



Energiesysteme der Zukunft

eine Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)

Jahres-Endbericht (Jahr 1)

erstellt am
21/09/2007

„Aktoren unterstützte, adaptive
Verbrennungsoptimierung zur
Feinstaubreduzierung“

Projektnummer 812586

Auftragnehmer:
SHT Heiztechnik aus Salzburg GmbH

2. Ausschreibung der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft

Ausschreibung	2. Ausschreibung der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft
Projektstart	07/2006
Projektende	06/2007
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	12 Monate
Gesamtbudget	€ 185.000,-
BMVIT-Finanzierung	Beitrag FFG: € 57.000,- + Beitrag Bonifizierung EdZ-PF € 18.500,- Darlehen FFG: € 17.000,-
Auftragnehmer	SHT Heiztechnik aus Salzburg GmbH
Ansprechpartner	Dipl.-Ing. BEng. Harald Berger (SHT)
Postadresse	Rechtes Salzachufer 40, 5101 Salzburg
Telefon	+43-662-450444 DW 27
Fax	+43-662-450444 DW 5
E-mail	berger@sht.at
Website	www.sht.at
Bericht erstellt von	Dipl.-Ing. Herbert Hartl, MBA (Hartl Energy-Tech GmbH)
Telefon	+43-662-908386
E-mail	herbert.hartl@energy-tech.at

Titel / Title:

Aktoren unterstützte, *adaptive* Verbrennungsoptimierung zur Feinstaubreduzierung
Actuator based combustion optimization for fine dust reduction

Synopsis:

Durch additiven Einsatz von Aktoren und adaptive Algorithmen soll im Rahmen einer Dissertation an der TU-Graz eine multifunktionale Verbrennungslogik zur Feinstaubreduzierung durch therm. Vergasung bei Holzheizungen entwickelt werden.

By additive use of actuators in combination of adaptive algorithms a multi-functional logic for fine dust reduction in thermal gasification boiler systems for wood-combustion has to be developed in the context of a thesis at the TU-Graz.

Projektleiter / Project Manager:

Dipl.-Ing. BEng. Harald Berger (SHT Heiztechnik aus Salzburg GmbH)

Projektmitarbeiter / Project Team:

Dipl.-Ing. BEng. Harald Berger (SHT Heiztechnik aus Salzburg GmbH)
 AProf. DDI Dr. techn. Bernd Eichberger (TU-Graz, Institut für Elektronik)
 DDI Bakk.techn. Michael Hinterberger (TU-Graz, Institut für Elektronik)
 Dipl.-Ing. Johann Hartl (Hartl Energy-Tech GmbH)
 Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Hartl (Hartl Energy-Tech GmbH)
 Dipl.-Ing. MBA Herbert Hartl (Hartl Energy-Tech GmbH)
 DDr. Hartmann Pallhuber (HET Heiz- und Energietechnik Entwicklungs GmbH)

Berichterstattung / Report:

Salzburg, Sept. 2007

Inhaltsverzeichnis

1) KURZFASSUNG 1 SEITE (DEUTSCH UND ENGLISCH).....	4
2) EINLEITUNG.....	6
3) ZIELE DES PROJEKTES	7
4) INHALTE UND ERGEBNISSE DES PROJEKTES.....	8
5) DETAILANGABEN ZU DEN ZIELEN DER „ESDZ“	26
6) ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN ZU DEN PROJEKTERGEBNISSEN.....	29
7) AUSBLICK/EMPFEHLUNGEN	31
8) VERZEICHNISSE	33
9) ANHANG, KOSTENRECHNUNG:.....	33

1) Kurzfassung 1 Seite (Deutsch und Englisch)

▪ Ausgangssituation

Holzheizungen (Pelletheizungen) wurden bis dato nur in geringem Ausmaß an die Anforderungen der Feinstaubreduzierung ausgelegt. Die wichtigsten internationalen Standards (EN 303-5) gehen gar nicht auf die Minimierung von Feinstaub ein. Das Thema Feinstaub wurde nicht zuletzt wegen ernsthaft gesundheitsgefährdender Auswirkungen der kleinen Staubpartikel PM10 in den vergangenen Jahren zum zentralen Thema, nicht nur bei Holz befeuerten Verbrennungsanlagen. Bislang existieren aber keine abgesicherten Untersuchungen bzw. Vergleichsergebnisse, die einer Holzverbrennung in Bezug auf Feinstaubreduktion eindeutige theoretische und praktische Lösungsvorschläge zuschreiben, die auf rein regelungstechnischer Basis aufbauen. Die möglichen Lösungsansätze einer intelligenten Regelungstechnik in Kombination mit Sensoren und Aktoren bilden im Rahmen des Projektes die Grundlage für die wissenschaftliche Untersuchung.

▪ Inhalte und Zielsetzungen

Durch den additiven Einsatz von Aktoren in einem bestehenden Verbrennungsprozess für verschiedenartige Biomasseheizungen und mit Hilfe intelligenter, adaptiver Verbrennungsalgorithmen soll eine allgemeine Verbrennungslogik (und Simulationsmethodik) entwickelt werden, die den Wirkungsgrad steigert und die Feinstaubbelastung reduziert. Ein weiteres Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Entwicklung intelligenter Selbstüberwachungs- bzw. Problembehebungsalgorithmen zur Steigerung der Betriebssicherheit unter Extrembedingungen. Durch sich ständig anpassende Parameter soll ein besserer Betriebspunkt gefunden werden, sodass der Brennstoff optimal und kontrolliert abgebrannt werden kann.

▪ Methodische Vorgehensweise

- Literaturstudium Sensorik, Ideensuche, neue Lösungsansätze evaluieren
- Planung der Messtechnik, zusätzliche Instrumentierung am Kessel
- Aufnahme derzeitige Situation an bestehender Kesseltechnik
- Auswertung der Messdatenerfassung, Messstudien
- Regelungstechnische Zusammenhänge und Quereinflussungen ermitteln
- Ableiten diverser Verbrennungsmodelle für eine Simulation
- Optimierungsprozesse zur Feinstaubreduktion
- Beschleunigte Lebensdauertests/Alterung/Zuverlässigkeit
- Integration der Forschungsergebnisse in die Serienfertigung und Dokumentation

▪ Erwartete Ergebnisse

Durch die Aufzeichnung aller Sensorsignale besteht die Möglichkeit, dass sich Verbrennungsvorgänge von Anfang bis zum Ende in einem gewissen Toleranzbereich reproduzieren lassen und so ein allgemein gültiges Simulationsmodell erstellt werden kann. Durch die spezielle Logik sollen auch Rückschlüsse auf die jeweils aktuelle Brennstoffqualität und den vorliegenden Heizwert gezogen werden. Dadurch wird ein ständiger Optimierungsprozess aktiviert. Durch Interaktionen einzelner Sensordaten sollen neue physikalische oder nicht direkt erfassbare Größen abgeleitet bzw. Größen mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Diese werden in weiterer Folge für einen Seriengerät als ausreichend gut beschriebenes Modell für die implementierten intelligenten Algorithmen verwendet.

- *Actual Situation:*

Up to now wood combustion systems (pellet boilers) have been designed only in small extent according to the requirements of fine dust reduction. The most important international standards (EN 303-5) do not at all treat the minimization of fine. Fine dust became a central topic not only because of seriously health-endangering effects of the small dust particle PM10, and not only for wood combustion systems. So far, however, no secured investigations and/or results of comparison exist which attribute definitive theoretical and practical proposals, regarding software/control related fine dust reduction. The ideas of intelligent control engineering in combination with sensors and actuators form the basis for the scientific investigation in the context of this project.

- *Content and Goals*

By the additive use of actuators during a combustion process for different wood heating systems and with support of intelligent, adaptive combustion algorithms a general combustion logic (and simulation methodology) is to be developed. Efficiency increases and fine dust will be reduced. A further goal of this scientific work is the development of intelligent self-monitoring and/or problem-recovery-algorithms for the increase of operation reliability under extreme conditions. A better operating point is to be found by constantly adapting parameters so that the fuel can be burnt optimally controlled.

- *Methodical Approach*

- *literature study sensor technology, idea research, new solutions evaluation*
- *planning of measurement technique, additional instrumentation on the boiler*
- *admission present situation at existing boiler technology*
- *evaluation of the measurement data recording, measuring studies*
- *determining control based synergies and transverse influences*
- *deriving various combustion simulation models*
- *optimization processes for fine dust reduction*
- *accelerated life span test/aging/reliability*
- *integration of the research results in series production, documentation*

- *Expected Results*

By recording of all sensor-signals from the beginning to the end the possibility exists that the combustion procedure can be reproduced within a certain tolerance-range. Thus a generally valid simulation model can be provided. Conclusions about the current fuel quality and the available heat value are also to be drawn by the special logic. Thus, a permanent optimization process is activated. New physical or not directly detectable data and/or data of sufficient accuracy are to be derived. In further consequence these data will be used as parameters in intelligent algorithms for standard settings.

2) Einleitung

- Holzheizungen (Pelletheizungen) wurden bis dato nur in geringem Ausmaß an die Anforderungen der Feinstaubreduzierung ausgelegt. Die wichtigsten internationalen Standards (EN 303-5) gehen gar nicht auf die Minimierung von Feinstaub ein. Hier bilden CO, NO_x, C_xH_y sowie Staub (nicht Feinstaub) und Wirkungsgrad die wichtigsten Erfüllungsparameter. Erst die letzten beiden Jahre haben die Thematik „Feinstaub“ aufleben lassen. Feinstaub scheint wesentlich mehr negative Auswirkungen auf die Gesundheit zu haben, als bisher angenommen.
- Das Thema Feinstaub wurde also nicht zuletzt wegen ernsthaft gesundheitsgefährdender Auswirkungen der kleinen Staubpartikel PM₁₀ in den vergangenen Jahren zum zentralen Problemthema, nicht nur bei Holz befeuerten Verbrennungsanlagen. Zu den PM₁₀ Emissionen in Europa, die aus kleinen Verbrennungsanlagen für Heizzwecke herrühren, tragen Öfen und Heizkessel den maßgeblichen Teil bei. Im Jahr 2002 lag in Österreich der Anteil von PM₁₀ Emissionen aus Verbrennungsanlagen für Heizzwecke bei ca. 16 %. Ca. 70% der Partikelemissionen aus automatischen Holz-Heizkesseln sind kleiner 1 µm (aerodynamischer Durchmesser) mit einem Partikelhäufigkeitsmaximum um bzw. klein 0,5 µm.
- (Nussbaumer et al, Health relevance of aerosols from biomass combustion in comparison to diesel soot indicated by cytotoxicity tests, in Obernberger (ed.), Brunner (ed.), Aerosols in Biomass Combustion, Graz 2005). Partikel sind: Ruß aus unvollständiger Verbrennung und Aschebestandteile (hauptsächlich als Salze wie KCl, K₂SO₄, CaCO₃ und CaO) => Ca in Asche; wenn Ca-Partikel in Flugasche, dann hauptsächlich durch Entrainment. K-Salze als Aerosolpartikel.
- Toxizität: Dieselerusspartikel (Heizöl EL) sind weitaus toxischer als Partikel aus automatischen Holz-Verbrennungen (Stand der Technik), da erstere hauptsächlich unverbrannte Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) enthalten und letztere hauptsächlich aus anorganischen Salzen bestehen. Dies gilt nur bei guter Verbrennung. Schlechte Verbrennung führt zu toxischeren Partikeln (Nussbaumer et al, Health relevance of aerosols from biomass combustion in comparison to diesel soot indicated by cytotoxicity tests, in Obernberger (ed.), Brunner (ed.), Aerosols in Biomass Combustion, Graz (2005)).
- Mit Hilfe intelligenter Algorithmen und aktiver Datenerfassung (Sensoren / Aktoren), die für eine ständige Überwachung und Anpassung des Verbrennungsvorganges an die gegebenen Umweltbedingungen sorgen, soll der Wirkungsgrad einer Holz beheizten Anlage optimiert und in Folge die Feinstaubgenerierung minimiert werden.
- Eine Optimierung des Wirkungsgrades verlängert nicht nur die Lebensdauer der Anlage, sondern reduziert die Feinstaubentstehung erheblich und sorgt dafür, dass die restlichen Feinstaubpartikel nicht toxischer Natur sind, sondern – wie bereits erwähnt – aus anorganischen Salzen bestehen.
- Das Projekt beschäftigt sich also mit der Entwicklung einer neuen Technologie zur Verbrennungsoptimierung bei thermischen Vergasungsprozessen von Holzheizungen (erneuerbare Energie), um die variablen Energieanforderungen besser zu erfüllen und gleichzeitig die Feinstaubbelastung

gen zu reduzieren. Dabei ist auch auf die gerade bei Holz auftretenden Qualitätsschwankungen einzugehen und ein Regelkonzept zu entwickeln, das diese Qualitätsschwankungen impliziert.

