charakteristik der relevanten Verbrennungsgrößen in Bezug auf die Verbrennungsluftmenge hat. Dies war die Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung der geplanten Optimierenden Verbrennungsregelung mit ständiger Kontrolle der Verbrennungsgüte nach dem Vorbild der Regelung von Großfeuerungsanlagen. Abbildung IV zeigt die gemessene Charakteristik der wichtigsten Kenngrößen der Versuchsfeuerungsanlage, die die Basis für die Entwicklung der Verbrennungsregelung darstellte.

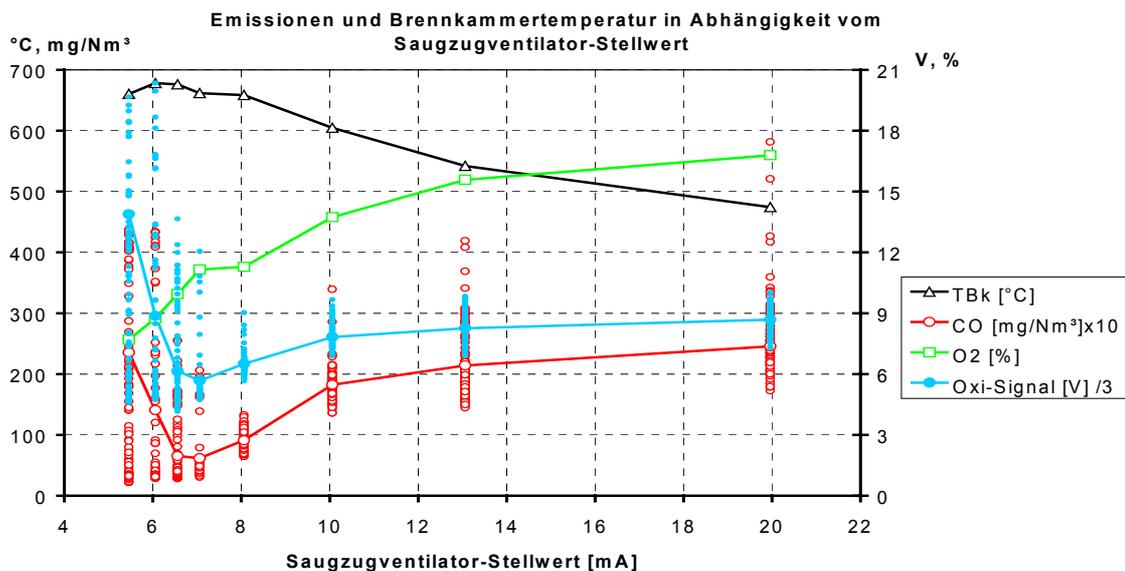


Abbildung IV: Charakteristik der Brennkammertemperatur (TBk), der O<sub>2</sub>-Konzentration (O<sub>2</sub>), der CO-Konzentration (CO) und des Signal eines CO-Sensors (hier als "Oxi-Signal" bezeichnet) der Versuchsfeuerungsanlage in Abhängigkeit vom Saugzugventilator-Stellwert.

Man erkennt in Abbildung IV die messtechnisch ermittelte Charakteristik der CO-Emissionen (rote Linie, „CO“), der O<sub>2</sub>-Konzentration (grüne Linie „O<sub>2</sub>“) und der Brennkammertemperatur (schwarze Linie, „TBk“) der Versuchsfeuerungsanlage in Abhängigkeit vom Stellwert des Saugzugventilators als Stellglied für die

Verbrennungsluftmenge. Man erkennt weiters, dass sowohl die mit einem Analysator gemessene CO-Konzentration im Rauchgas als auch das entsprechende Signal des CO-Sensors (blaue Linie, „Oxi-Signal“) bei einem bestimmten Saugzugventilator-Stellwert ein ausgeprägtes Minimum aufweisen. Dieses Minimum ist die Leitgröße bzw. der Zielpunkt für die Verbrennungsluftregelung. Es ist weiters zu erkennen, dass die Versuchsfeuerungsanlage im optimalen Betriebspunkt (Minimum des Verlaufs der CO-Konzentration) sehr geringe CO-Emissionen, deutlich unter  $100 \text{ mg/Nm}^3$  aufweist, womit die Voraussetzung für eine sehr gute Verbrennungsqualität gegeben ist.

Die Komponenten des Regelschemas für die Verbrennungsregelung sind zusammen mit den Komponenten des Regelschemas für die Leistungsregelung in Abbildung VI (siehe Seite 91) dargestellt. Die Primärluftregelung (10) arbeitet auf Basis der Brennstoffmenge. Die Sekundärluftregelung (11) arbeitet bei konventionellen Feuerungsanlagen meistens auf Basis des mit einer Lambda-Sonde (12) gemessenen Luftverhältnisses. Für Vergleichszwecke wurde eine solche Sonde auch im Regelungs-Versuchsstand eingebaut. Die Versuchsfeuerungsanlage des gegenständlichen Projekts arbeitet jedoch gemäß dem Vorbild bei Großfeuerungsanlagen auf Basis des Signals eines CO-Sensors (13).

Die Verbrennungsluftregelung auf Basis eines CO-Sensors arbeitet nach folgendem prinzipiellen Algorithmus: Die Verbrennungsluftmenge wird ständig in kleinen Schritten vergrößert oder verkleinert. Nach jeder Veränderung der Verbrennungsluftmenge wird geprüft, ob das CO-Sensorsignal größer oder kleiner wurde. Wurde es größer, dann „kehrt die Veränderung der Verbrennungsluftmenge um“. Wurde es hingegen kleiner oder bleib es gleich, dann „fährt die Veränderung der Verbrennungsluftmenge in der gleichen Richtung weiter“. Man erkennt anhand von Abbildung IV, dass dieser Algorithmus einer CO-Sensor geführten Verbrennungsregelung die Verbrennungsluftmenge in das Minimum des Signalverlaufs des CO-Sensors führen kann.

Die grundsätzlichen Vorteile des Einsatzes einer CO-Sonde gegenüber dem Einsatz einer Lambda-Sonde sind:

- a) Die CO-Konzentration stellt immer die direkte Information über die Vollständigkeit der Verbrennung dar. Die Sauerstoffkonzentration hingegen

sagt nur indirekt und nur bedingt etwas über die Vollständigkeit der Verbrennung aus: Bei gleicher Sauerstoffkonzentration kann, z. B. abhängig von der Leistung oder dem Brennstoff-Wassergehalt, einmal mehr und einmal weniger CO im Rauchgas sein. Da der Sollwert der Sauerstoffregelung in der Regel während des Betrieb nicht verändert werden kann, muss er immer so hoch gewählt werden, dass auch bei ungünstigen Randbedingungen ein hinreichend guter Ausbrand gewährleistet ist. Bei günstigen Randbedingungen (trockener Brennstoff, Nennlast), das heißt im Durchschnitt der Randbedingungen, ergeben sich damit unnötige Verluste.

- b) CO-Sensoren werden beim Einsatz in Biomassefeuerungen in einem Betriebsbereich betrieben, in dem ihre Empfindlichkeit sehr hoch ist. Lambda-Sonden hingegen sind für die Anwendung in Kfz-Motoren, die mit einem Lambda-Wert knapp bei 1 betrieben werden, ausgelegt. Im Rauchgas von Feuerungen herrscht jedoch überwiegend ein Lambda-Wert in der Größenordnung von 1,4 – 2 vor. In diesem Bereich ist die Empfindlichkeit der Lambda-Sonden sehr klein. Das Signal einer Lambda-Sonde muss somit erheblich verstärkt werden, damit es für die Regelung einer Biomassefeuerung eingesetzt werden kann. Dabei werden aber auch die Signalfluktuationsen verstärkt und das Signal ist aus diesem Grund mit einer großen Streubreite behaftet.
- c) Eine CO-Regelung arbeitet, wie schon erwähnt, nicht mit dem Absolutwert sondern lediglich mit dem zeitlichen Gradienten des Signals. Die Lambda-Regelung hingegen arbeitet mit der absoluten Höhe des Messwerts. Langzeitdrift oder Querempfindlichkeiten der Lambda-Sonde (z. B. gegenüber der Rauchgastemperatur oder der Rauchgaszusammensetzung) kann daher den eingestellten Betriebspunkt der Regelung verändern.

Auf der Basis der beschriebenen regelungs- und verbrennungstechnischen Sachverhalte wurden unter verschiedenen Betriebsbedingungen Versuche mit der Versuchsfeuerungsanlage durchgeführt in denen das Verhalten der Feuerungsregelung getestet und in Bezug auf Einzelheiten des Regelungsalgorithmus und auf die einzustellenden numerischen Parameter optimiert wurde.

