

Kleinholzfeuerung mit Feststoff- speicher als Alleinheizung

Projekt 24905 Vertrag EF-65547

Ausgearbeitet durch

Peter Rüegg, Heiri Hafner

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Schlussbericht Februar 2002

Forschungs- und P+D-Programm Biomasse	Programme de recherche et p+d Biomasse	Bundesamt für Energie BFE Office fédéral de l'énergie OFEN
--	---	---

Auftraggeber:

Forschungs- und P+D Programm Biomasse des
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Rüegg Cheminée AG
Schwäntenmos 4
8126 Zumikon

Autoren:

Peter Rüegg
Heiri Hafner

Begleitgruppe: -----

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist alleine der/die Autor/in/en verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb:

ENET

Egnacherstrasse 69 · CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55 · Tel. 021 312 05 55 · Fax 071 440 02 56
enet@temas.ch · www.energieforschung.ch · www.energie-schweiz.ch

Zusammenfassung

Die Firma Rüegg Cheminée AG ist seit vielen Jahren als Hersteller von Warmluft-Cheminéeheizinsätzen tätig. Um das wachsende Bedürfnisse der Hafnerbranche betreffend Hypokausten- oder Ganzhausheizungssystemen abzudecken, wurde mit der Produktion von seriell gefertigten Wärmestrahlwänden und dem Zusammenstellen weiterer Komponenten aus dem Lieferprogramm begonnen. Die hohe Anforderung an das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten und die Komplexität der einzelnen Anlagen forderte jedoch eine integrale Systemlösung. Mit Hilfe des Bundesamtes für Energie und dem Institut für angewandte Umwelttechnik – umtec in Rapperswil wurde ein neues Projekt zur „Entwicklung einer Kleinholzfeuerung mit Feststoffspeicher als Alleinheizung“ gestartet.

Ziel des hier vorgestellten Projektes ist die Entwicklung einer im Wohnbereich integrierten Alleinhausheizung für Häuser mit einem Leistungsbedarf von bis zu 8 kW (bei -10°C) mit naturbelassenem Stückholz. Der Wärmeerzeuger soll über ein ansprechendes Sichtfeuer verfügen und das einmal täglich nachgelegte Brennmaterial mit hohem Wirkungsgrad emissionsarm verbrennen. Die anfallende Wärme wird in einen Feststoffspeicher geführt und soll von dort aus bedarfsgerecht an die dezentralen Wohnräume abgegeben werden können. Die Wärmeverteilung erfolgt mit Luft als Medium und wird über Strahlungswände an die Räume abgegeben (Hypokausten-System). Um neben der Bedienerfreundlichkeit auch eine möglichst effiziente Verbrennung zu gewährleisten, wurde ein für das Gesamtsystem geeignetes Regelkonzept entwickelt.

In einem ersten Versuchsaufbau konnten Material und Geometrie der Feuerung definiert werden. Damit wurden zwei weitere Prototypen hergestellt und getestet. Das Speichersystem wurde anhand verschiedener Versuchsaufbauten ausgetestet und optimiert. Zur Überwachung aller Komponenten wurde eine Regelung (SPS) eingesetzt und die entwickelt.

Zum Systemtest wurden alle Komponenten als Gesamtsystem in einem Hausteil im Zürcher Oberland zusammengefügt und als Heizanlage eingesetzt. Die Einheit, bestehend aus Wärmeerzeuger und Speicher, ist zentral im Raum angeordnet. Die Wärmestrahlwände sind an den Innenflächen der Räume angebracht und werden über Luftkanäle mit Wärmeenergie versorgt.

Nach dem Anzünden des Feuers wird nach ca. 5 Minuten bereits 900°C im Sekundärbrennraum erreicht. Dadurch wird die Dauer mit erhöhtem Emissionensausstoss auf ein Minimum begrenzt. Das Heizsystem brennt mit einer Feuerungsleistung zwischen 20 und 40 kW die eingefüllte Holzmenge von max. 50kg ab. Zum Heizen nicht benötigte Energie wird im Feststoffspeicher deponiert.

Vom Speicher kann sehr schnell Wärmeenergie bezogen werden. Durch einen inneren, mit den Rauchgasen in Kontakt stehenden Stahlwärmetauscher wird die vorbeiziehende Hypokaustenluft direkt erwärmt.