- Das bedeutet, dass das Ziel des Projektes eine nachhaltige Innovationsstrategie (Innovations-sprung, Steigerung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit) für das Unternehmen und für den Stand der Technik im Allgemeinen bedeutet.
- Das Projekt – welches insgesamt über 2 Jahre geführt wird – wird aufgrund seines hohen wissenschaftlichen Charakters in Zusammenarbeit mit der TU-Graz im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Die Anforderungen von „Nachhaltig Wirtschaften“ werden durch die besondere Intelligenz des Regelkonzeptes und der damit verbundenen Emissionssenkungen durch permanente Selbstkontrolle, Brennstofferkennung und Selbstoptimierung vollends erfüllt.

3) Ziele des Projektes

- Durch den additiven Einsatz von Aktoren in einem bestehenden Verbrennungsprozess für verschiedenartige Biomasseheizungen und mit Hilfe intelligenter, adaptiver Verbrennungsalgorithmen soll eine allgemeine Verbrennungslogik (und Simulationsmethodik) entwickelt werden, die den Wirkungsgrad steigert und die Feinstaubbelastung reduziert.
- Ein weiteres Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Entwicklung intelligenter Selbstüberwachungs- bzw. Problembehebungsalgorithmen zur Steigerung der Betriebssicherheit unter Extrembedingungen.
- Durch sich ständig anpassende Parameter soll die Betriebsweise ständig kontrolliert werden und damit ein permanentes Streben zu einen besserer Betriebspunkt (Optimum) gefunden werden, sodass der Brennstoff optimal und kontrolliert abgebrannt werden kann, bei niedrigst möglichen Emissionen und höchster Effizienz, auch bei wechselnden Bedingungen.
- Einbindung der Ergebnisse in bestehende Heizungs-lösungen (z.B. Kombikessel für Pellets und Scheitholz, weil hier nicht nur mit verschiedenen Brennstoffqualitäten, sondern sogar mit verschiedenen Brennstoffarten gearbeitet wird).

4) Inhalte und Ergebnisse des Projektes

Die Arbeitsabläufe lassen sich in folgende Aufgaben-Meilensteine gliedern:

- 1) Vorbereitende Arbeiten, Theoretische Grundlagen erarbeiten
 - a. Literaturstudium Sensorik, Ideensuche, neue Lösungsansätze evaluieren
 - b. Planung der Messtechnik, zusätzliche Instrumentierung am Kessel
 - c. Aufnahme derzeitig Situation an bestehender Kesseltechnik
- 2) Erstellung eines Logikmodells, das den Erkenntnissen aus den vorbereitenden Arbeiten entspricht und Kontrolle der Ergebnisse durch Vergleiche mit Praxistests
 - a. Auswertung der Messdatenerfassung, Messstudien
 - b. Regelungstechnische Zusammenhänge und Querverbeeinflussungen ermitteln
 - c. Ableiten diverser Verbrennungsmodelle für eine Simulation
 - d. Die theoretischen und labortechnischen Ergebnisse im Rahmen der Dissertation an der TU-Graz durch Herrn DDI Hinterberger und dessen betreuenden Professor DI Dr. Eichberger werden in einem Umsetzungsprojekt in Pilotgeräte eingearbeitet
 - e. Im eigenen Labor werden diese Ergebnisse in vielen Dauer- und Spitzenlasttests auf Richtigkeit und Anwendbarkeit untersucht und optimiert.
 - f. Weiters werden Demonstrationsanlagen (Prototypen) erstellt und im Praxis-Feldversuch bei ausgewählten Kunden unter Praxisbedingungen eingesetzt. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen bilden wiederum die Basis für die weitere Optimierung
- 3) Optimierung der Prozessabläufe (Simulationsoptimierung), Einbindung in bestehende Systeme und begleitende Feldtestserien.
 - a. Optimierungsprozesse zur Feinstaubreduktion im Labor und in weiteren Feldtestläufen bei ausgewählten Kunden unter Praxisbedingungen
 - b. Beschleunigte Lebensdauertests/Alterung/Zuverlässigkeit
 - c. Integration der Forschungsergebnisse in die Serienfertigung
 - d. Absicherung der Ergebnisse auf Richtigkeit durch zusätzliche Labor und Praxistests an verschiedenen Heizgeräten (Anwendung auf mehrere Modelle) Dokumentation

Allgemeines, Stand der Technik, Neuerungen:

Mit dem aktuellen Entwicklungsstand der thermocontrol II Regelung wurde eine solide Basis für wissenschaftliches Arbeiten geschaffen. Sämtliche Systemkomponenten des ThermoDual-Kombi-Kessels (für Pellets und Scheitholz) können als einzelnes autonomes Modul angesprochen werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, gezielt Einflüsse bzw. Querverbeeinflussungen herauszufiltern oder vorzugeben. Es können selbst nichtlineare Zusammenhänge in lineare Teilkomponenten zerlegt und somit mathematisch bzw. mittels Algorithmen abgehandelt und definiert werden. Da die Verbrennung von Holz als

Brennstoff im Normalfall sehr inhomogen abläuft ist es von besonderer Wichtigkeit, dass sich die Verbrennungsregelung ständig an die veränderlichen, dynamischen Vorgaben anpassen kann. Bei der bereits bestehenden ThermoDual- Anlage wird mittels einer Lambdasonde (O₂-Sensor) kontinuierlich der Restsauerstoffgehalt gemessen und als primäre Regelgröße für den Verbrennungsablauf herangezogen.

Bei vielen konventionellen vollautomatischen Verbrennungsanlagen wird meist, wenn überhaupt, mittels O₂-Sensor der Verbrennungsprozess geregelt. Der Vorteil besteht darin, dass die Lambdasonde direkt im Abgasstrom ohne zusätzlichen Aufwand platziert werden kann. Mittels Sondenheizung wird stets für beste Voraussetzungen für die O₂-Messung gesorgt. Der Nachteil liegt darin, dass durch Störgrößen der O₂-Meßwert abweichen kann, ohne dabei den Verbrennungsprozess beeinflusst zu haben. Dies kann z.B. durch undichte Stellen bei Dichtungen oder dergleichen auftreten. Genau dieser Nachteil kann bei langen Betriebszeiten oder bei schlechter Wartung auftreten und möglicherweise die gesamte Verbrennungsregelung verschlechtern, was sich wiederum in Form von schlechten Emissionswerten und/oder enormer Teer-/Rußbildung auswirken kann.

Damit der oben genannte Nachteil nicht zu tragen kommt ist es für die Qualität des Verbrennungsprozesses von Vorteil, wenn kontinuierlich die Konzentrationen der Rauchgasbestandteile gemessen werden. Erst dann kann sinnvoll über eine Feinoptimierung des Verbrennungsprozesses einer bereits bestehenden Anlage nachgedacht werden.

Die bereits erfolgreich entwickelte thermocontrol II Regelung bietet eine hervorragend Verbrennung. Ein Indikator für eine gute Verbrennung ist die Färbung der Brennkammer bzw. des Schornsteins. Rauchgas von heller oder farbloser Färbung ist ein Anzeichen für einwandfreie Verbrennung. Dunkelgrauer oder schwarzer Rauch entsteht bei unvollständiger Verbrennung oder bei falschem Brennstoff. Je heller die Rückstände in der Brennkammer, desto besser erfolgte der Abbrand. Dunkle Ablagerungen mit glänzender Oberfläche weisen auf eine schlechte Verbrennung mit hohem Ruß-/Teeranteil hin. Die nachfolgenden Bilder zeigen das Resultat eines Verbrennungsprozesses bzw. die Rückstände und Ablagerungen in der Prüfkesselbrennkammer.

Abb.: Fotos des TDA Kombi-Testkessels mit thermocontrol II Regelung



Bild links: Brennkammertüre



Bild rechts: Brennkammer innen



Bild links: untere Brennkammer

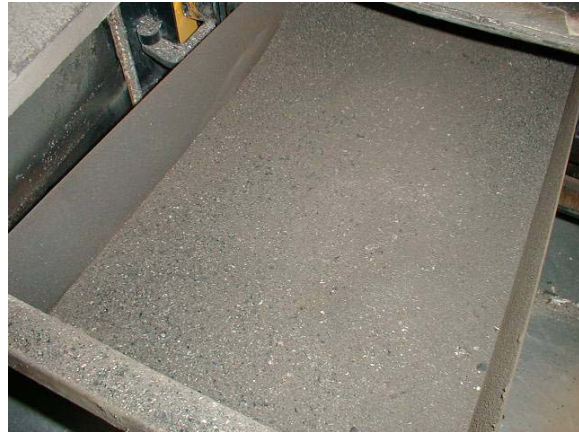


Bild rechts: Aschenlade

thermocontrol II (kurz: TC II) Verbrennungsregelung PELLET:

Momentan werden aus dem Restsauerstoffgehalt im Abgas sämtliche Stellgrößen für die Verbrennungsregelung abgeleitet.

Ein wesentlich und sicherheitstechnischer Aspekt ist die aktive Einschubregelung für die Zufuhr der Pellet. Mittels dynamisch angepasster Einschubmenge in Abhängigkeit von der Regeldifferenz zwischen den Restsauerstoffgehalten (IST- SOLL), wird stetig für optimalen Einschub gesorgt. Durch diese Maßnahme sorgt die Regelung für beste Verbrennungsergebnisse und verhindert Verstopfungen in der Brennkammer durch Überfüllung. Eine weitere zusätzliche Maßnahme für die Verbesserung des Verbrennungsprozesses wird mit Hilfe des Saugzugventilators realisiert. Durch einen PID-Regler können schnelle Veränderungen im Restsauerstoffgehalt sehr gut kompensiert werden. Der große Vorteil liegt darin, dass der Saugzugventilator schnell reagieren kann. Dadurch wird dem Verbrennungsprozess mehr oder weniger Frischluft zugeführt. Im gesamten Regelsystem befindet sich eine leichte Verzögerung bzw. eine Totzeit. Dadurch kann z.B. bei Variation des Einschubes die Veränderungen erst nach einer gewissen Zeit nachgewiesen bzw. kompensiert werden.

Aus diesem Grund ist es erforderlich mehrere im System verfügbare Stellgrößen mit unterschiedlichen Reaktionszeiten unabhängig voneinander auf das Verbrennungssystem einwirken zu lassen. Damit können ein sehr hoher Wirkungsgrad und eine optimale Verbrennung bei maximaler Schonung der Umwelt kontinuierlich angestrebt werden. Ebenso wirkt sich diese Tatsache sehr positiv auf die Emissionen aus.

Eine weitere Maßnahme zur Verbesserung der Verbrennung ist die Variation der primären und sekundären Luftklappe. Bei der thermocontrol II Regelung wird nur die sekundäre Luftklappe aktiv geregelt. Die primäre Luftklappe wird meist, abhängig von der aktuellen Verbrennungsphase, fix auf eine definierte Position gestellt. Die sekundäre Luftklappe wird erst nach Über-/Unterschreiten eines gewissen Schwellwertes verändert. Damit kann die Lebensdauer des Stellmotors wesentlich verlängert werden, was sich wiederum auf die Einsatzfähigkeit positiv auswirkt. Bei einer Änderung der Stellposition eines Luftklappenmotors verändert sich die Luftzufuhr. Der Zusammenhang zwischen Luftzufuhr und Stell-

position ist nichtlinear. Die Verbrennungsqualität ist sehr stark von der vorhandenen Gesamtluftmenge abhängig. Die Gesamtluftmenge setzt sich aus primärer und sekundärer Luftmenge zusammen. Für den nötigen Unterdruck und Durchzug im System sorgt das Saugzuggebläse bzw. der natürliche Kaminzug. Die Verbrennungsluft kann durch die beiden Luftklappen einströmen. Für die Regelung ist es wichtig, dass kein System geschaffen wird, welches sehr stark nichtlinear und dadurch nur sehr schwer Handzuhaben ist. Die bereits beschriebenen Regler arbeiten dynamisch in linearen Teilbereichen. D.h. die Nichtlinearität der Luftzufuhr wird einfach in Teilbereiche zerlegt. Der Einfluss durch den natürlichen Kaminzug wird vorerst nur indirekt berücksichtigt. Falls ein starker Naturzug im Kamin vorliegen sollte, wirkt sich dies auf die Strömungsgeschwindigkeit der angesaugten Verbrennungsluft aus. Dies wiederum beeinflusst den Verbrennungsprozess und folglich kann eine Veränderung im Restsauerstoffgehalt mittels Lambdasonde feststellen werden. Diese Veränderung bewirkt wiederum eine Anpassung der Stellgrößen und demzufolge eine Kompensation im Regelkreis. Großen Einfluss hat die Position der primären Luftklappe. Interessant wäre, einige Zusammenhänge bzgl. Regelung der primären Luftklappe und Einfluss auf den Verbrennungsprozessqualität zu erforschen.

Abb.: Im nachfolgenden Bild ist ein typisches Pellet- Verbrennungsprozessabbild einer thermocontrol II Regelung ersichtlich.