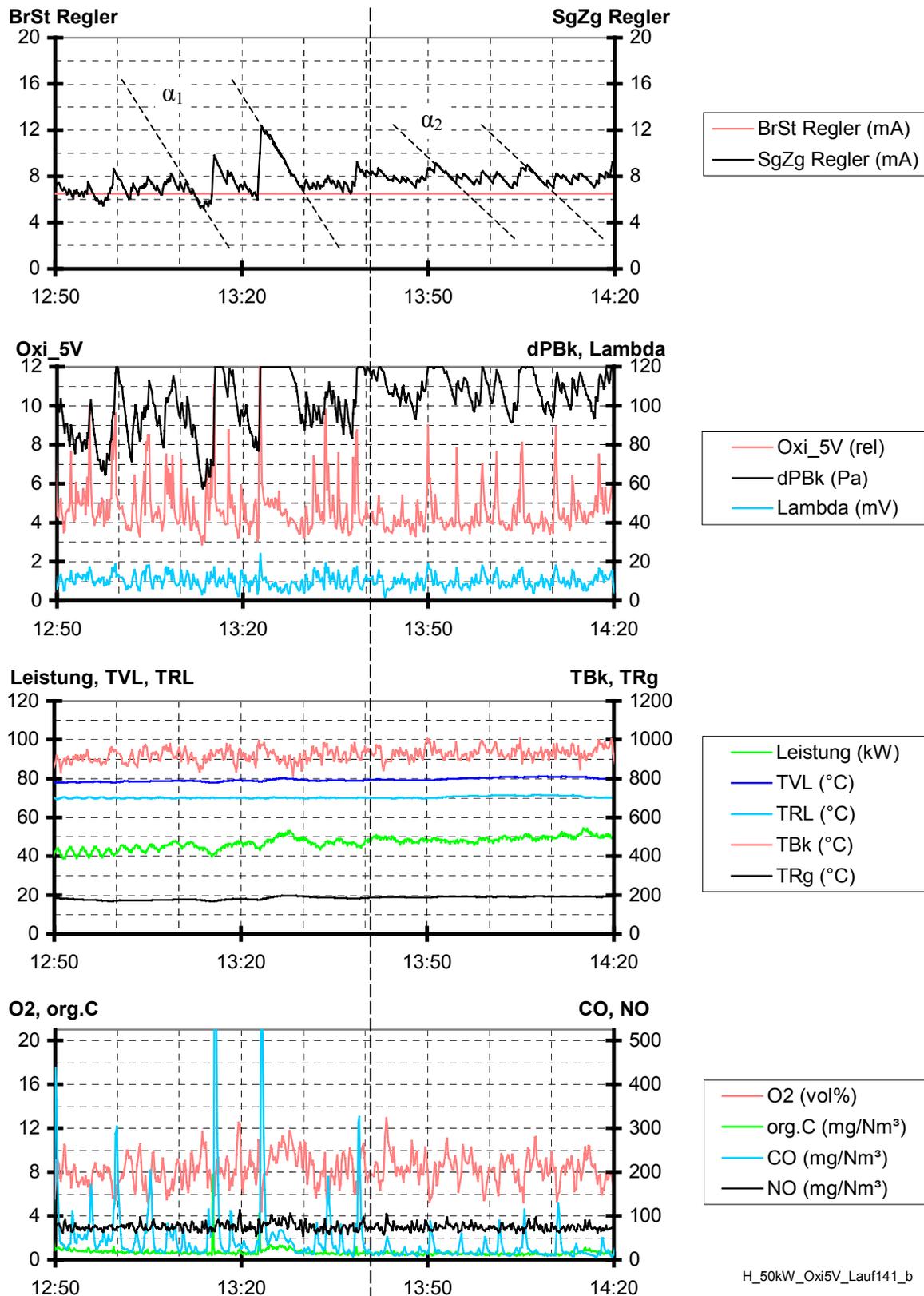
Abbildung V (siehe Seite 89) zeigt beispielhaft die Betriebsergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Volllast (ca. 50 kW). Brennstoff war Fichtenhackgut mit einem Wassergehalt von ca. 25 %. Um das Verhalten der Verbrennungsluftregelung selektiv zu untersuchen wurde der Brennstoffregler (oberstes Diagramm, rote Linie, „BrSt Regler“) konstant gehalten. Man erkennt im obersten Diagramm weiters das Verhalten des Stellsignals (schwarze Linie, „SZg Regler“ = Ausgangsstrom des Reglers zum Frequenzumformer des Saugzuggebläses als Stellglied für die Verbrennungsluft). Auffällig ist der sägezahnartige Zeitverlauf des Signals, der die Suchbewegung der Regelung nach dem Minimum des CO-Sensorsignals zu erkennen gibt.

Im zweiten Diagramm sind der Verlauf des Signals des CO-Sensors (rote Linie, „Oxi-5V“) und des Unterdrucks in der Brennkammer (schwarze Linie, „dPBk“) als Folge der Drehzahl des Saugzuggebläses, sowie das Signal einer Lambda-Sonde (blaue Linie, „Lambda“), das jedoch nur gemessen und nicht in der Regelung berücksichtigt wurde, zu erkennen.

Im dritten Diagramm sind die Leistung (grüne Linie, „Leistung“), die Vorlauf-temperatur (dunkelblaue Linie, „TVL“), die Rücklauf-temperatur (hellblaue Linie, „TRL“) die Brennkammertemperatur (rot Linie „TBk-1“) und die Rauchgas-temperatur (schwarze Linie, „TRg“) zu sehen.

Das vierte Diagramm zeigt die Rauchgasbestandteile Sauerstoff (rote Linie, „O<sub>2</sub>“), Summe der Kohlenwasserstoffe (grüne Linie, „C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>“), Kohlenmonoxid (blaue Linie, „CO“) und Stickoxid (schwarze Linie, „NO“).

Man erkennt in Abbildung V, dass sich die Kohlenmonoxidemissionen überwiegend unter 50 mg/Nm<sup>3</sup> hielten. Der Zeitraum zwischen 12:50 und 13:40 ist jedoch noch durch drei kleinere CO-Emissionsspitzen zwischen 200 und knapp über 300 mg/Nm<sup>3</sup> und zwei weitere Emissionsspitzen von knapp über 500 mg/Nm<sup>3</sup> gekennzeichnet. Diese Emissionsspitzen wurden zwar - wie im obersten Diagramm anhand des Verlaufs des Stellsignals erkennbar - in jedem Fall durch das Regelungssystem sofort abgefangen, sind aber trotzdem unerwünscht. Aus diesem Grund wurde in der Zeit nach 13:40 (strichlierte senkrechte Linie) die Schrittweite der Abnahme der Verbrennungsluft etwas verkleinert, so dass sich



**Abbildung V:** Ergebnisse eines Versuchslaufs mit konstanter Brennstoffmenge entsprechend 50 kW zur selektiven Untersuchung des Verhaltens der Verbrennungsluftregelung. Ab ca. 13:40 (strichlierte senkrechte Linie) optimal eingestellte Regelparameter (langsamere Reduktion der Sekundärluft gemäß Winkel  $\alpha_2$  statt  $\alpha_1$ ).

die Verbrennungsluftmenge ihrem Optimalwert etwas „vorsichtiger“ näherte und damit auch weniger darüber hinauspendelte. Man erkennt dies unter anderem daran, dass die abfallenden Flanken der „Sägezahnkurve“ des Saugzugventilators ab diesem Zeitpunkt mit einem flacheren Winkel  $\alpha_2$  verläuft als vorher mit  $\alpha_1$ . Die CO-Emissionsspitzen wurden dadurch früher abgefangen und blieben zumeist kleiner als  $100 \text{ mg/Nm}^3$ . Auch die „Minimum-Suchbewegung“ des Stellgliedes wurde wesentlich ruhiger und pendelte sich auf den optimalen Bereich ein. Die Halbstunden-Mittelwerte der CO-Emissionen lagen von diesem Zeitpunkt an bei ca.  $20 \text{ mg/Nm}^3$ . Die Sauerstoffkonzentration im Rauchgas lag im Mittel bei ca. 8 %. Die Kohlenwasserstoffkonzentration im Rauchgas lag im Mittel bei ca.  $1 \text{ mg/Nm}^3$ . Die Stickoxidkonzentration im Rauchgas lag im Mittel bei ca.  $75 \text{ mg/Nm}^3$ .

Die Ergebnisse dieser Versuche haben gezeigt, dass der Einsatz einer Verbrennungsregelung auf Basis eines CO-Sensors nach dem Vorbild von Großfeuerungsanlagen auch bei Kleinfeuerungsanlagen zielführend sein kann.