Emissionen aus Kohlenmonoxid (CO) können mit der eingesetzten, 2-stufigen Verbrennung auf 50 – 100 ppm reduziert werden. Durch die hohe Effizienz des Steinspeichers konnte die Abgastemperatur unter 100°C gesenkt werden.

Das gesamte System zeigt, dass eine emissionsarme, kontrollierte Verbrennung über mehrere Stunden möglich ist. Dabei genügt eine einmalige Holzaufgabe pro Tag. Nicht direkt verwendete Wärmeenergie wird in einem Speicher abgelegt. Mit den entwickelten Komponenten steht ein seriennahes Produkt zur Verfügung.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Abstract

The Rüegg Company has been producing fire places for many years. In order to adapt to the increased demand by the stove builders regarding heat systems with closed air circuit , it was decided to enhance the product line by mass produced heat radiation walls and related components. For an optimum performance it was deemed necessary to provide an integrated system, cleverly combining these individual components. The development of such a system was the topic of a joint project between umtec an Rüegg. The project was partly funded by the BfE.

The objective of the project was the development of a heating system for the domestic area of single family housing units. The required maximum heating energy was given as 8 kW at –10 C. The heat generator was to be a attractive looking fire to be fed only once daily. The produced heat was to be stored in a storage system to be later dispensed into the domestic area as required. Thermal energy was to be distributed in the form of hot air flowing through "radiating-walls" emitting heat into the respective rooms Besides the heat-generation related hardware an adequate electronic control system needed to be developed.

A first set of experiments was aimed at developing the optimum geometry of the combustion unit as well as appropriate materials. All components were electronically controlled by a central SPS. Afterwards the system was installed in a housing unit near Zürich.

It was shown that under "real life" conditions a temperature of 900C is achieved in the secondary combustion chamber after only 5 min. Combustion progresses with an output of 20-40 kW until the wood storage capacity of 50kg is depleted. Excess heat is stored in a storage system. From this unit the stored heat can be recovered quickly by circulating the air flow for the air channels through this unit. Due to the 2 stage combustion process, CO production was shown to be merely 50-100 ppm .

It was successfully demonstrated that the system can achieve a controlled and clean continuous combustion for many hours. The developed proto-type can be used as a basis for a mass produced commercial unit.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	1
2	Ziel der Arbeit.....	2
2.1	Wärmeerzeuger.....	2
2.2	Wärmespeicher	2
2.3	Regeltechnik.....	3
2.4	P&D – Anlage.....	3
3	Vorgehen.....	4
3.1	Wärmeerzeuger.....	4
3.2	Speicher	5
3.3	Regelung.....	6
3.4	Pilot- und Demonstrationsanlage - Anlage.....	8
4	Grundlagen	8
4.1	Holzverbrennung	8
4.2	Parameter.....	8
4.3	Feuerungsablauf.....	9
4.4	Emissionen aus der Verbrennung.....	9
5	Versuchsaufbau	10
5.1	Systemvarianten.....	10
5.2	Anlagendisposition	13
5.2.1	Standort des Wärmeerzeugers und des Speichers.....	13
5.2.2	Regeltechnisch relevante Anlagendisposition.....	14
5.3	Aufbau des Wärmeerzeugers	15
5.4	Aufbau des Speichers	17
5.4.1	Versuchsaufbau / Versuchsanordnung Speicher I	17
5.4.2	Versuchsaufbau / Versuchsanordnung Speicher II	19
5.4.3	Speicher II mit Anschlüssen an das Hypokausten-System	20
5.5	Regelung.....	21
5.6	Sichtfeuer / Heizfeuer	21
5.7	Sensorik	21
6	Hauptergebnisse.....	24
6.1	Allgemeine Werte	24
6.1.1	Emissionen / Lambda	24
6.1.2	Leistung.....	28
6.1.3	Temperaturen.....	32
6.1.4	Speichersystem.....	35
6.1.5	Anfeuerphase	42
6.1.6	Abbrandverhalten im Heizfeuerfeuer / Regelung	43
6.1.7	Verluste	45
6.2	Komplettanlage im Geer /Steinen	47
7	Offene Probleme / Diskussionen / Ausblick.....	50
7.1	Wärmeerzeuger.....	50
7.1.1	Reduktion der Wärmeverluste	50
7.1.2	Sichtfeuer	50
7.1.3	Serielle Umsetzung	50
7.1.4	Konzeption / Grösse	50
7.1.5	Zugänglichkeit zu den Elementen.....	50
7.1.6	Design	50
7.1.7	Leistungsregelung	51
7.1.8	Variabilität	51
7.1.9	Integration mit anderen Systemen	51
7.2	Speicher / Wärmeverteilung und –Abgabe.....	51