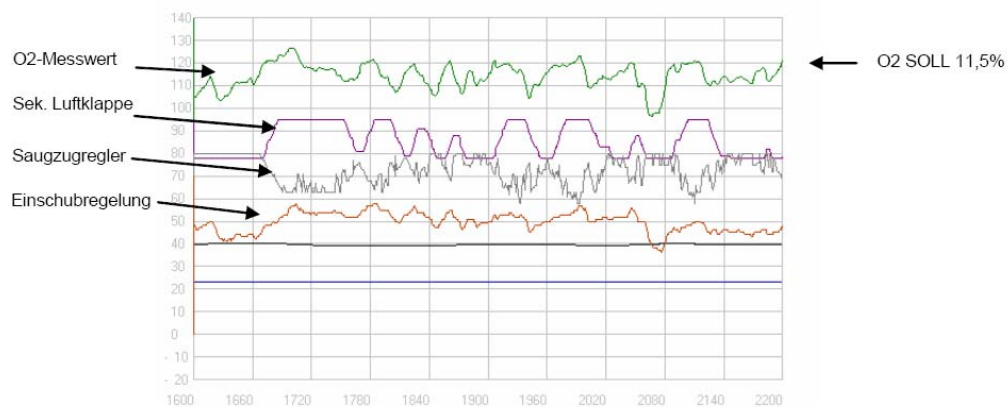


Sämtliche Messwerte sind Momentanwerte und werden für die Darstellung nicht gemittelt. Demzufolge erhält man ein reales Verbrennungsprozessabbild. Der O2-Sollwert bei einer Pellet- Verbrennung liegt bei 11,5%. In dem Diagramm kann man sehr schön erkennen, wie der PID- Saugzugregler seine Arbeit erfolgreich erledigt. Ebenso wird ständig die Zufuhr der Pellet dynamisch mittels Einschubregler angepasst. Das Ergebnis spricht für sich. Die Pellet- Brennkammertemperatur verläuft nach einer Exponentialfunktion und erreicht nach sehr langer Zeit einen Endwert von ca. 320 bis 340°C. Der Endwert ist sehr stark vom Brennwert der verwendeten Pellet abhängig.

Die sekundäre Luftklappe wird erst ab Erreichen eines bestimmten Schwellwertes verändert. Damit verläuft die Regelung weitestgehend im linearen Bereich.

Die Kesseltemperatur steigt ebenso kontinuierlich und strebt in Folge den gewünschten Sollwert an. Der Vorgang kann früher abgebrochen werden, falls z.B. die Temperatur im Pufferspeicher den erforderlichen Sollwert erreicht hat.

Abb.: Im nachfolgenden Bild ist ein Zeitausschnitt einer typischen Pellet- Verbrennung ersichtlich.



Bei den O₂-Messwerten handelt es sich um Momentanwerte und nicht um zeitliche Mittelwerte. Würde man sich gedanklich einen zeitlichen Mittelwert für die O₂-Messung vorstellen, so würde dieser annähernd beim gewünschten O₂-Sollwert von 11,5% liegen. Bei akkreditierten Prüfanstalten werden meist zeitliche Mittelwerte über längere Zeiträume hinweg gebildet, teilweise bis zu 15 Minuten und mehr.

thermocontrol II Verbrennungsregelung SCHEITHOLZ:

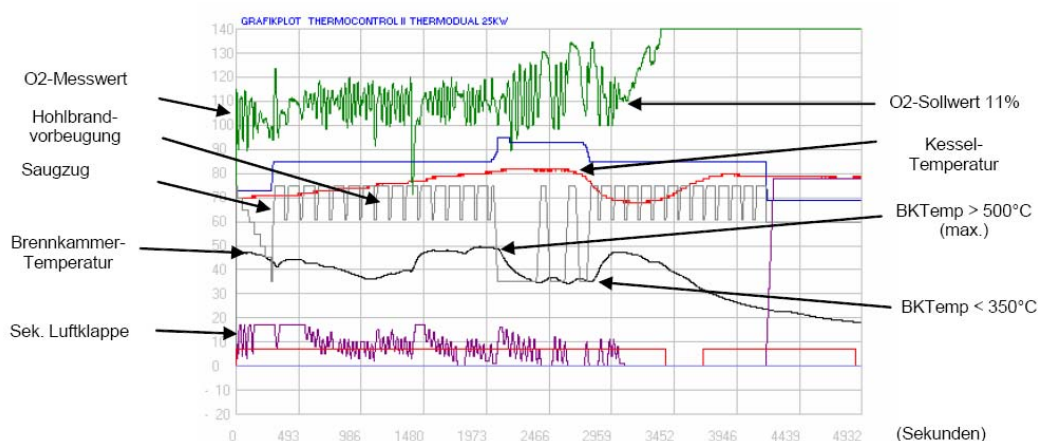
Bei der vollautomatischen Verbrennung von Scheitholz mit dem ThermoDual- Kessel wird mit Hilfe einer O₂-Regelung für einen sehr guten Abbrand gesorgt.

Der Abbrand von Scheitholz verläuft weitestgehend „ruhiger“ als der von Pellet. Aufgrund der größeren und kontinuierlicheren Ausgasungsmenge aus dem Scheitholz verläuft die Regelung entsprechend harmonischer. Dennoch können sich die Verbrennungsverhältnisse sehr schnell ändern und deshalb muss ebenso rasch darauf reagiert werden. Die thermocontrol II Regelung ermöglicht beim Abbrand von Scheitholz die geforderte Reaktionsschnelligkeit. Als Regelgröße wird der aktuelle O₂-Messwert herangezogen. Als Stellgröße steht dem Scheitholz-O₂-Regler hauptsächlich die Stellung der sekundären Luftklappe zur Verfügung. Durch Variation der sek. Luftklappe kann die Zufuhr der Verbrennungsluft in Grenzen gehalten werden. An dieser Stelle wären ebenso wie beim Pellet- Abbrand Untersuchungen und Auswirkungen einer primären Luftklapperegelung interessant. Zurzeit sind in diese Richtung noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen mit Hilfe der thermocontrol II Regelung angestellt worden. Der Saugzugventilator wird bei der aktuellen Softwarevariante auf einen Wert in Abhängigkeit von der aktuellen Leistung gestellt. Zusätzlich variiert der Saugzug periodisch seine Drehzahl. Diese Methode bringt den Nutzen, dass eventuell auftretende Hohlbrände in der Scheitholzbrennkammer reduziert bzw. vermieden werden. Hohlbrände entstehen, wenn sich im inneren eines aufgetürmten Scheitholzhaufens in der Brennkammer eine Hülle aus unverbrannten, verkeilten Scheitholz bildet. Dieses starre Gebilde kann dazu führen, dass trotz vorhandenem Scheitholz in der Brennkammer, die Brennkammertemperatur absinkt und in Folge der weitere Abbrand nur schlecht kontrollierbar bleibt. Demzufolge sinkt die Leistung und das restliche Scheitholz müsste in der Brennkammer neu angeordnet werden.

Die Temperatur in der Brennkammer spielt beim Abbrand von Scheitholz eine sehr wichtige Rolle. Steigt die Temperatur auf sehr hohe Werte an, so sinkt die Lebensdauer der Brennkammer rapide. Aus diesem Grund ist es erforderlich, in der Software Begrenzungen und Vorkehrungen bei zu hohen Temperaturen vorzusehen. Aktuell kann eine maximale Scheitholztemperatur als veränderbarer Parameter im System definiert werden, typische im Bereich 500°C – 550°C. Wird diese Temperatur überschritten, erfolgt eine Drosselung des Saugzugventilators. Damit wird ein weiteres Ansteigen der Temperatur verhindert. Erst ab dem Unterschreiten der Brennkammertemperatur von 350°C wird die Regelung wieder aktiviert. Mit dieser Maßnahme bzw. Hysterese kann verhindert werden, dass sich in der Brennkammer so genannte „Glutnester“ bilden.

Der Verlauf der Brennkammertemperatur ist sehr stark vom verwendeten Brennstoff abhängig. Die Qualität des Brennstoffes und der Feuchtigkeitsgehalt sind maßgeblich für den gesamten Verbrennungsprozess ausschlaggebend. Die Verbrennung ist eine sehr rasche, unter Flammenbildung verlaufende Oxidation von Brennstoffen. Bei der Holzverbrennung vereinigen sich Sauerstoff aus der Luft mit Kohlenstoff und Wasserstoff aus dem Holz. Die Entstehungsprodukte bei einer vollständigen Verbrennung sind im Idealfall CO₂, Asche und Wasser. Durch den Abbrand können benachbarte Scheithölzer in der Brennkammer plötzlich entflammen und folglich den aktuellen Verbrennungsprozess stark beeinflussen. So eine Beeinflussung kann sich als Einbruch des O₂-Messwertes bemerkbar machen. Die thermocontrol II Regelung reagiert auf diese Einbrüche bzw. Störgrößen mit einer Anpassung der Stellgröße. Im genannten Fall wird die sek. Luftklappe entsprechend geöffnet, damit genügend Sauerstoff in die Brennkammer nachströmt. Oft ist dieses Ereignis mit einem Temperaturanstieg in der Brennkammer verbunden.

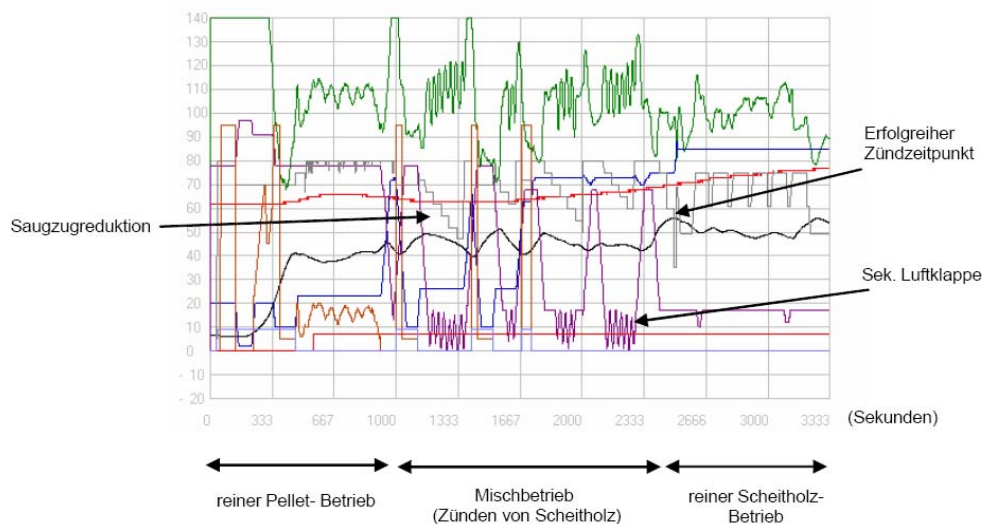
Abb.: Im nachfolgenden Prozessabbild kann dieser beschriebene Effekt besichtigt werden.



Bei der thermocontrol II Regelung wird verfügbares Scheitholz in der Brennkammer automatisch erkannt. Es gibt mehrere Kriterien für die sichere Detektierung von Scheitholz. Zum einen ist der Gradient der Temperatur und des Restsauerstoffgehaltes ein Indikator für das Vorhandensein von Scheitholz und andererseits wird beim Überschreiten einer gewissen Schwelltemperatur die Existenz von Scheitholz in der Brennkammer angenommen. Die thermocontrol II Regelung versucht selbständig

das gegenwärtige Scheitholz, in Abhängigkeit vom voreingestellten Zündmodus, zu entflammen. Der vollautomatische Zündmodus übernimmt das Anfachen der Scheithölzer mit Hilfe des Pellet- Brenners. Es besteht die Möglichkeit, dass vorhandenes Scheitholz nur schlecht oder nur überhaupt nicht zündet. Deshalb wird bei der thermocontrol II Regelung mit einem ausgeklügelten Zündalgorithmus solange ein Anbrennen provoziert, bis sich ein Basisglutbett in der Brennkammer aufbaut. Periodisch werden Pellet in die Pellet- Brennkammer eingeschoben, damit genügend Zündenergie für das Scheitholz zur Verfügung steht. Die Drehzahl des Saugzugventilators wird in der Scheitholzzündphase schrittweise und mit einem zeitlichen Versatz bis zu einer minimalen Untergrenze reduziert. Gleichzeitig sinkt durch die Drehzahlreduktion des Saugzugmotors meistens die Brennkammertemperatur. Sollte die Brennkammertemperatur trotz Drehzahlreduktion einen Mindestwert nicht unterschreiten, kann davon ausgegangen werden, dass der Scheitholzstoß in der Brennkammer ordentlich entflammt wurde. Anderenfalls wird nach Unterschreiten eines Mindestwertes erneut der Pellet- Brenner aktiviert. Dabei kann es vorkommen, dass über einen längeren Zeitraum hinweg dieser beschriebene Ablauf periodisch wiederholt wird. Der angedeutete Fall, dass die Brennkammertemperatur bei einer Drehzahlreduktion des Saugzugmotors sinkt muss nicht immer eintreten. Falls z.B. sehr gutes, trockenes, leicht entzündliches Holz bzw. Papier oder Karton sich in der Scheitholzbrennkammer befinden, kann die Temperatur nach sehr kurzer Zeit hohe Werte annehmen. Dieser Fall wurde bei der thermocontrol II Regelung mit einem Schwellwert und einer zeitlichen Beobachtung erfolgreich berücksichtigt.