- **Arbeitsschritt 3:** Test und Optimierung der Leistungsregelung

In diesem Arbeitsschritt wurden mit Hilfe des Regelungs-Versuchsstandes grundlegende Untersuchungen zum optimalen Wärmemanagement des „Hauses der Zukunft“ durchgeführt. Hierzu wurde die Versuchsfeuerungsanlage anhand eines im Projekt „Anforderungsprofile für Biomassefeuerungen zur Wärmeversorgung von Objekten mit niedrigem Energiebedarf“ /4/ ermittelten Szenarios in Bezug auf die optimale Leistungsregelung eines „Referenzbaus“ untersucht. In diesem Szenario wurde insbesondere das Verhalten folgender Komponenten der Heizungsanlage des „Hauses der Zukunft“ berücksichtigt:

- die Wärmesenken (Heizkörper, Brauchwasserboiler etc.)
- die Wärmequellen und
- die speichernden Komponenten.

Der in /4/ berechnete Leistungsbedarf wurde mit dem Gebäudesimulator nachgebildet und der Feuerungsanlage „vorgegeben“.



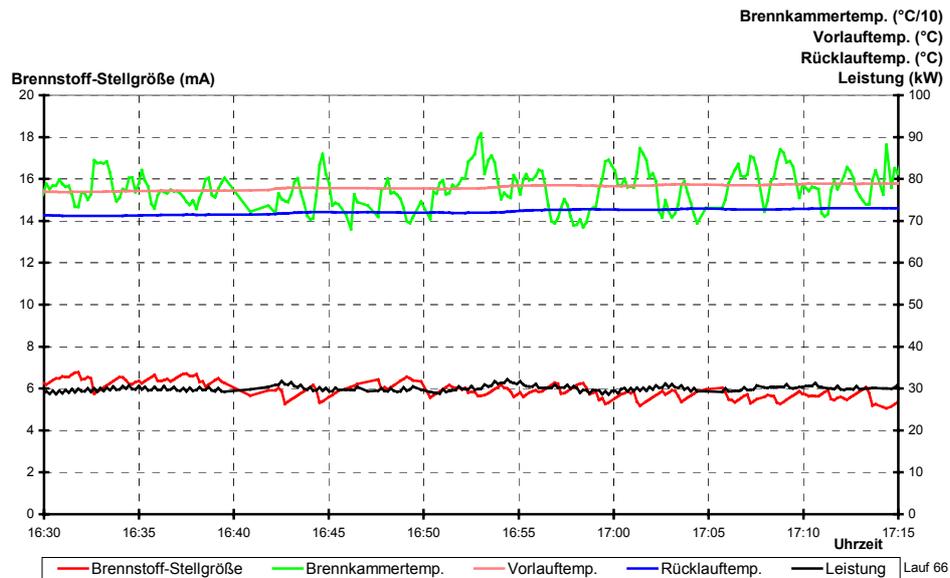
Im Rahmen der Versuche wurden mehrere Algorithmen zur Leistungsregelung experimentell untersucht. Zufriedenstellende Ergebnisse wurden mit einem Algorithmus erzielt werden, der sich aus folgenden Teilen zusammensetzt:

- \* Proportional-, Integral- und Differentialregelung („PID“-Regelung) der Kesseltemperatur mit
- \* Berücksichtigung des zeitlichen Gradienten der Rücklauftemperatur als „Störgröße“ und
- \* Einbeziehung des zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur in die Dämpfung der PID-Regelung

Mit einem solchen Algorithmus konnte eine stabile Leistungsregelung der Versuchsfeuerungsanlage sowohl mit kurzer Reaktionszeit bei Leistungsänderungen als auch mit schwingungsfreiem Regelverhalten erreicht werden.

#### Untersuchungen bei konstanter abgenommener Leistung

Abbildung VII zeigt die Ergebnisse eines Versuchslauf bei konstanter Leistungsabnahme. Man erkennt, dass die für die Leistungsregelung relevanten Größen Vorlauftemperatur (rosa Linie), Rücklauftemperatur (blaue Linie) und Brennkammertemperatur (grüne Linie) sowie auch die Stellgröße für die Brennstoffmenge (rote Linie) und die erzeugte Leistung (schwarze Linie) im regelungstechnischen Sinn stabil verlaufen. Damit sind die Voraussetzungen für den optimalen Einsatz einer solchen Regelung für die Beheizung des „Hauses der Zukunft“ grundsätzlich gegeben.



**Abbildung VII:** Ergebnisse eines Testlaufs bei konstanter abgenommener Leistung zur Leistungsregelung nach dem Algorithmus: „PID-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklaufemperatur als Störgröße unter Einbeziehung des Gradienten der Brennkammertemperatur in das Dämpfungsglied“

Ein weiteres Problem bei der Leistungsregelung einer Biomasse-Feuerungsanlage besteht aber dennoch: Die Leistung der Feuerungsanlage kann nicht beliebig klein gemacht werden, weil sonst die Brennkammertemperatur so weit abfällt, dass die Verbrennung unvollständig wird und erhöhte CO-Emissionen auftreten. Bei Leistungen unter einer bestimmten Grenze muss die Feuerung im Taktbetrieb betrieben werden. Es wurden daher ergänzend Untersuchungen durchgeführt, in denen die Auswirkungen verschiedener Betriebsarten der Feuerung auf den Nutzungsgrad analysiert wurden. Tabelle I zeigt eine Übersicht über die untersuchten Betriebsarten und die Untersuchungsergebnisse.

Man erkennt, dass die Versuchsfeuerungsanlage den größten Nutzungsgrad bei kontinuierlichem Betrieb mit 1/3 Teillast aufweist. Der Grund dafür liegt in der bei Teillast gegebenen höheren Rauchgastemperatur als bei Vollast.

**Tabelle I:** Übersicht über den Nutzungsgrad der Versuchsfeuerungsanlage bei verschiedenen Betriebsarten

Betriebsart	Nutzungsgrad	kleinster Wert (%)	größter Wert (%)	Mittelwert (%)
Kontinuierlicher Betrieb bei Volllast (50 kW)		73,1	75,5	<b>74,3</b>
Kontinuierlicher Betrieb bei 1/3 Teillast (17 kW)		90,5	87,0	<b>88,8</b>
Taktbetrieb bei 1/3 Teillast (1 h 50 kW - 2 h 0 kW)		64,7	68,7	<b>66,5</b>
„Boiler-Ladung“: Einmaliges Anfahren aus dem kalten Zustand, Laden des mit dem „Gebäudesimulator“ simulierten Boilers mit ca. 29 kWh, anschließendes Abstellen mit Auskühlen der Feuerung.				<b>50,6<sup>*)</sup></b>

\*) Ergebnis jener Variante der „Boiler-Ladung“, die sich unter drei verschiedenen untersuchten Varianten als die Beste herausstellte. Mit jeder der drei Varianten wurde nur ein Versuch durchgeführt.

Untersuchungen bei veränderlicher abgenommener Leistung

Die für die Feuerungsregelung und die Leistungsregelung eingesetzten Techniken wurden in der Folge einem „Praxistest“ unterzogen. Hierzu wurde mit Hilfe des Gebäudesimulators ein Gebäude mit einem bestimmten Szenario in Bezug auf den Wärmebedarf simuliert. Als Szenario wurde der im Projekt „Untersuchungen zur Regelung von Biomasse-Feuerungen zur emissions- und effizienzoptimierten Beheizung von Wohn- und Bürobauten“ /4/ berechnete Wärmeverlauf des Referenz-Wohngebäudes am fiktiven Datum „Donnerstag 4. Jänner, zwischen 10 und 19 Uhr“ gewählt. Grund für die Auswahl waren unter Anderem die in diesem Szenario bestehenden hohen Anforderungen an die Feuerungsanlage. Insbesondere mussten in dieser Zeit verschiedene Betriebszustände der Gebäudeheizung, beginnend mit kontinuierlichem Betrieb bei ca. 25 kW Teillast, anschließend diskontinuierlicher Betrieb mit mehrstündiger Betriebspause, schließlich neues Hochfahren der Feuerung mit Übergang in den kontinuierlichen Betrieb, wiederum mit ca. 25 kW Teillast, durchfahren werden. In dem Szenario wurde außerdem der Wärmebedarf für die Brauchwassererwärmung berücksichtigt. Die Betriebsergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Beheizung des simulierten Gebäudes sind in Abbildung VIII ersichtlich.