7.2.1	Materialwahl	51
7.2.2	Modularer Aufbau	51
7.2.3	Wärmeabgabe an Medium Luft.....	51
7.2.4	Reinigung	51
7.2.5	Dichtheit	52
7.2.6	Platzbedarf	52
7.2.7	Handhabung / Installation für das Gewerbe	52
7.3	Regelung	52
7.3.1	Kosten	52
7.3.2	Sicherheiten	52
7.3.3	Sensorik	52
7.3.4	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	52
7.3.5	Platzbedarf	52
7.3.6	Kabelführung	53
7.4	Gesamtsystem	53
7.4.1	Kosten	53
7.4.2	Lärm	53
8	Symbolverzeichnis	54
9	Literaturverzeichnis	55
10	Anhang	56
10.1	Berechnungen / Formeln.....	56
10.2	Stellglieder / Sensorik	57
10.2.1	Wärmeerzeuger und Zubehör KLIMAFLAM.....	57
10.2.2	Speichersystem	58
10.2.3	Wärmeverteilsystem Hypokaust	58
10.2.4	Optionale Erweiterungen	59
10.2.5	Regelsystem.....	59
10.3	Zubehör	60
10.4	Bilder	61
10.5	Versuche Wärmeerzeuger Phase I	69
10.6	Versuche Wärmeerzeuger Phase II	74
10.7	Versuche Gesamtsystem	78
10.8	Teilelisten.....	79

1 Ausgangslage

Die Firma Rüegg ist seit Jahrzehnten als Hersteller und Vertreiber von Cheminée- und Kachelofenheizeinsätzen im Markt bekannt. Um ein neues Standbein zu etablieren, wurde nach weiteren Möglichkeiten gesucht, um die Hafnerbranche als Ganzes weiterbringen zu können.

Durch den geringeren Energiebedarf heutiger Wohnhäuser und dem weiterhin ausgeprägten menschlichen Bedürfnis nach Feuer im Wohnbereich kehrte die Realisierbarkeit von Ganzhausheizung mit Kleinholzfeuerungen wieder in die Hafnerbranche zurück. Anfragen von Kunden unterstrichen diese Neuausrichtung.

Als oberstes Credo will Rüegg Cheminée AG das Motto „Mit dem Feuer leben“ wieder neu aufnehmen. Nur durch Einbindung des sichtbaren Feuers wird ein solches Produkt für die Firma Rüegg Cheminée AG eine Chance haben. Das ganze System muss von einem ausgebildeten Hafner eingebaut und gewartet werden können.

Bereits realisierte Warmluft- (Hypokausten-) Anlagen gaben den Ausschlag, dieses interessante Wärmeverteilsystem in die Entwicklung miteinzubeziehen. Hypokausten-Komponenten werden bei der Firma Rüegg Cheminée AG bereits produziert und sind in verschiedenen Variationen erhältlich. Die damit gemachten Kundenerfahrungen sind sehr gut.

Um die Hafnerbranche für Hypokausten-Anlagen zu sensibilisieren, wurden gezielt Seminare über diese Thematik durchgeführt. Nur mit einem motivierten Partner zusammen kann ein solches System überhaupt auf dem Markt bestehen.

Zu Beginn des Projektes wurden verschiedenste Überlegungen zum Inhalt des Projektes gemacht. Dabei haben sich 5 Schlüsselworte als Projektziele herauskristallisiert:

1. Biomassenfeuerung mit Energieträger Holz
2. In den Wohnbereich integrierter Wärmeerzeuger mit Sichtfeuer
3. Wärmespeicherung in Feststoffspeicher
4. Geschlossenes Luftzirkulationssystem und Wärmeabgabe über Strahlungsflächen
5. Alleinheizung für Niedrigenergiehäuser

Aus diesen Schlüsselwörtern ergab sich ein Kurzbeschrieb für das Projekt:

- Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung einer **Alleinhausheizung** für ein Einfamilienhaus im Leistungsbereich von bis zu 8 kW mit dem Energieträger Holz.
- Der neu zu konzipierende **Wärmeerzeuger** soll sich nach dem Motto „Mit dem Feuer leben“ ausrichten, d.h. diese Kleinholzfeuerung soll im Wohnbereich integriert werden und über ein ansprechendes **Sichtfeuer** verfügen. Selbstverständlich soll dieser neue Wärmeerzeuger bezüglich Emissionsreduktion und Wirkungsgrad neue Massstäbe setzen.
- Eine Holzheizung ist aber nur dann mit angemessenem Bedienungskomfort zu betreiben, wenn längere Beschickungsunterbrüche durch eine hohe **Speicherkapazität** überbrückt werden können. Somit ist die Entwicklung eines **Feststoffspeichers** für dieses Projekt von elementarer Bedeutung.
- Die mit dem Wärmeträgermedium Luft in einem geschlossenen Kreislauf konzipierte Ganzhausheizung ermöglicht eine gesunde und behagliche Wärmeübertragung mittels Wärme-

strahlung auf den Menschen (Hypokausten-System). Die Entwicklung des Hypokausten-Systems ist nicht Bestandteil dieses Projektes, es werden aber soweit möglich Erfahrungen aus bisherigen Projekten integriert.

- Um den Bedienerkomfort für den Betreiber möglichst hoch zu halten, ist dieses System von Wärmeerzeuger, Wärmespeicher, Luftverteilung und Wärmeabgabeflächen über eine **Regelung** in seiner Bedienung zu vereinfachen.

Im Winter 97/98 wurde im Rahmen einer Diplomarbeit ein erster Prototyp eines Wärmeerzeugers gebaut und ausgetestet. Damit konnten bereits Erfahrungen bezüglich Material und Verbrennungstechnik gesammelt werden.

Mit den vorhandenen Daten wurde beim Bundesamt für Energie (BfE) ein Antrag zur finanziellen Unterstützung gestellt und bewilligt.

2 Ziel der Arbeit

Die Firma Rüegg Cheminée AG installiert seit einigen Jahren Hypokaustanlagen. Dabei konnten in Zusammenarbeit mit Kunden bereits einige Erfahrungen gewonnen werden. Diese Erfahrungswerte bildeten den Grundstock zum Pflichtenheft.

Weitere Orientierungen gaben einzelne Komponenten anderer Hersteller. In einer Marktanalyse über viele auf dem Markt befindlichen Holzfeuerungsaggregate konnten die Vor- und Nachteile der einzelnen Geräte herauskristallisiert werden.

Die Zielsetzungen an die einzelnen Komponenten im Pflichtenheft wurden wie folgt definiert:

2.1 Wärmeerzeuger

- Konzipiert für Niedrigenergiehaus im Wärmebedarfsbereich von bis zu 8 kW
- Maximal eine Beschickung pro Tag
- Brennraumvolumen 50 kg
- Brenndauer über mehrere Stunden
- Wirkungsgrad Gesamtanlage > 88%
- Komplette Trennung von Wärmeerzeuger und Wärmetauscher
- Vollständige thermische Isolation (keine passive Wärmeabgabe)
- Sichtfeuer (Feuererlebnis im Wohnbereich)
- Verbrennungsregelung mit integrierbarer Zündautomatik

2.2 Wärmespeicher

- Feststoff-Wärmespeicher zur Speicherung des Energiebedarfes für einen Tag in einem Einfamilienhaus
- Modularer Speicheraufbau für Speicherkapazitäten von 40 bis 120 kWh
- Integrierter Rauchgas-Luft-Wärmetauscher
- Integrierter Warmluftventilator
- Integrierte Notheizung
- Isolation des gesamten Speicherkörpers
- Räumliche Trennung von Wärmeerzeuger und Wärmespeicher

2.3 Regeltechnik

- Verbrennungsluftregelung zur Reduktion der Emissionen und zur Steigerung des Bedienerkomfortes
- Lade-/ Entladeregulung des Wärmespeichers
- Raumtemperaturregelung der Wärmeabgabeflächen
- Funktionsregelung der Notheizung
- Dedektion von fehlerhaften Komponentnen und entsprechendes „Krisen“-Management

Während den 3 Jahren dieses Forschungsprojektes wurden teilweise Änderungen vorgenommen, welche aber keine hauptsächlichen Pfeiler des Pflichtenheftes tangieren.