Abb.: Im nachfolgenden Bild ist der Scheitholz -Zündvorgang dargestellt.



Die Zündphasen bei der thermocontrol II Regelung für Scheitholz unterteilen sich, wie in der obigen Grafik ersichtlich, in mehrere Teilbereiche. Der mittlere Betriebsbereich kann bei praktischen Verbrennungen länger andauern und es kann vorkommen, dass der reine Scheitholzbetrieb nie erreicht wird. Die Gründe dafür sind schlechter oder nur mangelnder Brennstoff in der Scheitholzbrennkammer. Ein großer Nachteil dieser Tatsache ist, dass im Mischbetrieb ein schlechterer Verbrennungsprozess stattfindet. Einerseits bedingt durch die Tatsache, dass es Unterscheidungen zwischen Pellet- und Scheitholzbetrieb bei den Luftklappenstellungen gibt und andererseits, dass bei der Zündphase von Holz anfänglich immer schlechtere Ergebnisse durch unvollständige Verbrennung vorliegen.

In der obigen Grafik kann der Luftklappenwechsel zwischen Pellet- Betrieb und Scheitholzzündphase gut erkannt werden. Betrachtet man die O₂-Messung im Mischbetrieb, so ist ersichtlich, dass sich kein besonders stabiler Verlauf einstellt und der ThermoDual- Kessel dadurch schlechte Emissionswerte liefert. Trotzdem bleibt der Verbrennungsprozess unter Kontrolle.

Abb.: Im nachfolgenden Bild ist ein Verbrennungsvorgang von Scheitholz zu erkennen, wobei die thermocontrol II Regelung an ihre Grenzen stößt.



Aufgrund der vorhandenen Aktoren und deren konstruktiv bedingten Abmessung und Bauformen ist es nicht immer möglich, mit der vorhandenen Elektronik bzw. Software konstruktive Mängel zu beheben. Ein Problem stellt die Luftklappenstellung des sekundären Stellmotors dar. In manchen Fällen kann dem Verbrennungsprozess nicht genügend Sauerstoff zugeführt werden. In der obigen Grafik ist dieser Effekt sehr schön ersichtlich. Zusätzlich kann im obigen Bild erkannt werden, dass beim Wechsel vom Pellet- Betrieb in den Scheitholz-Betrieb nur eine sehr kurze einmalige Misch-Betriebsphase notwendig war.

Mittels vorhandener Elektronik und Software kann noch einiges Verbesserungspotential aus der Scheitholz-Betriebsphase gewonnen werden. Es bietet sich ein breites, interessantes Forschungsspektrum mit vielen neuen Ansätzen an. Der aktuelle Softwarestand bzw. die Neuentwicklung der Software der thermocontrol II Regelung ermöglicht bereits jetzt ein zuverlässiges und sicheres Kontrollieren der Anlage und ist für einen Serieneinsatz tauglich.

Bei gutem, trockenem Brennmaterial kann mit Hilfe der implementierten Regelung die Brennkammertemperatur auf einen einigermaßen konstanten Niveau gehalten werden. Bei der obigen Grafik ist zusätzlich die Abgastemperatur als grafischer Verlauf über die Zeit ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass der Endwert der Abgastemperatur im Rauchrohr im Scheitholzbetriebsmodus max. 240°C beträgt. Im Pellet- Betrieb wird ein maximaler Endwert von ca. 180°erreicht. Diese Werte entsprechen den üblichen Normen und Kaminvorschriften.

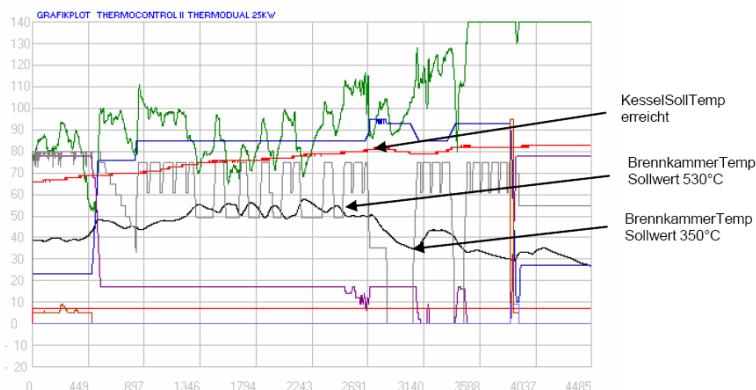
Abb.: Im nachfolgenden Bild ist ein ökonomischer Scheitholzverbrennungsprozess ersichtlic.



Die Ermittlung der Abgastemperatur erfolgt mit Hilfe zusätzlicher Hardware und mit einem k-Typ-Thermoelement, welche bereits jetzt probeweise für Testmessungen installiert wurde.

Die Leistungsregelung im Scheitholzbetrieb ist grundsätzlich von der Temperatur des Kessels abhängig. Ab dem Erreichen der gewünschten Kesselsolltemperatur wird die Brennkammertemperatur gedrosselt. Der Temperaturbereich erstreckt sich dabei bei kleiner Leistung von 350°C bis zur maximal eingestellten Brennkammertemperatur im Scheitholzbetrieb (z.B. 520°C) bei größeren Leistungen. Mit dieser Maßnahme wird gewährleistet, dass überschüssiges Brennmaterial in der Scheitholzbrennkammer ordentlich verbrannt wird, ohne schlechte Emissionswerte und/oder Verteerung und Rußbildung zu erzeugen.

Abb.: In der nachfolgenden Grafik ist diese Temperaturreduktion auf die angestrebte Brennkammer-solltemperatur von 350°C zu erkennen.



Durch die kontinuierliche Energieentnahme aus dem Kessel bzw. durch eine Umschichtung in den Pufferspeicher kann die Kesseltemperatur bei reduzierter Leistung unter den Kesselsollwert sinken. Folglich erhöht sich die Brennkammersolltemperatur wieder auf ein Niveau, welches durch den Leistungsregler vorgegeben wird. Mit dieser Maßnahme wird das restliche Scheitholz in der Brennkammer vollständig abgebrannt und sämtliche Energie in den Pufferspeicher geladen. Dieser Vorgang kann sich mehrmals wiederholen oder vorzeitig abbrechen, wenn z.B. wie in der obigen Grafik ersichtlich,

nicht mehr genügend Brennmaterial in der Brennkammer vorrätig ist und dadurch die Brennkammertemperatur absinkt.

Damit der Benutzer nicht unabsichtlich zu viel Brennmaterial in die Scheitholzbrennkammer einwirft, wird die gesamte erforderliche Wärmemenge berechnet und dem Benutzer als maximal nachfüllbare Scheitholzfüllhöhe, in Prozent umgerechnet, auf dem Display mitgeteilt. In die Berechnung für die maximal erforderliche Wärmemenge werden alle an die Anlage angeschlossenen Energiesenken miteinbezogen.

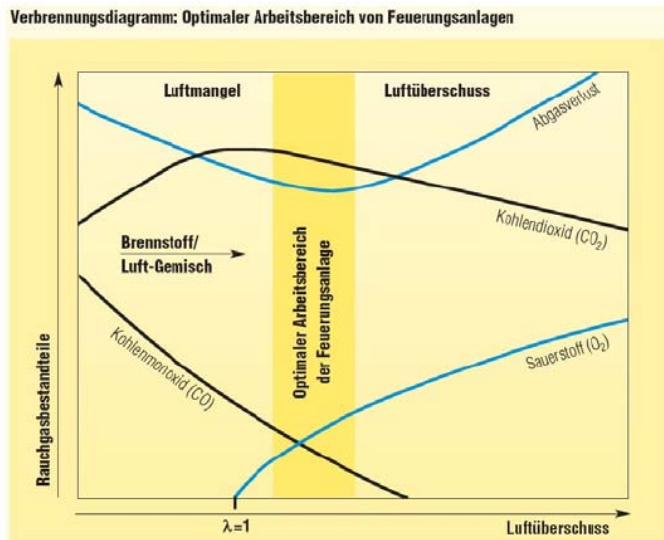
Rauchgasanalyse zur Verbrennungsoptimierung:

Bei der Verbrennung von Holz entsteht im idealen Fall nur Kohlendioxid CO₂, Asche und Wasser. Das entstandene CO₂ trägt zur Erderwärmung nicht wesentlich bei, vorausgesetzt, es wird nur so viel Holz verbrannt, wie nachwächst. Als Begründung für diese Aussage kann man annehmen, dass nachwachsende Bäume und Pflanzen das bei der Verbrennung frei werdende CO₂ wieder binden. Der Brennstoff Holz enthält häufig geringe Mengen an Stickstoff- Schwefel- und Chlorverbindungen. Bei der Verbrennung von Holz können sich schädliche Stickstoffe, Schwefeloxide und Säuren wie z.B. Salzsäure bilden. Zusätzlich entstehen bei der Holzverbrennung Stäube verschiedener Größe und Ruß. Mehr als 90% dieser Stäube werden als Feinstäube eingestuft und stellen für Menschen und Tiere ein hohes Gesundheitsrisiko dar. Bei unvollständigen Verbrennungen entstehen giftiges Kohlenmonoxid CO und organische Verbindungen wie z.B. Krebs erzeugende polyzyklische, aromatische Kohlenwasserstoffe (kurz PAK).

Bei Verbrennungsprozessen mit sehr hohen Temperaturen verbindet sich der aus dem Brennstoff und der aus der Verbrennungsluft stammende Stickstoff anteilmäßig mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft zunächst zu Stickstoffmonoxid NO. Stickstoffmonoxid ist sehr reaktionsfreudig und bei Anwesenheit von Restsauerstoff im Abgasrohr bzw. in der Atmosphäre oxidiert NO sehr leicht zu gefährlichem Stickstoffdioxid NO₂. Beide Oxide sind giftig und NO₂ im speziellen ist ein sehr gefährliches Lungengift. Zur Reduzierung dieser Oxide bzw. zur NO_x – Abgasreinigung werden aufwendige Technologien für mittlere/große Anlagen eingesetzt. Mit besonderen feuerungstechnischen Maßnahmen, z.B. durch gestufte Luftzufuhr (primäre und sekundäre Luftzufuhr stehen in einem bestimmten Verhältnis) können NO_x-Reduktionen im Abgas erreicht werden. Genau hier kann mittels Elektronik bzw. Software bei bestehenden Anlagen eingegriffen werden.

Bei einem Holzverbrennungsprozess ist Sauerstoff von Nöten. Für einen theoretisch vollständigen Abbrand, muss ein entsprechendes Brennstoff/Luftverhältnis vorliegen. Grundsätzlich sollte immer ein Überschuss an Verbrennungsluft ($\lambda > 1$) vorliegen. Dennoch muss sich dieser Luftüberschuss in einem bestimmten Rahmen bewegen. Außerhalb des Rahmens kommt es zu einer Brennkammerabkühlung und/oder zu schlechten, unvollständigen Verbrennungen mit hohen Emissionswerten und hoher Staub-/Rußbildung. Die in der Brennkammer vorliegende Temperatur beeinflusst den Ablauf der chemischen Reaktionen. Die Oxidationsreaktionen laufen bei hohen Temperaturen wesentlich schneller ab. Bei zu hohen Temperaturen können sich vermehrt unerwünschte thermische Stickoxide ab einer

Temperatur von $>1300^{\circ}\text{C}$ bilden. Die Gefahr zu hoher Temperaturen ist beim Abbrand von Holz eher gering oder nur auf Teilbereiche beschränkt. Der Vorteil von hohen Temperaturen in der Brennkammer liegt darin, dass nur geringe Emissionswerte von Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffen zu erwarten sind. Die Einhaltung einer erforderlichen Mindestverweilzeit im Brennraum und die ordentlicher Durchmischung der vorhandenen Luft mit den unverbrannten Gasen des Brennstoffes ist die Basis und die Voraussetzung für gute Verbrennungsreaktionen.



Quelle: TESTO Rauchgasanalysegeräte

Kohlenmonoxidanteile im Abgas und geringe Abgasverluste gleichzeitig vorliegen. In diesem Bereich ist der feuerungstechnische Wirkungsgrad maximal.