Man erkennt in Abbildung VIII im obersten Diagramm die beiden nahezu gleich verlaufenden Zeitverläufe einerseits des in /4/ berechneten Wärmebedarfs des simulierten Gebäudes (blaue Linie, „Soll-Leistung“) und andererseits der vom „Gebäudesimulator“ der Versuchsfeuerungsanlage abgenommenen Leistung (grüne Linie, „Ist-Leistung“). Der Verlauf des Wärmebedarfs beginnt wie erwähnt bei ca. 25 kW, sinkt bis etwa 13:00 Uhr bis auf ca. 4 kW ab und steigt dann wieder auf ca. 25 kW an. Am Verlauf des Brennstoff-Stellgliedes (rote Linie, „BrSt Regler“) erkennt man, dass die Feuerung knapp nach 10:30 Uhr den Heizbetrieb einstellte. Ausschaltkriterium war die eingestellte Minimaldrehzahl des Brennstoffstellgliedes.

Bis ca. 15:15 Uhr war der Wärmebedarf des simulierten Gebäudes so niedrig, dass er aus der in der Feuerungsanlage gespeicherten Wärme abgedeckt werden konnte. Vor- und Rücklauf-temperatur (drittes Diagramm, dunkelblaue bzw. hellblaue Linie, „TVL“ bzw. „TRL“) nahmen bis ca. 12:30, ausgehend von der eingestellten Soll-Vorlauf-temperatur von 70 °C, leicht ab. Das heißt, die aus den festen Komponenten der Feuerungsanlage (vor allem aus dem Schamotte) während dieser Zeit in das Kesselwasser abgegebene Wärme war bis zu dieser Zeit geringfügig kleiner als die vom simulierten Gebäude abgenommene Wärme. Das Heizwasser wirkte während dieser Zeit als Puffer.

Zwischen 12:30 und ca. 13:00 war die in das Kesselwasser abgegebene Wärme hingegen geringfügig größer als die vom simulierten Gebäude bezogene Wärme. Die Folge war ein geringfügiges Ansteigen der Vor- und Rücklauf-temperatur. Ab ca. 14:00 war die in das Kesselwasser abgegebene Wärme wiederum kleiner als die vom simulierten Gebäude abgenommene Wärme. Vor- und Rücklauf-temperatur fielen dementsprechend wieder ab. Um ca. 15:15 wurde die eingestellten Mindest-Vorlauf-temperatur von 50 °C unterschritten und die Feuerung startete selbsttätig neu. Bereits nach ca. 10 Minuten war die Vorlauf-temperatur wieder größer als 60 °C und näherte sich in der Folge wieder dem eingestellten Sollwert von 70 °C. Ein Überschwingen der Vorlauf-temperatur konnte durch den verwendeten Regelungsalgorithmus vermieden werden.

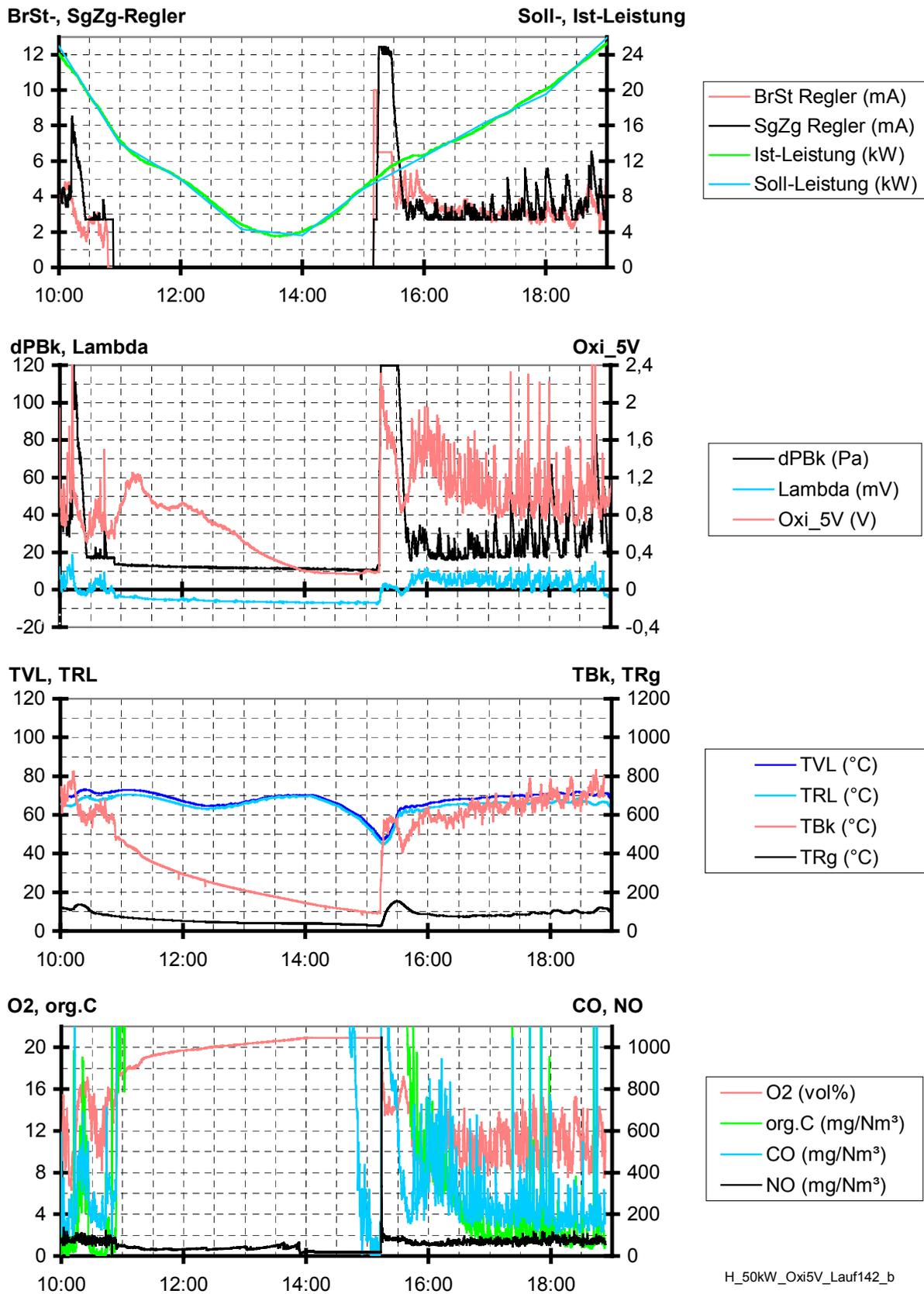


Abbildung VIII: Betriebsergebnisse der Versuchsfeuerungsanlage bei Beheizung eines simulierten Gebäudes gemäß einem aus /4/ übernommenen Szenario

Die Brennkammertemperatur stieg nach dem Wiederanfahren wegen der niedrigen Leistung nur langsam an und lag am Anfang unter dem bekanntermaßen „kritischen“ Wert von 650 °C. Bei so niedriger Brennkammertemperatur sind die - selbst bei optimaler Verbrennungsluftzuführung erzielbaren - CO-Emissionen (unterstes Diagramm, blaue Linie „CO“,) nicht ganz so niedrig wie bei Temperaturen über 650 °C. Man kann jedoch feststellen, dass die CO-Emissionen bereits bei Überschreiten dieser Brennkammertemperatur - kurz nach 18:00 - im Mittel wieder unter 200 mg/Nm<sup>3</sup> lagen und - entsprechend der weiterhin ansteigenden Brennkammertemperatur - weiterhin fallende Tendenz zeigen.

Die Sauerstoffkonzentration (unterstes Diagramm, rote Linie, „O<sub>2</sub>“) lag im Mittel bei etwa 10 %. Auch hier macht sich die niedrige Brennkammertemperatur bemerkbar, die bewirkt, dass das Minimum der CO-Emissionen bei einer etwas höheren Sauerstoffkonzentration im Rauchgas liegt. (Bei einer Lambda-Sonden Regelung müssten derartige Umstände, wie erwähnt, extra berücksichtigt werden; siehe hierzu Seite 86, Absatz a)).

Die Kohlenwasserstoffemissionen (unterstes Diagramm, grüne Linie, „org.C“) lagen nach dem Wiederanfahren (ab ca. 17:00 Uhr) im Mittel wieder bei ca. 4 mg/Nm<sup>3</sup>.

Die Stickoxidemissionen („NO“, schwarze Linie im untersten Diagramm) lagen unabhängig von der Leistung bei ca. 75 mg/Nm<sup>3</sup>.