2.4 P&D – Anlage

- Zusammenfügen aller entwickelten Komponenten
- Ausmessen der Anlage unter realen, resp. verbrauchergerechten Bedingungen
- Optimierung der Anlage
- Entwickeln bis zur Serienreife

Grundsätzliches Ziel ist die Optimierung der ganzen Anlage betreffend Wirkungsgrad, Emissionen und Bedienerfreundlichkeit. In der Pilotanlage sind Wärmeerzeuger, Speicher und Wärmestrahlerwände miteinander verbunden und werden als Komplettsystem verbrauchergerecht genutzt.

3 Vorgehen

Die Entwicklung der Komponenten Wärmeerzeuger, Speicher und Regelung erfolgte getrennt voneinander. Erst nach Beendigung der ersten, grundsätzlichen Testversuche und Weiterentwicklungen wurden die Komponenten miteinander installiert und getestet.

Die Gesamtanlage wurde im Rahmen eines P&D – Projektes ausgetestet und in einen seriennahen Zustand gebracht.

Aufgrund der Aufteilung des Gesamtsystems in einzelne Komponenten werden die weiteren Betrachtungen ebenfalls getrennt durchgeführt.

3.1 Wärmeerzeuger

Als Systemlieferant hat sich Rüegg Cheminée AG zur Aufgabe gemacht, sämtliche Komponenten mit der Unterstützung des umtec in Eigenregie zu entwickeln und zu vermarkten. Dass dabei auch Neuland betreten wird, war unumgänglich. Trotzdem konnten schnell gute Fortschritte gemacht und befriedigende Ergebnisse erreicht werden.

Seit Jahren baut Rüegg Cheminée AG zusammen mit dem Hafnergewerbe einzelne Hypokausten-Anlagen. Dabei wurden Wärmeerzeuger, Speicherbausteine, Wärmeverteiler- und –abgabekomponenten aus eigenem bestehendem Sortiment verwendet. Da die Komponenten aber aus der traditionellen Hafnerbranche stammen, wurden oft nicht optimale Kompromisse eingegangen.

Deshalb wurde innerhalb der Firma Rüegg beschlossen, ein neues Projekt zu lancieren.

Der Startschuss wurde mit einer Diplomarbeit im Jahr 1997 gegeben. Darin wurden mit einem neuartigen Wärmeerzeuger Versuche gemacht. Dieses Modell erlaubte bereits eine zweistufige Verbrennung mit getrennter Pyrolyse und Nachverbrennung des Holzes. Zum Einsatz kamen bereits hier nur isolierende Materialien. Mit den damit gewonnenen Daten wurde das eigentliche Hauptprojekt gestartet.

Mit den Basisdaten dieser Arbeit sowie einem anspruchsvollen Pflichtenheft wurde der erste Prototyp des Wärmeerzeugers („WZ I“) gebaut. Damit konnten weitere Erkenntnisse für das inzwischen auf den Namen „Klimaflam“ getaufte Projekt gewonnen werden. Es zeigte sich, dass das Prinzip der zweistufigen Verbrennung grundsätzlich funktioniert.

Probleme bereiteten die zwei Feuerungsmodi: „Heizfeuer“ (leistungsmodulierter Abbrand ohne sichtbare Flammenbildung, Holzvergaserprinzip) und „Sichtfeuer“ (ästhetisch ansprechender Abbrand bei gleicher Leistung, Durchbrand). Während die nicht sichtbare Nachverbrennung im Heizfeuer zur Zufriedenheit funktionierte, gab die Rauchgasführung im Sichtfeuer Probleme auf. Das entstehende Flammenbild entsprach nicht den Vorstellungen vom „heimeligen“ Feuer. Auch wurden in vielen Details neue Ansätze gesucht.

In der zweiten Projektphase (1999) wurden, basierend auf den Erfahrungen des Vorjahres, Lösungen zu folgenden Problemen ausgearbeitet:

- Hoher, unkontrollierter Strahlungsanteil in den Wohnraum während dem Heizfeuer-Betrieb
- Rauchgasaustritt beim Öffnen der Türe im Betrieb
- Pech- und Russablagerungen an der Frontscheibe

- Regelung sämtlicher Komponenten
- Material-Beständigkeit

Die Lösungen dieser Probleme wurden 1999 an einem zweiten Wärmeerzeuger-Prototypen realisiert. Mit diesem neuen Prototypen („WZ II“) wurden von Beginn weg gute Ergebnisse erzielt. Nachträgliche Verbesserungen wurden mehr im Detail ausgeführt, bis der WZ II in einem serien-nahen Zustand war.