Damit optimale Arbeitsbereiche gefunden werden können, ist es wichtig, mittels Rauchgasanalyse die notwendigen Zusammenhänge zu erfassen. Erst dann kann ein sehr umweltfreundlicher und schadstoffarmer Betrieb der Prüfanlage mit bestmöglicher Ausnutzung gewährleistet werden. In dem nebenstehenden Bild ist der Zusammenhang zwischen Luftverhältniszahl λ und den Rauchgasbestandteilen schemenhaft dargestellt. Es gibt einen optimalen Bereich, bei dem sehr niedrige

Das Messen von NOx wird beim korrekten Einstellen moderner vollautomatischer Feuerungsanlagen immer wichtiger. Dies wird von Herstellern zur Einstellung und Abnahme der Anlagen gefordert, zumal das Verkaufsargument „low NOx“ immer größere Bedeutung findet und diesbezüglich auch vom Gesetzgeber zukünftig mit Vorschriften zu rechnen ist.

Bei der bestehenden thermocontrol II Regelung haben die oben beschriebenen Rauchgase vorerst noch keinen Einfluss auf die Stellgrößen im Regelkreis. Damit ein optimierter Verbrennungsprozess mit noch besseren Emissionswerten und geringer Staub- und Russbelastung angestrebt werden kann, ist es notwendig eine kontinuierliche Rauchgasanalyse durchzuführen und sämtliche Ergebnisse der gesamten Verbrennungsanlage auf einem CAN-Bussystem zur Verfügung zu stellen.

Neben der Rauchgasanalyse ist es ebenso von Vorteil, wenn zusätzlich der natürliche/künstliche Kaminzug erfasst werden kann. Dazu eignet sich eine differentielle Druckmessung zwischen dem Druckniveau der Ansaugluft beim Kessel und dem Druck im Inneren des Schornsteins.

Für die kontinuierliche Ermittlung der Energiebilanz einer Feuerungsanlage ist die Erfassung der Abgastemperatur notwendig. Dadurch können die aktuellen Abgasverluste und der momentane Wirkungsgrad der Anlage fortwährend ermittelt werden.

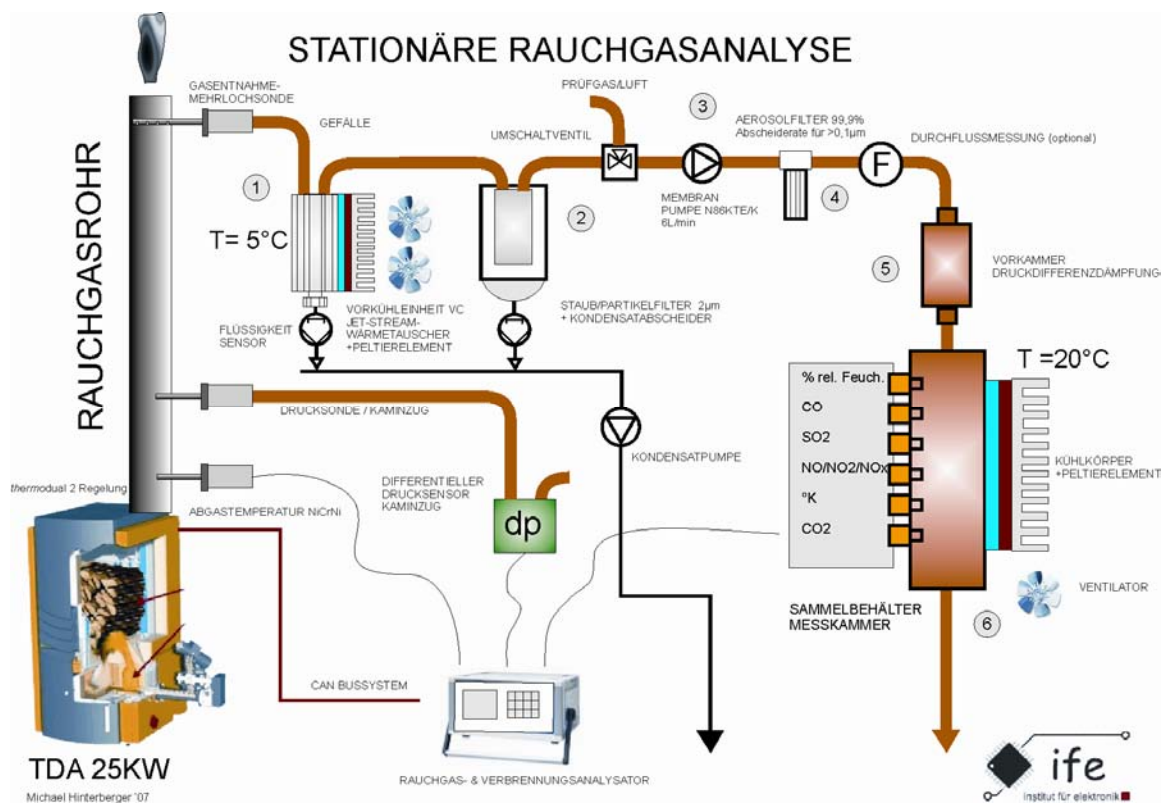
Mit den beschriebenen Größen könnten viele neue Zusammenhänge und mögliche Querverbeeinflussung für den TDA- Kombikessel erforscht werden.

Genau aus diesem Grund wurde die Idee geboren, ein stationäres Rauchgasanalysegerät zu entwickeln, mit dem die gewünschten Anforderungen erfüllt werden können.

Entwicklung eines Rauchgasanlysemessgerätes:

Damit ein umweltfreundliches, schadstoffarmes neues Produkt für den freien Markt entstehen kann, ist es notwendig bei den bestehenden bzw. neu eingeführten ThermoDual- Anlagen mit Hilfe von Elektronik und Software das Maximum an Optimierung herauszuholen, ohne dass dabei sofort konstruktive und fertigungstechnische Veränderungen vorgenommen werden müssen.

Abb.: Im nachfolgenden Bild ist der Prinzipaufbau der geplanten stationären Rauchgasanalysestation zu erkennen. Geplant ist, dass ein Anlysemessgerät an den vorhandenen CAN-Bus angeschlossen werden kann. Dieses Messgerät liefert kontinuierlich sämtliche Daten an den Kessel bzw. an dessen Software.



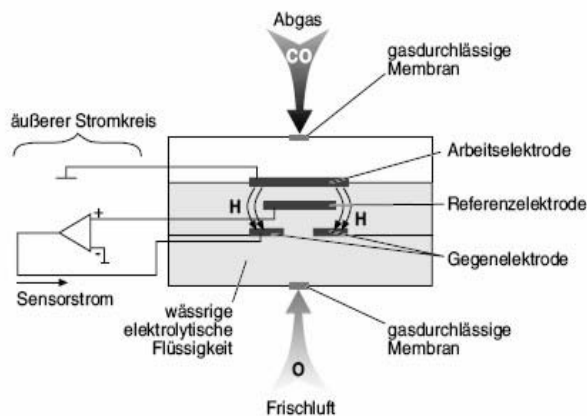
Der Kern dieses Messgerätes wird durch einen 32Bit DSP (Digitaler Signalprozessor) der Firma Texas Instruments gebildet. Damit können sehr leistungsstarke digitale Filter implementiert werden, die für die Sensorauswertungen notwendig sind. Dieser digitale Signalprozessor verfügt über eine in den Mikrochip bereits integrierte Spezialhardware. Unter anderem beinhaltet die Hardware zwei CAN-Bus-Controller, Pulsweitenmodulationseinheiten, einen integrierten 12-Bit Analog/Digital- Umsetzer mit 16 Kanälen, einen I²C Bus, serielle Schnittstellen, synchrone Schnittstellen und viele nützliche Kompo-

zenten. Trotzdem muss für das Mess- und Analysegerät etliches an Elektronik für die Auswertung der Sensoren, die Ansteuerung der Aktoren und für die Regelung der Systemabläufe entwickelt werden.

Angedacht ist, dass ein oder mehrere K-Typ Thermoelemente an dieses Messgerät angeschlossen werden können. Damit können z.B. die Abgastemperatur im Rauchgas oder hohe Temperaturen an beliebigen Stellen mit höchster Präzision gemessen werden. Ebenso werden mit einem differentiellen Präzisionsdrucksensor kleinste Veränderungen im Kaminzug ausgewertet werden können. Analysierte Messgrößen können somit bestimmten Kaminzugverhältnissen zugeordnet werden. Dadurch werden Messgrößen bei Vergleichen aussagekräftiger.

Das Mess- und Analysegerät ist hauptsächlich für die Auswertung der vorhandenen Sensoren und den ordnungsgemäßen Ablauf und die Kontrolle über die oben dargestellte Anordnung verantwortlich. Damit eine Rauchgasanalyse sinnvoll betrieben werden kann, ist es notwendig eine entsprechende Rauchgasaufbereitung zu installieren, damit die hochsensiblen Sensoren keinen Schaden nehmen.

Zur Bestimmung der Konzentrationen toxischer Gase werden sehr oft Elektroden-Sensoren angewendet. Die verwendeten Sensoren basieren auf dem elektro-chemischen Prinzip. Diese Art von Sensoren bietet ein vernünftiges Preis/Leistungsverhältnis. Der Einsatz von optischen Gassensoren ist mit sehr hohen Kosten verbunden. Optische Sensoren verfügen über eine sehr hohe Lebensdauer. Elektrochemischen Sensoren können meist nur 2 bis 3 Jahre eingesetzt werden. Mittlerweile stehen viele elektrochemische Sensoren zur Messung verschiedener Gase und Dämpfe zur Verfügung. Sie besitzen in einem Temperaturbereich von -40°C bis $+65^{\circ}\text{C}$ und zwischen 5% und 95% relativer Luftfeuchte sehr gute Messeigenschaften. Elektrochemische Sensoren fungieren als Messgrößenumsetzer zur Bestimmung der



Konzentration toxischer Gase bzw. des Partialdrucks von Sauerstoff in der Umgebungsluft. Das Messgas diffundiert durch eine hydrophobe, gasdurchlässige Membran in die mit wässrigem Elektrolyt gefüllte Messkammer. Im Elektrolyt befindet sich eine Mess-/Arbeitselektrode, eine Gegen- und eine Referenzelektrode. Eine externe Beschaltung sorgt dafür, dass zwischen Arbeits- und Referenzelektrode eine konstante Spannung (Arbeitspotential) anliegt. Die Gegenelektrode ermöglicht den Stromfluss durch die Messzelle. Das Material der Elektroden, das Arbeitspotential und das Elektrolyt sind so bestimmt, dass das zu ermittelnde Gas an der Arbeitselektrode elektrochemisch umgesetzt wird.

Falls, wie z.B. in der nebenstehenden Grafik dargestellt, CO Moleküle durch die Membran zur Arbeitselektrode hin gelangen, werden durch eine chemische Reaktion H^+ Ionen freigesetzt. Dabei wandern die entstandenen Ionen zur Gegenelektrode. Folglich findet eine weitere chemische Reaktion mit Hilfe von O_2 aus der Frischluft statt und verursacht einen Ladungsträgeraustausch im äußeren Stromkreis. Die Prüfgaskonzentration ist zum resultierenden Sensorstrom direkt proportional. Überhöhte Gaskonzentrationen sowie Wärme, Kälte, Nässe und Schmutz verkürzen die Lebensdauer der

Messzellen. Um den Forderungen nach einer möglichst langen Sensorlebensdauer nachzukommen, müssen die temperaturabhängigen Elektrodenprozesse weitestgehend kompensiert werden. Eine Möglichkeit die Temperaturabhängigkeit weitestgehend zu minimieren ist die aktive Regelung der Sensorumgebungstemperatur auf einen Normwert. Elektrochemische Sensoren mit einer wässrigen elektrolytischen Flüssigkeit stehen mit der umgebenden Luftfeuchtigkeit in einem reversiblen Gleichgewicht. Bei einem Anstieg der Luftfeuchtigkeit im inneren des Sensors wird Wasser aufgenommen und das Elektrolytvolumen vergrößert sich dabei. Bei sinkender Feuchte tritt der umgekehrte Effekt ein. Die Veränderung des Elektrolytvolumens kann sich auf das resultierende Messergebnis negativ auswirken und stellt somit erhebliche Anforderungen an den Aufbau eines Gassensors.

Bei einem Anstieg des Volumens oder durch enorme Erwärmung im inneren des Gassensors kommt es zwangsläufig zu einer Erhöhung des Druckes. Kann der entstehenden Überdruck nicht entweichen, kommt es zur Schädigung oder gar zur Zerstörung des Sensors. Diese Effekte können weitestgehend mit einer klimatisierten Messkammer behoben werden. Verunreinigungen, Stäube und Salze im Prüf-gas können auch sehr schnell dazu beitragen, dass die Lebensdauer einer Messzelle verkürzt wird. Gelangen feinste Fremdstoffe oder Salze in die wässrige, elektrolytische Flüssigkeit, so besteht die Möglichkeit, dass zusätzliche Reaktionen ablaufen und dadurch das Messergebnis unbrauchbar oder verfälscht wird. Aus diesem Grund ist dafür zu sorgen, dass eine ordentliche Prüfgasaufbereitung vor der eigentlichen Auswertung der Messzellen erfolgt.