Das zweite Diagramm zeigt den Verlauf des Brennkammer-Unterdrucks (schwarze Linie, „dPBk“,), des Signals der Lambda-Sonde (blaue Linie, „Lambda“), und des Signals des CO-Sensors (rote Linie, „Oxi\_5V“), das die Basis für die optimierende Verbrennungsluftregelung darstellt.

In den bei veränderlicher abgenommener Leistung durchgeführten Untersuchungen konnte somit anhand eines simulierten praktischen Betriebs gezeigt werden, dass eine Kleinfeuerungsanlage bei Einsatz fortschrittlicher Regelungstechniken den Anforderungen eines „Hauses der Zukunft“ in Bezug auf niedrige Schadstoffemissionen, hohen Wirkungsgrad und gutes Leistungs-Regelvermögen gerecht werden kann.

Alle oben beschriebenen Untersuchungen wurden zunächst mit einem Personalcomputer als Regelgerät durchgeführt. Dieser wurde nach Fertigstellung der Regelungssoftware durch eine „Combustion-Control-Unit“ („CCU“) ersetzt. Die CCU besteht aus einer SPS-Steuerung und einem User-Interface. Diese beiden Komponenten müssen nicht notwendigerweise an der selben Stelle der Feuerung installiert werden. Somit ist es möglich, das User Interface an einer gut zugänglichen Stelle (also zweckmäßig an der Vorderseite der Feuerung), die SPS-Steuerung hingegen unabhängig davon an einer technisch vorteilhaften Stelle zu installieren. Abbildung VIII zeigt ein Foto der SPS-Steuerung (links im Bild) und des User Interface (rechts im Bild).



Abbildung VIII: Foto der SPS-Steuerung (links im Bild) und des User Interface (rechts im Bild)

Als SPS-Steuerung wurde das Produkt CP430 der österreichischen Firma Bernecker & Rainer ausgewählt. Die SPS-Steuerung kostet bei Kauf einer einzelnen Einheit derzeit 6.580,-- ATS bzw. 478,2 € (exkl. MWSt.). Dies erscheint für den Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen angesichts der zu erwartenden verbesserten Effizienz der Gebäudeheizung, die zu Kosteneinsparungen beim Betrieb führt, gerechtfertigt. Außerdem reduziert sich beim Kauf größerer Mengen selbstverständlich der Preis. Wenn sich der erwartete Erfolg einstellt und die entsprechenden Stückzahlen erreicht werden, dann kann an die Entwicklung einer eigenen, für den Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen bzw. in Hinblick auf die

Kosten optimierten Combustion-Control-Unit, die die gleiche Funktion wie die CP430 erfüllt, gedacht werden.

Die CP430 besteht im Prinzip aus einem Signal-Ein- und Ausgabeteil und einem Prozessor. Der Prozessor weist eine RS-232 Schnittstelle für die Einbindung der CP430 über eine Interface an die verschiedenen Signalübertragungskanäle der heutigen Kommunikationstechnik, insbesondere in die Telefonnetze und ins Internet auf. Auf diese Weise können Betriebsdaten der Feuerung und Eingriffe in den Verbrennungsablauf fernübertragen werden. Darüber hinaus ist über die RS-232 Schnittstelle auch der uneingeschränkte Zugriff auf das Programm der CP430 aus der Ferne über ein Telefonnetz oder über das Internet möglich.

Dieser Zugriff eröffnet auch die Möglichkeit den Energieeinsatz für die Beheizung der „Häuser der Zukunft“ zu verringern. Im Vorgriff auf detailliertere Untersuchungen hierzu sollen an dieser Stelle stichwortartig einige mehr oder weniger realistische Visionen für die Verringerung des Energieeinsatzes im „Haus der Zukunft“ durch den möglichen Fernkontakt mit der Heizanlage angeführt werden:

- Die Temperatur im Haus der Zukunft kann auf ein notwendiges Minimum abgesenkt werden, wenn niemand zuhause ist. Das „Herannahen“ eines Bewohners kann der Heizung über ein Mobiltelefon rechtzeitig angekündigt werden. Bis der Bewohner zu Hause eintrifft ist es bereits wieder warm. Das Gleiche gilt für das Warmwasser.
- Die Gebäudeheizung kann, wenn sich alle Bewohner in einer gewissen Mindestentfernung befinden durch Erfassung deren globaler Position über ein Global-Positioning-System („GPS“) automatisch gedrosselt werden. Diese Idee mag derzeit vielleicht noch etwas visionär erscheinen, aber wer kann wirklich sagen, wie lange es noch dauert, bis der Kauf eines PKW oder auch eines Mobiltelefons „zwangsweise“ mit dem Kauf eines GPS verbunden ist.
- Die mögliche Einbindung der CCU in die heutigen Informationstechnologien ermöglicht grundsätzlich auch das Auffinden von Energieeinsparungsmöglichkeiten durch die mögliche EDV-gestützte Analyse des Betriebsverhaltens der Gebäudeheizung, zum Beispiel allein durch das Speichern und spätere Analysieren von Betriebsdaten durch den Benutzer oder auch durch den Heizanlagengenerzeuger.

- Die CCU kann natürlich auch in die derzeit schon bekannten hausinternen Informationssysteme eingebunden werden und einerseits durch ein optimiertes Wärmemanagement aller wärmetechnisch relevanten Komponenten der Gebäudeheizung und andererseits durch automatisches Erfassen der Standorte der Bewohner zur Verringerung des Energiebedarfs des „Hauses der Zukunft“ beitragen. Das einfachste Beispiel hierzu wäre die Raumtemperaturabsenkung in Räumen, in denen sich niemand aufhält zum Beispiel über Bewegungsmelder, wie sie auch heute schon für die Steuerung von Beleuchtungskörpern eingesetzt werden.
  
- **Arbeitsschritt 4:** Zusammenstellung von Empfehlungen für die optimale Ausführung der Regelung für die „Hausheizung der Zukunft“

Die aus dem gegenständlichen Projekt sich ergebenden Empfehlungen für die optimale Ausführung der Regelung für die „Hausheizung der Zukunft“ sind

- \* in Bezug auf die Verbrennungsregelung:
  - . Regelung der Sekundärluft über CO-Sensor und zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur und der Brennstoffmenge mit dem Ziel der Minimierung der Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen in allen Betriebszuständen und bei unterschiedlichen Brennstoffen.
  - . Regelung der Primärluft mit dem Ziel, das Glutbett zur Minimierung der Stickoxidemissionen möglichst hoch zu halten.
  
- \* in Bezug auf die Leistungsregelung:
  - . PID-Regelung der Kesseltemperatur mit Berücksichtigung der Rücklauf-temperatur im Sinne einer „Störgrößenaufschaltung“ sowie mit Berücksichtigung des zeitlichen Gradienten der Brennkammertemperatur.
  - . Bei jedem Neuanfahren, zum Beispiel im Taktbetrieb und bei einmaliger „Boilerladung“, sollte die Feuerung zunächst mit voller Leistung auf eine entsprechende Betriebstemperatur (Brennkammertemperatur über 650 °C) gebracht werden. Erst dann sollte die reguläre Leistungsregelung, gegebenenfalls für Teillastbetrieb, einsetzen.
  
- \* in Bezug auf die Combustion-Control-Unit:

- . Einsatz einer SPS-Steuerung mit Interface und Schnittstellen für Fernkontakt des Benutzers zur Gebäudeheizung über die Telefonnetze und das Internet
- \* In Bezug auf die Nutzung der Möglichkeiten der Verringerung des Energieeinsatzes in „Haus der Zukunft“ durch Fernkontakt des Benutzers mit der Gebäudeheizung (im Detail noch in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen):
  - . Überwachung der Betriebszustandes der Heizung aus der Ferne
  - . Eingriff in die Heizungsregelung aus der Ferne
  - . Nutzung der Möglichkeit der Aufzeichnung von Betriebsdaten an externen Stellen mit dem Ziel, Erfahrungen im praktischen Betrieb von Feuerungen zu gewinnen. Dies könnte vor allem für Hersteller und Entwickler von Nutzen sein und den Servicebetrieb erleichtern.
  - . Nutzung der Möglichkeit des Herstellers, über Fernkontakt allfällige zwischenzeitlich verbesserte Update-Versionen des Regelungsprogramms im „Rundmail“ an alle im Betrieb befindlichen Anlagen zu verteilen.

Die Ergebnisse des gegenständlichen Projekts sind experimentell abgesicherte Erkenntnisse über Möglichkeiten der Regelung von Feuerungen und zwar in Bezug auf

- größtmögliche Effizienz der Gebäudeheizung,
- geringst mögliche Schadstoffemissionen.
- Eignung für Feuerungsanlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken und
- Eignung für verschiedene Wohn- und Bürobauten.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse ist es möglich, die Beheizung von „Häusern der Zukunft“ mit Biomassefeuerungen zu optimieren und somit der Biomassenutzung zu einem höheren Stellenwert zu verhelfen. Das Projekt ist ein weiterer Schritt zur Entwicklung von optimierten Biomassefeuerungen kleiner Leistung.

Durch die Kooperation mit der Fa. Herz ist die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis von vornherein sichergestellt.

Es kann erwartet werden, dass die Ergebnisse des gegenständlichen Projekts in von allgemeiner Gültigkeit für die Regelung von Kleinfeuerungsanlagen sind. Man kann

daher davon ausgehen, dass der Einsatz der CCU auch in Kleinf Feuerungsanlagen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken mit einem begrenzten Adaptierungsaufwand möglich ist. Dies gilt aller Erwartung nach auch für die derzeit außerordentlich stark boomenden Pelletfeuerungen.

**Weiterführende Arbeiten** sollten daher zunächst vor allem auf Tests der CCU beim Einsatz in Feuerungen mit unterschiedlichen Verbrennungstechniken abzielen.

Aufgrund der gemachten guten Erfahrungen mit der 50 kW Versuchsfeuerungsanlage kann erwartet werden, dass die CCU auch bei Feuerungen mit noch kleineren Leistungen erfolgreich eingesetzt werden kann. Dieser weite Einsatzbereich der CCU könnte zum Bedarf an hohen Stückzahlen führen, der die Entwicklung eines eigenen, für diesen Einsatzfall optimierten und kostengünstigen elektronischen Bauteils rechtfertigen könnten. Die Entwicklung eines solchen elektronischen Bausteins könnte somit einen Lawineneffekt in der Anwendung der CCU bewirken und sollte daher rasch in Angriff genommen werden. Mit Entwicklungsarbeiten zur Übertragung der beschriebenen Regelungstechniken auf Feuerungen noch kleinerer Leistungsklassen („Kleinstfeuerungen“ im Bereich weniger kW) könnte vorab bereits begonnen werden.

Die Möglichkeit des Fernkontakts mit der CCU über ein Telefonnetz oder über das Internet eröffnet auch eine Reihe von Möglichkeiten, den Energieeinsatz im „Haus der Zukunft“ durch Ferneingriffe in die Heizungsregelung zu verringern. Anhand der nun vorliegenden Erfahrungen mit der CCU zusammen mit den Ergebnissen anderer relevanter Vorarbeiten (z. B. /4/) sollten die Möglichkeiten der Verringerung des Energieeinsatzes von Gebäuden durch Nutzung innovativer Informationstechnologien quantitativ untersucht werden.

## **10. LITERATUR**

### **10.1 Zitierte Literatur**

- /1/ Padinger R., 1994: "Optimierte Holzverbrennung", Brennstoff Wärme Kraft, Bd. 46 (1994), Nr. 7/8 (331-333)
- /2/ Good J., Nussbaumer Th., 1998: „Efficiency Improvement and Emission Reduction by Advanced Combustion Control Technique (ACCT) with CO/Lambda Control and Setpoint Optimization“, Biomass for Energy and Industry. 10th European Conference and Technology Exhibition, June 8 – 11 1998, Würzburg, Germany, 1362 – 1365.
- /3/ Padinger R., J. Spitzer, 2001: "Pelletfeuerungen", VDI-Tagung „Thermische Nutzung fester Biomasse“, 16./17. Mai 2001, Salzburg, VDI-Berichte 1588, 2001,(105-128)
- /4/ Könighofer K. , R. Padinger, J. Spitzer, J. Schuschek-Berger, W. Streicher, Th. Mach, 2001: „Anforderungsprofile für Biomassefeuerungen zur Wärmeversorgung von Objekten mit niedrigem Energiebedarf“, Projekt-Endbericht, Institut für Energieforschung, IEF-B-01/01, Joanneum Research, Graz, 2001.
- /5/ Padinger R., M. U. Alzueta, L.-E. Åmand, R. Bilbao, F. Ghirelli, J. Good, P. Hasler, J. Hämmäläinen, V.-P. Heiskanen, H. Hofbauer, J.C. Ibáñez, P. Kilpinen, B. Leckner, O. Leiser, G. Löffler, A. Millera, T. Nussbaumer, M. Oliva, H. Oravainen, J. Saastamoinen, R. Salzmann, H. Schaffner, J. Spitzer, R. Taipale, H. Thunman, B. Waelti, V.J. Wargadalam, C. Wartha, F. Winter, 1999: "Reduction of Nitrogen Oxide Emissions From Wood Chip Grate Furnaces", Final Publishable Report of JOULE-Project JOR3-CT96-0059, Cordis RTD-PROJECTS, European Commission, Joule III, Brussels 1999
- /6/ Padinger R., M. U. Alzueta, L. -E. Åmand, R. Bilbao, F. Ghirelli, J. Good, P. Hasler, J. Hämmäläinen, V.-P. Heiskanen, H. Hofbauer, J. C. Ibáñez, P. Kilpinen, B. Leckner, O. Leiser, G. Löffler, A. Millera, T. Nussbaumer, M. Oliva, H. Oravainen, J. Saastamoinen, R. Salzmann, H. Schaffner, J. Spitzer, R. Taipale, H. Thunman, B. Waelti, V.J. Wargadalam, C. Wartha, F. Winter, „Reduction of nitrogen oxide emissions from wood chip grate furnaces“, Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry,

- 5-9 June 2000, Volume II, James & James Ltd, London UK, Seville (E) (1457-1463)
- /7/ Padinger R., 2000: „NO<sub>x</sub> Reduction of biomass combustion by optimized combustion chamber design and combustion control“, Proceedings of the conference “Developments in Thermochemical Biomass Conversion”, 17.-22. August 2000, Hotel Interpalpen, Seefeld (A) (in press)
- /8/ Nussbaumer Th., 1988: „Stickoxide bei der Holzverbrennung“, Heizung Klima 12 1988, AT Aarau, 51-62.
- /9/ Padinger R., Skoff G., Stanzel W., Spitzer J., 1989: „Control Systems for Solid Fuel Furnaces“ Proceedings of the 5th European Conference Biomass for Energy and Industries, 9 - 13. October 1989, Lisbon, Elsevier Band 2, EUR 12612, Vol. 2, (250-2574)
- /10/ Good, J., 1992: „Verbrennungsregelung bei automatischen Holzschnitzelfeuerungen“, PhD Thesis ETH 9771, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- /11/ Krug D., 2000: „Herr im Haus wo immer man ist“, Austria Innovativ 1/2000, (42-43)
- /12/ Schneider G.: Vorlesungsskriptum „Regelungstechnik 1“, Technische Universität Graz, Institut für Regelungstechnik, 1975
- /13/ Schmidt W., Fa. KWB (A), persönliche Mitteilung im Dezember 2000 über Messungen des Nutzungsgrades von Kleinf Feuerungen im Teillastbetrieb durch die Fa- KWB.

## **10.2 Weiterführende Literatur zum Thema Verbrennungsregelung**

- Good J., Nussbaumer Th., Bühler R., Jenni A., 1996: „Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren zur Entstickung von Holzfeuerungen“, Bundesamt für Energiewirtschaft, Schlussbericht 53894, Bern.
- Good J., Nussbaumer Th., Schaffner H.P., 1998a: „NO<sub>x</sub> Reduction in Biomass Combustion by Combination of Air Staging and SNCR Technique“ Biomass for

- Energy and Industry. 10th European Conference and Technology Exhibition, June 8 – 11 1998, Würzburg, Germany, 1360 – 1361.
- Good J., Salzmann R., Nussbaumer Th., 1998b: „Konstruktive Massnahmen und Prozessregelung zur Optimierung der NO<sub>x</sub>-Minderung durch Luftstufung in einer Unterschubfeuerung“, Bundesamt für Energie, Bern
  - Nussbaumer Th., 1988: „Stickoxide bei der Holzverbrennung“, Heizung Klima 12 1988, AT Aarau, 51-62.
  - Nussbaumer Th., 1989: „Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz“, Diss. ETH Nr. 8838, Zürich.
  - Nussbaumer Th., 1990: „Grundlagen der Holzverbrennung“, 1. Holzenergie-Symposium, 25.10.1990, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1990, 7 – 30.
  - Nussbaumer Th., 1993a: „Wood combustion“, Advances in thermochemical biomass conversion, Vol. I, Blackie Academic, 1993, 590 – 604.
  - Nussbaumer Th., 1993b: „Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen“, Brennstoff-Wärme-Kraft, Vol. 45 (1993) Nr. 11, S. 483-488.
  - Nussbaumer Th., 1997: „Primary and Secondary Measures for the Reduction of Nitric Oxide Emission from Biomass Combustion“, Developments in Thermochemical Biomass Conversion. Blackie Academic & Professional, 1997, 1447 – 1461.
  - Padinger R., Spitzer J., Novy M., 1990: „Regelungssystem für Holzfeuerungsanlagen“, Vortrag im Rahmen der Konferenz „Energetische Nutzung von Holz, Holzreststoffen und Abfallholz“ 25. Oktober 1990, Zürich.
  - Padinger R., 1993(a): „Neue schadstoffminimierende Techniken bei Kleinfeuerungsanlagen“, Vortrag am „Biomassetag der Oberösterreichischen Umweltakademie“, 6 May 1993, Wels.
  - Padinger R., 1993(b): „Wood Combustion Optimization“, Workshop of the „Wood Combustion Activity Group“ Task X „Biomass Utilization des IEA Bioenergy Agreement“, 26 May 1993, Vienna.