Die in der schemenhaft dargestellten Prinzipübersicht des stationären Rauchgasanalysegeräts dargestellten Komponenten sollen eine ordnungsgemäße Prüfgasaufbereitung garantieren. Nachdem das Abgas im Rauchgasrohr bei einem ThermoDual- Kessel in der Größenordnung von 200-250°C liegt, wie bereits vorher schon berichtet, muss dafür gesorgt werden, dass eine Abkühlung des Prüfgases auf Temperaturbereiche erfolgt, bei denen die elektrochemischen Sensoren sinnvoll arbeiten können. Mit Hilfe eines temperaturgeregelten Peltiergaskühler (1) wird das heiße Rauchgas auf eine Temperatur von 5°C abgekühlt. Wichtig dabei ist, dass die Taupunkttemperatur der Gase berücksichtigt wird. Der Taupunkt eines Gases liegt bei der Temperatur, bei welcher die in dem Gas enthaltene Feuchte aus dem gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand übergeht. Dieser Vorgang wird in der Literatur auch als Kondensation und die dabei entstandene Flüssigkeit als Kondensat bezeichnet. In kurze Worte gefasst kann man sagen, dass unterhalb des Taupunktes die Feuchte in flüssigem und oberhalb des Taupunktes in gasförmigen Zustand vorliegt. Genau diese Tatsache wird hier mit dem entwickelten Peltiergaskühler in die Praxis umgesetzt.

In der nebenstehenden Tabelle ist ersichtlich, warum es sinnvoll ist, die heiße Abgastemperatur auf mindestens 5°C zu kühlen. Der Grund dafür ist, dass bei einer Gastemperatur von 5°C die abscheidbare Kondensatmenge bei 0,0ml/h liegt. Diese Werte beziehen sich auf einen normierten Gasdurchfluss von 100l/h. Durch diese Rauchgasvorkühleinheit ist es nicht wirklich notwendig, sensible, beheizte Schläuche oder dergleichen zwischen dem Rauchgasrohr und der Kondensatabscheidung vorzuschalten.

Abb.: Tabelle der drucklosen 100% H₂O Sättigung von Gasen

Abb.: Gaskühler

Tabelle der drucklosen 100% H₂O-Sättigung von Gasen bei Temperaturen von -100 °C bis +90 °C mit Angabe von H₂O-Taupunkt, H₂O-Vol. %-Anteil und H₂O-Gewichtsanteil per m³ Gas.

°C	Vol. %	g/m ³	°C	Vol. %	g/m ³	ml/h*
H ₂ O Taupunkt	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O Taupunkt	H ₂ O	H ₂ O	Kondensatmenge
-100	0,0000138	0,000111	0	0,682	2,34	
-90	0,0000265	0,000217	+1	0,649	2,21	
-80	0,0000540	0,000434	+2	0,616	2,08	
-70	0,000107	0,000867	+3	0,583	1,95	
-60	0,000214	0,001734	+4	0,550	1,82	
-55	0,00207	0,0186	+5	0,861	3,01	= 0,0
-50	0,00398	0,0312	+6	0,922	3,21	
-48	0,00496	0,0396	+7	0,988	3,44	
-46	0,00631	0,0507	+8	1,06	3,61	
-44	0,00800	0,0642	+9	1,13	3,78	
-42	0,0102	0,0816	+10	1,21	3,94	= 0,3
-40	0,0127	0,102	+11	1,29	4,09	
-38	0,0159	0,127	+12	1,38	4,24	
-36	0,0198	0,159	+13	1,48	4,40	
-34	0,0248	0,197	+14	1,58	4,56	
-32	0,0304	0,244	+15	1,68	4,72	
-30	0,0375	0,301	+16	1,79	4,88	
-28	0,0461	0,371	+17	1,91	5,04	
-26	0,0565	0,454	+18	2,04	5,20	
-24	0,0690	0,554	+19	2,17	5,36	
-22	0,0840	0,675	+20	2,31	5,52	= 1,2
-20	0,102	0,816	+21	2,46	5,68	
-19	0,112	0,899	+22	2,61	5,84	
-18	0,123	0,989	+23	2,77	6,00	
-17	0,135	1,09	+24	2,94	6,16	
-16	0,148	1,19	+25	3,13	6,32	= 1,9
-15	0,163	1,31	+26	3,32	6,48	
-14	0,179	1,43	+27	3,52	6,64	
-13	0,196	1,57	+28	3,73	6,80	
-12	0,214	1,72	+29	3,95	6,96	
-11	0,234	1,88	+30	4,19	7,12	= 2,8
-10	0,256	2,06	+35	5,55	9,40	= 4,0
-9	0,280	2,25	+40	7,28	12,50	= 5,6
-8	0,305	2,45	+45	9,45	16,30	= 7,7
-7	0,333	2,68	+50	12,20	21,00	= 10,5
-6	0,363	2,92	+55	15,50	26,50	= 14,1
-5	0,396	3,18	+60	19,70	33,50	= 19,0
-4	0,431	3,46	+70	30,70	50,00	= 34,8
-3	0,469	3,77	+80	46,70	70,00	= 59,0
-2	0,510	4,10	+90	69,20	100,00	= 89,0
-1	0,555	4,48				

* Kondensatmenge bei 100 ml/h Gasfluss und Taupunkt auf +5 °C gesenkt.

Quelle: M&C Products Analysetechnik GmbH



Der Gaskühler besteht aus einer aktiv temperaturregerten Vorkühleinheit zur Kondensatabscheidung für stark wasserdampfgesättigten Gase (siehe linkes Bild). Wie bereits schon berichtet, entsteht bei der Verbrennung von Holz als Verbrennungsprodukt unter anderem Wasser (H₂O).

Das aktive Kühlelement ist ein Peltierelement mit einer Leistung von ca. 40-60 Watt. Die Ansteuerung bzw. die Regelung der Temperatur übernimmt das in kürze fertig entwickelte Mess- und Analysegerät. Dabei wird über den Stromfluss im Peltierelement auf die gewünschte Temperatur von +5°C geregelt.

Ein Peltierelement kann abhängig vom Stromfluss eine Temperaturdifferenz oder bei einer Temperaturdifferenz einen Stromfluss erzeugen.

Auf diese Weise kann eine Heizung oder ein Kühler abhängig von der Stromrichtung realisiert werden. In unserem Fall dient das Element hauptsächlich als Kühler. Damit eine Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsraumluft und dem inneren des Gaskühlers aufgebaut werden kann, muss die durch den Stromfluss erzeugte Wärme mit Hilfe des integrierten Kühlkörpers und eines oder mehrerer Ventilatoren abgeführt werden. Das abgeschiedene Kondensat wird in einem Auffangbehälter gesammelt. Optional könnte mit Hilfe einer angesteuerten Pumpe entstandenes Kondensat abgepumpt werden. Die im rechten mittleren Bild dargestellte Anordnung zeigt, wie so ein aktiver Peltiergaskühler aussehen könnte.

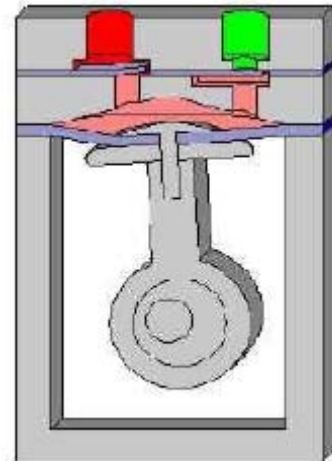




Nachdem das zu analysierende Rauchgas getrocknet und abgekühlt wurde müssen die auftretenden Feststoffverunreinigungen, insbesondere Partikel mit hoher Feinheit und Tiefenwirkung sicher abgetrennt werden. Dazu wird ein universeller Staub- und Partikelfeinfiler (2) verwendet. Bei diesen Feinfiltern (Filterfeinheit: $2\mu\text{m}$) kann entstandenes Kondensat abgetrennt werden. An dieser Stelle im Messpfad sollte eigentlich kein Kondensat mehr auftreten.

Damit aus dem Rauchgasrohr kontinuierlich Prüfgas entnommen werden kann, muss mit Hilfe einer speziellen Membranpumpe der notwendige Unterdruck erzeugt werden.

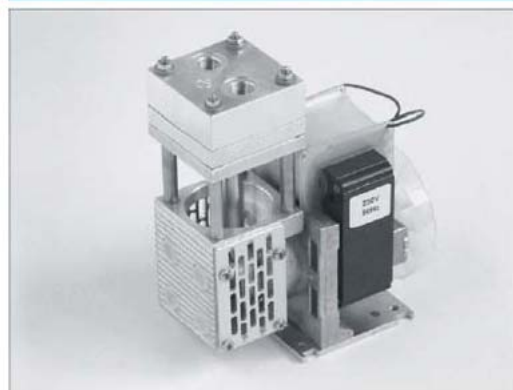
Die temperaturbeständige Membran-Gasförderpumpe basiert auf einem einfachen Prinzip: Eine elastische, an ihrem Rand geklemmte Membran wird in ihrem Zentrum durch einen Exzenter auf und ab bewegt. Auf diese Weise wird das Medium über selbsttätige Ventile gefördert. Der Förderraum ist vom Pumpenantrieb durch die Membrane hermetisch getrennt. Deshalb fördern Membranpumpen die Medien völlig unverfälscht, bleiben weitestgehend wartungsfrei und eignen sich damit hervorragend für Rauchgasanalysegeräte. Die ausgewählte Pumpe (3) verfügt über ein Fördervolumen von $6\text{l}/\text{min}$. Sollte diese Fördermenge für eine kontinuierliche Rauchgasanalyse die Sensoren überfordern, weil z.B. manche Gassensoren längere Ansprechzeiten haben, so kann mittels einer Bypass-Leitung zum eigentlichen Analysekanal die Förderleistung fast beliebig reduziert werden. Bei einer Bypass-Anordnung muss die Pumpe allerdings nach der Messkammer angeordnet werden.



Damit die durch die Membranpumpe erzeugten Druckschwankungen gedämpft werden, empfiehlt es sich, vor der Messkammer eine oder mehrere Vorkammern (5) anzubringen und so einen homogenen Gasfluss durch die Messkammer zu gewährleisten. Die Membranpumpe wird vom Mess- und Analysegerät angesteuert.

Bevor das angesaugte, gereinigte Prüfgas in die gentliche Messkammer eingeleitet wird, sollte zuvor ein Aerosolfilter (4) für die Abscheidung feinsten Flüssigkeitströpfchen eingebunden werden. Das Filter separiert Aerosole, die möglicherweise den Peltiergaskühler und den Vorfilter passieren. Zur Erhöhung der Anlagensicherheit gibt es Filtervarianten mit hydrophober Schutzmembrane. Der Hersteller des Filters garantiert eine Abscheiderate von $99,9999\%$ für Partikel mit einem Durchmesser $> 0,1\mu\text{m}$.

TEMPERATURBESTÄNDIGE MINI-MEMBRAN-GASFÖRDERPUMPEN



N 86 ST.16 E



Optional könnte in den Rauchgaspfad ein Durchflussmesser zur exakten Ermittlung des Rauchgasdurchsatzes integriert werden.

Die eigentliche Messkammer (6) ist mit elektrochemischen Gassensoren bestückt. Es ist wichtig, dass die Messkammer und die innen liegenden Sensoren klimatisiert werden. Unnötige Quereinflussungen bzw. vorzeitige Alterungen der Gassensoren sind folglich ausgeschlossen. Die Messkammer wird aus zwei Aluminium-Halbschalen gefräst. Damit es zu keiner chemischen Reaktion oder Korrosion in der Messkammer zwischen Rauchgaskomponenten und dem Aluminium kommen kann, ist vorgesehen, dass die Messkammer be-

schichtet wird. Für die aktive Klimaregelung sorgt ein Peltierelement. Die Temperatur in der Messkammer wird vorerst einmal auf 20°C aufgewärmt. Die vorhandenen Gassensoren haben somit immer die gleichen Messbedingungen vorliegen. Die Temperaturregelung wird vom Mess- bzw. Analysegerät übernommen. In der Messkammer werden zusätzlich noch ein Luftfeuchtigkeitssensor und ein weiterer differentieller Drucksensor integriert. Für die aktive Temperaturregelung der Messkammer mittels Peltierelement werden Temperatursensoren zur Überwachung angebracht. Mit den vorhandenen Sensoren können gleichzeitig der Messablauf und die Klimabedingungen in der Messkammer kontrolliert werden.



Für die eigentliche Rauchgasanalyse werden „high quality“ elektrochemische Sensoren der Schweizer Firma Membrapor AG verwendet. Die Produktpalette des Herstellers umfasst viele Gassensoren, welche sich hervorragend für eine Rauchgasanalyse eignen.