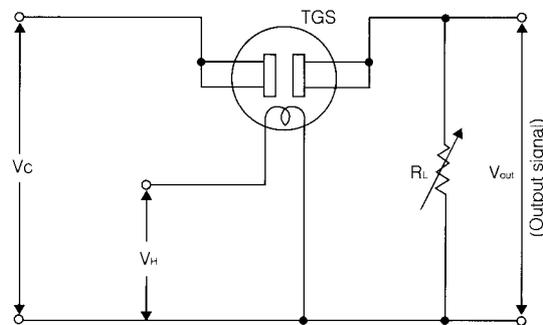
- Padinger R., 1993(c): „Neues umweltfreundliches Regelungssystem für Holzhackgutf Feuerungsanlagen“, Journal „Einkaufsführer“, Brain Service Verlag, Wien, 1993.
- Padinger R., 1994(a): „Staubemissionen bei Biomassefeuerungen“, Vortrag im Rahmen der Konferenz „Thermische Nutzung von Biomasse“, 14 - 15 April 1994, Stuttgart.
- Padinger R., 1994(b): „Emissions from optimized Biomass Furnaces“ Lecture at the COMETT - Workshop „Biomass Combustion“, 16 - 7 May 1994, Graz.
- Padinger R. 1994(c): „Optimierte Holzverbrennung“ Journal „Brennstoff, Wärme, Kraft“, Bd. 46. 1994, 7/8 July/August 1994), VDI Verlag, Düsseldorf.
- Padinger R., Stanzel W., Stiglbrunner R., (1995): „Wood Chip Furnaces for District Heating in Austria: Technical Developments and Operational Performance“, Proceedings der 8<sup>th</sup> E.C. Conference on Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry, 3./5. Okt. 1994 in Wien, Pergamon 1995 (1049 - 1054)
- Padinger R., 1996: „CHP-plants using biomass fuels“ Contribution to the „Biomass Summer School 1996“, 29 July - 2 August 1996, Fehring.
- Padinger R., 1998(a): „Erfahrungen bei der Entwicklung einer Pelletfeuerung“, Vortrag im Rahmen der Konferenz: „Holzpellets, Brennstoff mit Zukunft“, 18 September 1998, Wieselburg.
- Padinger R., 1998(b): „Wärme und Kraft aus Holzfeuerungen“, Poster Präsentation im Rahmen der Konferenz: „Emissionsarme Holzverbrennung in häuslichen und gewerblichen Feuerungsanlagen“, 29. September 1998, Stuttgart.
- Padinger R., 1998(c): „Small and Medium Power Biomass Furnaces – Testing and Implementation“, Proceedings of the Conference “Boosting the Market for Bioenergy in Europe“, 19-21 October 1998, Editors: Green City Denmark A/S and European Institute of Environmental Energy (EIEE) Herning, DK (133-144)
- Spitzer J., R. Padinger, 1994: „Grünes Holz statt schwarzem Öl“, Journal „Aktivum, Magazin der Oberösterreichischen Umweltakademie“, 4/94, November 1994.

- Spitzer J., Padinger R., 1995: „Holz und Energie“, Beitrag zur „Steirischen Landesausstellung, Ausstellung Holz Zeit“, 1995, Murau.
- Spitzer J., Padinger R., 1997: „Biomass Heating Stations for the Application in Austrian District Heating Networks“, Biomass-Boiler-Seminar, 18 September 1997, Brussels (B).

## 11. ANHANG

### 11.1 Schaltplan zur Beschaltung des CO-Sensors FIGARO TGS 816

#### Basic measuring circuit



#### Circuit conditions

Circuit voltage( $V_c$ ) : 24v max. AC or DC

Heater voltage( $V_h$ ) : 5.0V AC or DC

Load resistance( $R_L$ ) : variable ( $P_s < 15mW$ )

Abbildung 31: Stromkreis zur Beschaltung des CO-Sensors FIGARO TGS 816  
(Angabe des Herstellers)

### 11.2 Beschreibung der verwendeten Analysatoren und Messgeräte

#### **O<sub>2</sub>- Analysator:**

Thermomagnetischer Sauerstoffanalysator Magnos 5T, Hartmann & Braun,  
Geräte-Nr.: 32006875

Messbereich: 0 bis 21 Vol %,

#### **CO- Analysator:**

NDIR-Analysator Ultramat 5E - 2R, Siemens, Geräte-Nr.: A09-042

Messbereiche: CO MR1 = 0 ... 600 ppm

MR 2 = 0 ... 6000 ppm

zusätzlich vorhanden, nicht jedoch für die Auswertung:

NO MR1 = 0 ... 600 ppm

MR2 = 0 ... 6000 ppm

**C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>- Analysator:**

FID JUM VE7, Messer Griessheim, Geräte-Nr.: 8776588, kalibriert mit  
n-Butan

Messbereiche: 0 ... 10 ppm  
0 ... 100 ppm  
0 ... 1.000 ppm  
0 ... 10.000 ppm  
0 ... 100.000 ppm

**NO- und NO<sub>2</sub>- Analysator:**

CLD-Analysator, ECO PHYSICS CLD 700 EL-HT, Messer Griessheim,  
SNr.: 72605

Messbereiche: 0 ... 10 ppm  
0 ... 100 ppm  
0 ... 1.000 ppm  
0 ... 10.000 ppm

**N<sub>2</sub>O- Analysator:**

Gasfilter-Korrelations-Analysator, Thermo Environmental Instruments Inc. 46C  
Ysselbach Umwelttechnik, SNr.: 46C-56389-309

Messbereiche: 8 Messbereiche von 0,2 ppm bis 50 ppm

**Rauchgastemperatur:**

NiCr-Ni Mantelthermoelement (d = 1,5 mm), Thermo Est

**Kesselleistung:**

Mehrstrahl Flügelrad-Heißwasserzähler mit Impulsausgang, Schinzel MTH-IV  
mit Impulsverstärker, Qn= 10 m<sup>3</sup>/h, SNr.: 1005331

für Kesselvorlauf- und Kesselrücklauf-temperatur:

Pt100 Widerstandsthermometer, Edelstahl- Einschraubarmatur nach  
DIN 43765 Form B, d=9mm, NL=250, T max=400 °C, Jumo

**Brennkammer-Unterdruck:**

Differenzdruckumformer, Jumo 4ADI-55  
Messbereich 0 bis 100 Pa

**Messumformer:**

Die Signale der Messfühler und Analysatoren werden programmierbaren Messumformern (ISM 110) zugeführt und dort in physikalische Messgrößen umgeformt. Diese Messgrößen werden über RS485-Schnittstellen und einen RS485/RS232-Konverter an einen PC zur Visualisierung und Abspeicherung (Intervall = 10 sec) übertragen.

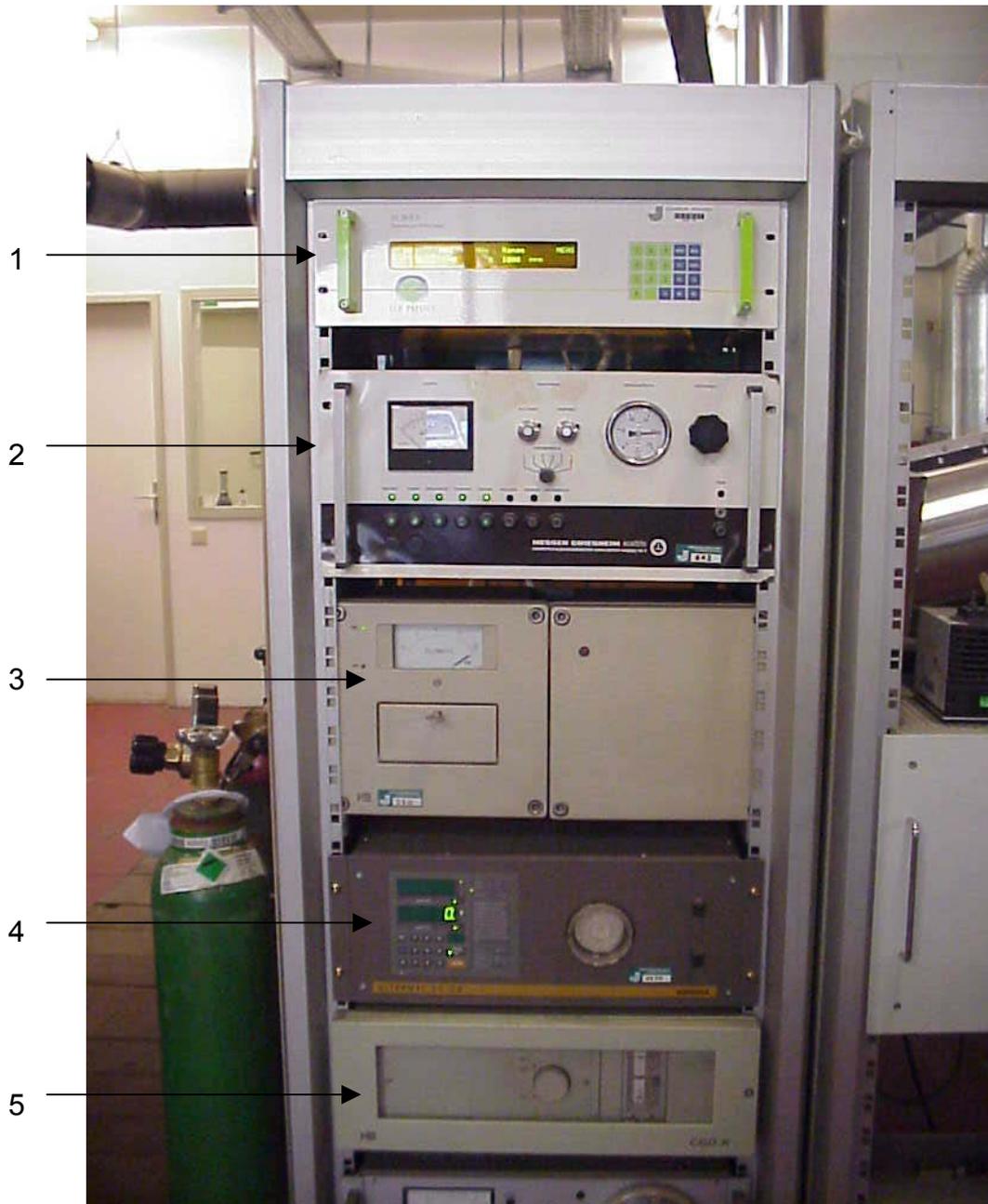


Abbildung 32: Gasanalysatoren für den Regelungs-Versuchsstand

- 1 Stickoxidanalysator
- 2 Flammionisationsdetektor für Kohlenwasserstoffe
- 3 Sauerstoffanalysator
- 4 Kohlenmonoxidanalysator
- 5 Stickoxidkonverter (im gegenständlichen Projekt nicht benützt)

### 11.3 Berechneter Wärmebedarf des „Hauses der Zukunft“ (Szenario aus /4/)

IWT Anforderungsprofile für Biomassefeuerungen zur Wärmeversorgung von Objekten mit niedrigem Energiebedarf																	at:sd	
Referenz_Wohngebäude																		
Wohnungen:		12			Wohnnutzfläche:		929,7m <sup>2</sup>			Wärmebedarf [ kWh/m <sup>2</sup> a ]:		84						
Belegung:		29 Personen			Raumlufthörsolltemperatur:		21°C			Klimatensatz:		Graz 68						
Lüftungsverhalten:		30m <sup>3</sup> /Pers., Regelfaktor2			Heizkörperlänge:		109,8 m			Glas in der Südfassade:		33,25%						
Wärmeschutz:		lt.Norm			Heizkörperhöhe:		0,6 m			Glas in der Nordfassade:		12,66%						
Verglasung:		U =1,1 W/m <sup>2</sup> K, g = 0,599			Auslegungsleistung:		42,14 kW			Glas in der Ostfassade:		0%						
Zeit					Klimadaten			Heizsystem					Warmwasser		Energiebedarf			
Stunde des Jahres	Stunde des Tages	Monat	Tag des Monats	Tag der Woche	t_Luft	Global	Diffuss	t_Raumluft	t_Vorlauf	t_Rücklauf	Massenstrom	Wärmeabgabe	15 Liter pro Tag/Pers.	30 Liter pro Tag/Pers.	Heizung und Warmwasser l/(P*d)	Heizung und Warmwasser l/(P*d)		
					[ °C ]	[ W/m <sup>2</sup> ]	[ W/m <sup>2</sup> ]	[ °C ]	[ °C ]	[ °C ]	[ kg / h ]	[ kWh/h ]	[ kWh/h ]	[ kWh/h ]	[ kWh/h ]	[ kWh/h ]		
82	10	Jänner	4	Donnerstag	-11,7	96	88	21,22	49,80	26,63	741,2	23,84	0,19	1,11	24,03	24,95		
83	11	Jänner	4	Donnerstag	-9,6	214	75	21,40	48,31	24,72	326,4	13,45	0,41	0,50	13,86	13,95		
84	12	Jänner	4	Donnerstag	-8,4	280	64	21,39	47,43	23,28	82,5	8,11	0,29	1,82	8,40	9,94		
85	13	Jänner	4	Donnerstag	-6,4	302	42	21,45	21,45	21,45	0,0	1,77	0,47	2,51	2,23	4,28		
86	14	Jänner	4	Donnerstag	-5,2	222	67	21,42	21,42	21,42	0,0	1,83	1,24	1,78	3,07	3,61		
87	15	Jänner	4	Donnerstag	-4,8	110	74	21,25	44,77	22,38	477,0	7,38	2,21	1,46	9,59	8,85		
88	16	Jänner	4	Donnerstag	-5,2	29	21	21,20	45,06	23,10	586,2	10,80	0,72	1,71	11,52	12,51		
89	17	Jänner	4	Donnerstag	-7	0	0	21,15	46,37	24,45	727,7	14,46	3,89	1,86	18,35	16,32		
90	18	Jänner	4	Donnerstag	-9,2	0	0	21,10	47,97	25,55	833,4	17,86	0,48	1,66	18,34	19,52		
91	19	Jänner	4	Donnerstag	-11	0	0	20,92	49,27	29,09	1382,0	24,01	1,11	1,90	25,12	25,91		

## **11.4 Technische Informationen zur Combustion-Control-Unit**

### Technische Daten

Bezeichnung:	CP 430
C-UL-US gelistet:	In Vorbereitung
Modultyp:	B&R 2003 Zentraleinheit
Modulbreite:	B&R 2003 einfachbreit
Modulplatz:	1
Befehlszykluszeit:	1,6 $\mu$ s
User-RAM:	100 kByte SRAM
System-PROM:	256 k Byte FlashPROM
User-PROM:	256 k Byte FlashPROM
Pufferbatterie:	Lithium Batterie, 3 V / 950 mAh
Pufferstrom typisch:	1,6 $\mu$ A
Pufferstrom maximal:	60 $\mu$ A
HW Watchdog:	JA
Spannungsüberwachung:	Die interne Versorgung wird auf Über- und Unterspannung überwacht
Echtzeituhr:	Nullspannungssicher
Auflösung:	1 s
Statusanzeigen:	LEDs
I/O Busschnittstelle	9-polige DSUB-Buchse

### Standard Kommunikationsschnittstellen:

Anwenderschnittstelle IF1:	RS 232
Potentialtrennung:	NEIN
max. Reichweite:	15 m /19200 Baud

max. Baudrate: 115,2 kBaud

Anwenderschnittstelle IF2: CAN

Potentialtrennung: JA

Ausführung: 9-poliger DSUB Stecker

max. Reichweite: 1.000 m

max. Baudrate:

Buslänge 10 - 60 m 500 kBit/s

Buslänge 100 - 200 m 250 kBit/s

Buslänge 800 - 1.000 m 50 kBit/s

Netzteil:

Eingangsspannung:

minimal: 18 VDC

nominal: 24 VDC

maximal: 30 VDC

Leistungsaufnahme : max. 9,5 V

Ausgangsleistung I/O: 7 W, Integrierte Stromversorgung über PIN 4 der RS 232 Schnittstelle für einfache PANELWARE Tableaus, z. B. P 120