In der ersten Ausbaustufe sind folgende Sensoren für die Rauchgasanalyse vorgesehen:

Rauchgas	Konzentrationsbereich [ppm]	Typenbezeichnung
CO	0-4000	CO/SF-4000-S
SO ₂	0-2000	SO2/SF-2000-S
NO	0-2000	NO/SF-2000-S
NO ₂	0-500	NO2/S-500-S
CO ₂	0-10000	(optional)

Der vorgestellte Rauchgas- und Verbrennungsanalysator ist für einen kontinuierlichen Analysebetrieb vorgesehen. Damit können über Stunden bzw. Tage hinweg Aufzeichnungen gemacht werden. Vorerst können noch keine Rauchgasauswertungsergebnisse vorlegt werden, da dieses Messgerät erst fertig entwickelt und getestet werden muss. Der große Vorteil dieses Messgerätes liegt darin, dass durch die modulare und diskrete Bauweise sehr einfach zusätzliche Sensoren hinzugefügt werden können. Messgeräte dieser Kategorie sind auf dem Markt nicht oder nur schwer erhältlich und wenn doch, dann meist sehr teuer und unerschwinglich. Bei vielen auf dem freien Markt erhältlichen Rauchgasanalysegeräten ist es oft schwierig, analysierte Gaskonzentrationen kontinuierlich auf ein

Bussystem zu schreiben und es ist fast unmöglich oder sehr teuer, beliebige Zusatzsensoren oder Erweiterungen anzuschließen.

Diese Tatsache ist der Grund für die Entwicklung eines maßgeschneiderten Prüfanalysators mit CAN-Bus Anbindung zur Auswertung bzw. zur aktiven Beeinflussung des aktuellen Verbrennungsprozesses. Damit lässt sich bei der aktuellen thermocontrol II Regelung eine adaptive Regelstruktur aufbauen. Die Feinoptimierung eines schadstoffarmen, umweltfreundlichen Verbrennungsprozesses und eine Steigerung des Anlagenwirkungsgrades könnten durch Auswertung der Analysedaten auf diese Weise möglich werden.

Unter Umständen können neue, noch nicht bekannte Zusammenhänge und Querverbindungen erarbeitet werden. Aus den erforschten Resultaten könnten Standardanlagen ohne zusätzlich installierte Rauchgasanalytik profitieren und einen neuen Markt erschließen.

Selbst bei der Verbrennungserforschung alternativer Brennstoffe, könnte das entwickelte Mess- und Analysegerätes gute Dienste für weitere Neuentwicklungen leisten.

5) Detailangaben zu den Zielen der „ESdZ“

Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“

Das Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung einer neuen Technologie zur Verbrennungsoptimierung bei thermischen Vergasungsprozessen von Holzheizungen (erneuerbare Energie), um die variablen Energieanforderungen besser zu erfüllen und gleichzeitig die Feinstaubbelastungen zu reduzieren. Dabei wurde auf die gerade bei Holz auftretenden Art- (Scheitholz, Pellets) und Qualitätsschwankungen (Feuchte, Geometrie, Zusammensetzung etc.) eingegangen und ein Regelkonzept entwickelt, das diese Schwankungen impliziert. Die bisherigen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass das erarbeitete Regelkonzept weitläufig (auch für andere Hersteller, andere feste Brennstoffe wie z.B. Getreide etc.) eingesetzt werden kann.

Das bedeutet, dass das Ziel des Projektes eine **nachhaltige Innovationsstrategie** (Innovationsprung, Steigerung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit) für das Unternehmen und für den Stand der Technik im Allgemeinen bedeutet.

Das Projekt wird aufgrund seines **hohen wissenschaftlichen Charakters** in Zusammenarbeit mit der TU-Graz im Rahmen einer Dissertation durchgeführt.

Eine Anhebung des technologischen Standards durch dieses intelligente, Aktoren unterstützte Regelkonzept sichert die internationale Berechtigung für Biomasseheizungen als Hauptheizung im Kleinleistungsbereich ab und **fördert so ein ungehindertes weiteres Marktwachstum**.

Das wirkt sich wiederum weiter **positiv auf die CO₂-Bilanz** (Nachhaltigkeit, ökologische Vorteile) aus und stärkt die makroökonomischen Vorteile von Holzheizsystemen (It. Reg.Energie Stmk. haben Biomasseheizungen ein 15-fach höheres Potential zur Schaffung neuer Arbeitsplätze als Fossilenergieheizungen).

Einbeziehung von Zielgruppen

Die Zielgruppen des Projektes sind der Gesetzgeber (Bund, Land, EU) einerseits, welcher die künftigen Anforderungen an moderne Heizsysteme festlegt und dabei die mittelfristige Optimierung von Systemen aus ökologischer Sicht ins Auge fasst, sowie andererseits die konzessionierten Heizungs-techniker bzw. die Konsumenten selbst, die an einer umweltfreundlichen und technisch einwandfreien Nutzung interessiert sind.

- Gesetzgeber: Der Gesetzgeber liefert durch Normen und Gesetze die Grundlagen und quantitativen Ziele des Projektes (z.B. EN 303-5, Luftreinhalteverordnungen, Heizungsanlagenverordnung). Mit der neuen Technologie könnten die Emissionsgrenzwert noch weiter gesenkt werden, was die Qualität der Heizgeräte im Allgemeinen steigert und die Abgasemissionen und damit die Folgekosten senken hilft.

- Heizungstechniker: Die neue Technologie unterstützt den Heizungsbauer derart, dass in Zukunft Fehleranalysen online direkt vom Hersteller gemacht werden können. Fehlerbehebungen sind damit schneller und sicherer.
- Konsument: Die höhere Stabilität durch die permanente Parameteranpassung und die selbstoptimierende Verbrennungsregelung bringen dem Kunden nicht nur Funktionsvorteile, sondern helfen ihm auch, Geld zu sparen (höherer Wirkungsgrad heißt geringerer Brennstoffverbrauch)

Nutzen für Zielgruppen

- Gesetzgeber: Der Gesetzgeber erzielt einen gesamtökologischen Vorteil durch die verbreitete und verbesserte Nutzung von Biomasse durch eine erhöhte CO₂-Reduktion (Kyoto-Ziel). Die Reduzierung der Feinstaubbelastung führt ebenso zu ökologischen und ökonomischen Nutzen (z.B. Folgekostenreduktion durch Senkung der Gesundheitsbelastung). Ein weiterer Vorteil wird durch die großen makro-ökonomischen Vorteile (Arbeitsplatzschaffung, erhöhte inländische Wertschöpfung, Erhöhung der Unabhängigkeit von knappen Ressourcen aus dem Ausland) durch die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Biomasseheizungen erzielt.
- Heizungstechniker: Attraktive Heizungsgeräte sichern den Absatz des Fachhändlers. Ein Heizungstechniker, der sich mit moderner Technologie auseinandersetzt und diese anbietet, kann seine Kompetenz beim Kunden zeigen und somit seine Wettbewerbsfähigkeit steigern. Die Online Unterstützung bei Fehleranalysen durch den Hersteller helfen Zeit zu sparen.
- Konsument: Durch die Senkung der Feinstaubbelastung erhöht sich die Lebensqualität für den Konsumenten (gesundheitliches Gefahrenpotential durch Immission reduziert sich). Gleichzeitig kann die Dauerkfunktion und die Verbrennungsqualität der Geräte erhöht werden, was den Komfort erhöht und den Brennstoffverbrauch senkt, d.h. der Konsument hat einen qualitativ und quantitativ messbaren Nutzen.

Impulse für die Entwicklung marktfähiger Technologien

- Das Projekt bildet die Basis für die weitere Umsetzung in praxistauglichen Geräten. Das Projekt wurde gestartet mit dem obligatorischen Ansinnen, die Ergebnisse anschließend wirtschaftlich in den eigenen Produkten (siehe TDA Kombikessel oder PN Pelletskessel oder andere) zu verwenden. Der Auftraggeber verfügt über ein internationales Vertriebsnetzwerk (Europa und Übersee) und über geeignete Partnerfirmen (z.T. Mitbewerber), die eine Vermarktung sicher stellen. Durch die offensichtliche Eignung auch für Mitbewerberprodukte, ist eine Markterweiterung sinnvoll möglich.
- Die Feinstaubdiskussion (Feinstaubproblematik) wird vor allem von der starken Öllobby forciert, welche der Biomasse in diesem Bereich mangelnde Qualität bei bestehenden Geräten vorwirft. Daher ist eine positive und dynamische Umsetzung von F&E Ergebnissen in diesem Bereich von allergrößter Bedeutung für die gesamte Biomassebranche.

- Durch die bisher positiven Ergebnisse soll die Anwendbarkeit der neuen, adaptiven Technologie auch auf andere, regenerative Brennstoffe (z.B. schnellwachsende Gräser, Heu, Oliven-/Kirschkerne ...) überprüft werden. Diese Brennstoffe spielen vor allem in den südlichen Regionen eine große Rolle.

Potential für Demonstrationsvorhaben

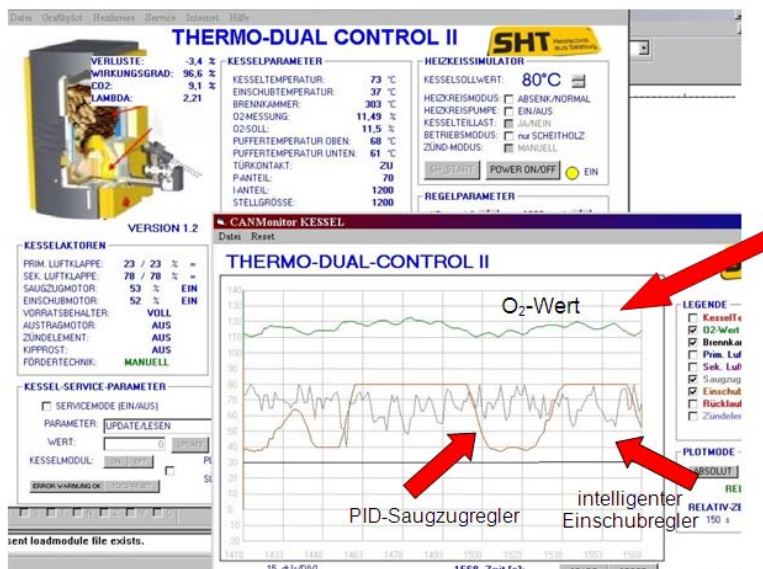
- Die theoretischen und labortechnischen Ergebnisse im Rahmen der Dissertation an der TU-Graz durch Herrn DDI Hinterberger und dessen betreuenden Professor DI Dr. Eichberger werden fließend in einem Umsetzungsprojekt in Pilotgeräte eingearbeitet
- Im eigenen Labor werden diese Ergebnisse in vielen Dauer- und Spitzenlasttests auf Richtigkeit und Anwendbarkeit untersucht und optimiert.
- Weiters werden Demonstrationsanlagen (Prototypen) erstellt und im Praxis-Feldversuch bei ausgewählten Kunden unter Praxisbedingungen eingesetzt. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen bilden wiederum die Basis für die weitere Optimierung der Aktoren unterstützten, adaptiven Regelungstechnik.

6) Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

- Ausgehend von einem bestehenden Heizgerät der Firma SHT (thermodual TDA – Kombiheizgerät für Pellets und Scheitholz) und dem dazu gehörenden Regelungssystem (thermocontrol I; kurz TC I) wurden die theoretischen Betrachtungen des neu zu entwickelnden Logikmodells in eine neue Hardware und Software implementiert (thermocontrol II; kurz: TC II) und mit Hilfe von weiteren Feldtestversuchen auf Funktion und Konsistenz mit den theoretischen Ergebnissen überprüft und weiter optimiert.
- Die Ergebnisse konnten soweit optimiert werden, dass die bisher verwendete Basisregelung ersetzt werden könnte. Die dauerhafte Stabilität der Verbrennungsoptimierungslogik muss in weiteren Labortests noch weiter untersucht werden.
- Durch den modularen Aufbau mittels eines CAN-Bussystems (CANOpen Netzwerk) ermöglicht die neue Regelung eine Vielzahl an zusätzlichen Möglichkeiten. Es können bis zu acht Module an das CAN-Bussystem beliebig angeschlossen und wieder entfernt werden. Dabei können z.B. mehrere Heizkreisplatinen von einem zentralen Sternpunkt (Modul Bedienboard) aus kontrolliert werden. Durch die flexible Anordnung könnte eventuell auch eine Kesselkaskade betrieben werden.
- Die TC II Regelung zeichnet sich durch die flexible Handhabung und Variation der Sprachen aus. Es können beliebige Sprachen auf sehr bequeme Art und Weise implementiert werden. Dadurch erweitert sich das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten für die TC II Regelung über sämtliche Ländergrenzen hinweg.
- Ein besonders wichtiges neues Feature ist das intelligente Fehlermanagementsystem. Das betriebssichere Verhalten der Anlage ist ein sehr wichtiges Anliegen und deshalb wurde sehr viel Zeit in die Entwicklung eines ausgeklügelten Fehlererkennungs- und Fehlerbehebungssystems gesteckt. Das Produkt dieser Entwicklung ermöglicht dem Kunden ein stabiles, betriebssicheres Verhalten der Anlage in sämtlichen Extremsituationen. Durch das intelligente Fehlermanagement werden nur die Teile der Anlage abgeschaltet, welche einen Fehler verursacht haben. Diese Tatsache garantiert dem Kunden keinen Totalausfall der Anlage. D.h. der Kessel kann weiterhin noch bis zum Eintreffen des Kundendiensttechnikers vom Kunden betrieben werden. Selbst wenn der Brennkammerfühler des Kessels ausfällt, wird mittels „Notprogramm“ versucht, die Scheitholzbrennkammer bzw. die Pelletsbrennkammer vollständig und ohne Gefährdung auszubrennen.
- Ein weiterer großer Vorteil der neuen Anlage ist das intelligente Verhalten nach einem Stromausfall. Sämtliche Module gelangen wieder in den ursprünglichen Zustand bzw. streben diesen wieder an. Konkret heißt das, dass z.B. bei einem kurzen Totalausfall der Stromversorgung (in den meisten Fällen < 5min) sich die Anlage nach kurzer Zeit wieder im ursprünglichen Zustand befindet. Selbst wenn der Kunde nichts vom Stromausfall mitbekommt, garantiert der Kessel bzw. die ganze Anlage züversichtliches Verhalten.

- Bei der Softwareentwicklung der TC II ist besonders viel Wert auf die Vermeidung einer Pelletsbrennkammerüberfüllung gelegt worden. Aus diesem Grund wurden viele intelligente Algorithmen implementiert, welche ein Überfüllen der Pelletsbrennkammer sehr unwahrscheinlich machen. Einerseits erfolgt eine ständige Überwachung des Restsauerstoffgehaltes in der Brennkammer und bei einer geringen Abweichung werden sofort entsprechende Maßnahmen gesetzt. Dazu gehört ein intelligenter Regler für den Pelletseinschubkanal bzw. ein PID-Regler für den Saugzugmotors. Durch diese Maßnahmen erfolgt gleichzeitig eine sehr gute Verbrennung in der Pelletsbrennkammer. Dies hat wiederum den Vorteil, dass sehr wenig Schadstoffe und Feinstäube gebildet werden. Selbst die Auswirkung auf die produzierte Asche ist enorm. Es können fast keine Rückstände mehr festgestellt werden und dies reduziert die Anzahl der Wartungsintervalle durch den Kunden.
- Andererseits wird im Falle, dass die Pelletsbrennkammer zu verstopfen droht, mittels intelligenter Algorithmen versucht, den Überschuss an Pellets auszubrennen. Die Praxis hat gezeigt, dass dieser Fall sehr unwahrscheinlich ist, weil durch die vorher schon beschriebenen intelligenten Algorithmen eine Überfüllung der Pelletsbrennkammer weitestgehend vermieden wird.
- Sollten sich Förderlücken im Pelletseinschubkanal befinden, werden diese sofort durch den intelligenten Einschubregler kompensiert bzw. wird dafür gesorgt, dass diese Lücken ehest möglich behoben werden.
- Die Brennkammertemperatur wird neben dem Restsauerstoff im Abgas ebenfalls ständig kontrolliert und beim Unterschreiten einer dynamisch angepassten Schwelle wird wieder durch einen intelligenten Algorithmus das kontinuierliche Absinken der Brennkammertemperatur unterbunden.
- Durch diese intelligenten Algorithmen bzw. Regler ist es jetzt schon gelungen, die Verbrennung in den optimalen Bereich zu bringen. Im nachfolgenden Bild ist der Verlauf des Restsauerstoffgehaltes im Abgas dargestellt.

Abb.: Verlauf Restsauerstoffgehalt



- Besonders auffallend ist der mittlerweile resultierende sehr enge Bereich, indem sich der O₂-Gehalt befindet. Die Forschung in diesem Bereich befindet sich gerade erst am Anfang, aber selbst durch die ersten Versuchsmaßnahmen konnten deutliche Verbesserungen gegenüber dem Stand der Technik festgestellt werden.

Die bislang äußerst positiven Ergebnisse lassen weiterhin die Erwartung zu, dass dieses neue Regelsystem nicht nur für ein Produkt, sondern auch für markenfremde Produkte einfach einsetzbar sein würde. Damit könnten auch Heizkessel fremder Hersteller optimal geregelt werden, was sich positiv auf Emissionsverhalten (i.s. Feinstaubproblematik) auswirken würde.

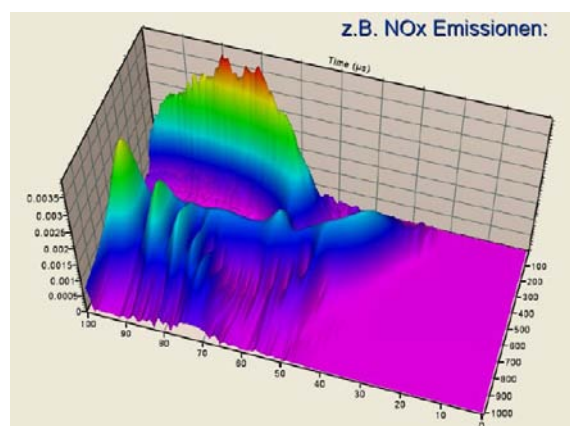
7) Ausblick/Empfehlungen

Die Grundsteine für das Anstreben einer optimalen Verbrennung, weitgehend unabhängig von Brennstoffart und Qualität, sowie Markenphilosophie sind bei der neuen TC II Regelung gelegt worden. Ziel ist es die Regelung so in den Griff zu bekommen, dass sich der Kessel fast ausschließlich in einem sehr guten bzw. optimalen Verbrennungszustand befindet. Damit dies erreicht werden kann, muss ein ständiges Drehen an den Reglerparametern durchgeführt werden. Dies sollte künftig ein adaptiv geführtes Reglersystem übernehmen.

Damit das ganze System auf sämtliche Informationen über den aktuellen Verbrennungszustand des Kessels zugreifen kann, muss ein multifunktionales Schadstoff- und Analysemessgeräte entwickelt werden. Ziel ist es mit diesem Messgerät sämtliche zusätzliche Verbrennungsparameter kontinuierlich zu ermitteln. Der große Vorteil des TC II Konzeptes liegt in der Tatsache, dass durch die modulare Bauweise mittels CAN-Bus, beliebige Komponenten, wie z.B. auch Messgeräte sehr einfach integriert werden können.

Dieses Messgerät wird speziell für die Analyse von Schadstoffen und Verbrennungsparametern im Rahmen der Dissertation am Institut für Elektronik entwickelt und als Prototyp für die kontinuierlichen Verbrennungs- und Schadstoffmessung der TDA Heizanlage verwendet.

Abb.: Mögliches 3D-Wavelet einer TDA - NO_x-Emissionen.

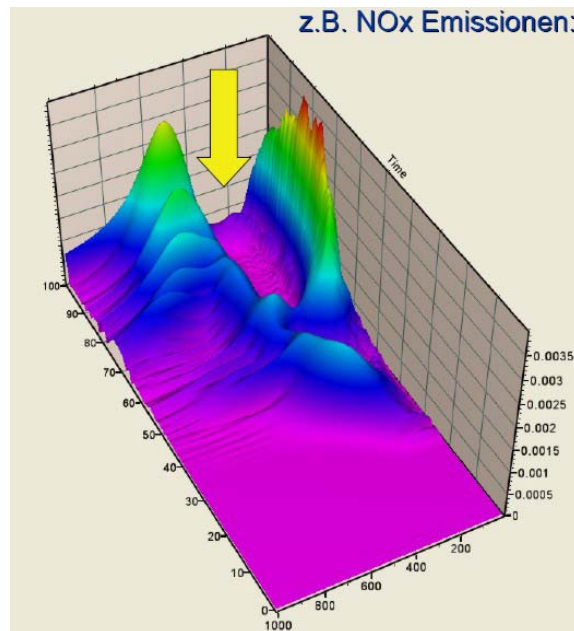


Dadurch besteht auch in Zukunft die Möglichkeit, z.B. eine kontinuierliche NO_x – Analyse durchzuführen und dadurch qualitative Erkenntnisse für die Verbesserung der Verbrennung zu generieren. Mög-

lichweise können dadurch Querbeeinflussungen und Zusammenhänge erkannt werden. Durch das entwickelte Messgerät sollte eventuell ein „Online-Streaming“ der Schadstoffe möglich werden.

In Zusammenarbeit mit dem vorhin schon erwähnten, adaptiven Reglersystem TC II sollte ein Emissionstal gefunden und angestrebt werden.

Abb.: Emissionstal



Das generelle Ziel sollte eine möglichst stabile, saubere und schadstoffarme Verbrennungsreglung sein. Möglichweise könnten damit alternative Brennstoffe wie z.B. alternative Pellets, Energiekorn, Elefantengras usw. schadstoffarm verbrannt werden.

Die Vorteile eines adaptiven Reglersystems sind sehr viel versprechend. Es erfolgt eine ständige Anpassung der Anlage an die aktuellen Gegebenheiten und dadurch erhöht man gleichzeitig den Wirkungsgrad und bewirkt ein schadstoffarmes, stabiles und optimales Verbrennen der Brennstoffe. Selbst bei minderwertigem Brennstoff bzw. Brennstoff schlechterer Qualität wird mit maximalem möglichem Wirkungsgrad verbrannt. Selbst fachkundige Personen können dadurch ohne irgendein Zutun beste Verbrennungsergebnisse und sehr gute Heizergebnisse erzielen.

Durch die zusätzlichen Verbrennungsprozessinformationen können im Hinblick auf die Qualität und Optimierungen der Abbrandvorgänge viele Erkenntnisse gewonnen werden. Aus den gewonnen Informationen sollen entsprechende Diagramme für verschiedene Kesseltypen (z.B. TDA/PN) erstellt bzw. angefertigt werden. Die Anwendung auf Fremdprodukte ist auch zu prüfen, da dies die Marktchancen weiter erhöhen und einen umfassenden Beitrag zur Emissions-, insbesondere Feinstaubminimierung bringen würde.

Modifizierter Zeitplan – offene Arbeiten:

Okt. 07	•Integration der neuen Sensorinformationen (Rauchgasanalysedaten) in den TCII-Regelalgorithmus
	•Messstudien bei Variation der Umweltbedingungen
	•Wirkungsgradverbesserungsanalyse
Dez. 07	•Analyse der Reproduzierbarkeit von Verbrennungsprozessen
	•Wirkungsgrad- und Verbrennungsprozessoptimierung durch einen adaptiven Regelalgorithmus mit Hilfe von Rauchgasanalysedaten
	•Zusammenhang zwischen Verbrennungsprozess und Feinstaubreduktion analysieren
Jan. 07	•Weiterentwicklung eines Schadstoffanalysemessgerät für den 25 KW Prüfkessel
	•Modifikation und Integration der erforschten Erkenntnisse in Serien-Anlagen
März/Mai 08	•Dokumentation
Juni 08	•Projektabschluss

8) Verzeichnisse

Literaturverzeichnis / Abbildungsverzeichnis / Tabellenverzeichnis

Nussbaumer et al, Health relevance of aerosols from biomass combustion in comparison to diesel soot indicated by cytotoxicity tests, in Obernberger (ed.), Brunner (ed.), Aerosols in Biomass Combustion, Graz 2005).

RAINS Model; www.iiasa.ac.at/web-apps/tab/RainsWeb/

Nussbaumer et al, Health relevance of aerosols from biomass combustion in comparison to diesel soot indicated by cytotoxicity tests, in Obernberger (ed.), Brunner (ed.), Aerosols in Biomass Combustion, Graz (2005)

Obernberger, Brunner, Fly ash and aerosol formation in biomass combustion process, in Obernberger (ed.), Brunner (ed.), Aerosols in Biomass Combustion, Graz (2005)

9) Anhang, Kostenrechnung:

PROJEKT: Aktoren unterstützte Verbrennungsregelung

Energiesysteme der Zukunft

1. Jahr	PLANKOSTEN		ISTKOSTEN		% vom Plan	DIFFERENZ	% Delta
	€	12 Monate	€	12 Monate			
Personalaufwand	€	42.500,00	€	50.976,00	119,9%	€ 8.476,00	19,9%
F&E Einrichtungen	€	25.000,00	€	18.120,00	72,5%	-€ 6.880,00	-27,5%
Sonstige Kosten (Dritt)	€	49.500,00	€	40.347,73	81,5%	-€ 9.152,27	-18,5%
Institutskosten TU-Graz	€	68.000,00	€	87.170,00	128,2%	€ 19.170,00	28,2%
GESAMT	€	185.000,00	€	196.613,73	106,3%	€ 11.613,73	6,3%