3.2 Speicher

Bei der Verbrennung von Holz wird meist mehr Energie freigesetzt, als der momentane Wärmebedarf des Hauses beträgt. Um diesen Überschuss abzapuffern, wurde ein Konzept mit einem Feststoffspeicher entwickelt.

Bei den traditionellen Speicherbauarten im Hafnergewerbe (Kachelofen) werden die heissen Rauchgase an den Schamotteoberflächen vorbeigeleitet und die Wärme dort auch abgegeben. Die so eingespeicherte Energie wird an der äusseren Oberfläche des Speichers kontinuierlich, aber nicht aber immer bedarfsgerecht, abgegeben. Diese traditionelle Speicheraufbau ist oft träge und konzentriert die Wärmeabgabe auf einen oder maximal zwei Räume. Grund genug, sich über einen energieeffizienten und intelligenten Speicheraufbau und dessen Bewirtschaftung Gedanken zu machen.

In einer vorgezogenen Forschungsarbeit wurde eine erste Idee mit zwei parallelen aber getrennt-verlaufenden keramischen Zügen entwickelt und ausgetestet. Die dabei auftretenden Problemstellungen (Abgleich der Züge, Grösse) haben uns aber bewogen, die Idee nochmals zu überdenken und nur mit einem keramischen Zug zu arbeiten. Aufbauend auf diesem Konzept wurden verschiedene Speicheraufbauten getestet.

Als Grundidee zur Speicherbewirtschaftung lag folgender Gedanke vor: Wenn der Wärmeerzeuger im kalten Gebäude gestartet wird, muss möglichst schnell Energie an die Wärmestrahlwände abgegeben werden. Um nicht erst die komplette Speichermasse aufzuheizen, wird mit einem „schnellen Wärmetauscher“ gearbeitet. Dieser Wärmetauscher, welcher direkt von den heissen Rauchgasen bespült wird, leitet die Wärmeenergie direkt in den Hypokaustenkreislauf, ohne die Speichermasse zu beaufschlagen. Sobald genügend Energie in die Speicherbausteine abgegeben worden ist, kann mittels einer Umschaltklappe auch über die Speicherbausteine Energie abgezogen werden. Ist kein Wärmebedarf mehr vorhanden, der Wärmeerzeuger aber noch in Betrieb ist, wird alle Energie im Steinspeicher eingelagert. So kann bei Bedarf wieder Energie entzogen werden, auch wenn der Wärmeerzeuger bereits kalt ist.

Die Wärmeenergie wird vom Speicher mittels geschlossenen Luftkanälen zu den Wärmestrahlwänden geführt. Dort kann die Energie an den Wohnraum abgegeben werden. Durch die hohe Vorlauftemperatur von über 90 °C können die Wärmeabgabeflächen klein gehalten werden.

Die eingesetzten Norm-Wärmestrahlwände sollen als Gestaltungselement in den Wohnraum integriert werden. Die Oberfläche wird mittels Verputz oder keramischen Platten der Umgebung angepasst. So entfällt auch die vielfach störende Optik eines Radiators. Je nach Wärmebedarfsleistungsbedarf des Raumes werden verschiedene Grössen angeboten.

3.3 Regelung

Um alle Komponenten zentral verwalten und ansteuern zu können, wurde eine eigene Regelung entwickelt.

Während bei den ersten Versuchen noch alle Einstellungen von Hand gemacht wurden, wurde später auf die Software „Workbench“ umgestiegen. Diese Software erlaubt neben der Erfassung von Daten auch, einfache Regelkreise aufzubauen. Damit konnten im „WZ I“ die Lufteinstellungen anhand der Verbrennungstemperatur der Nachverbrennung und des Lambda-Wertes geregelt werden.

In einer weiteren Stufe wurde die Software „Dasylab 5.0“ von Datalog eingesetzt. Neben der besseren Übersichtlichkeit konnten die Regelparameter besser gewählt werden. Auch im Bereich der Datenspeicherung konnten Verbesserungen erreicht werden. Dieses Programm wurde bis zum Ende **der** Messdatenerfassung beibehalten.

Um alle Komponenten zentral anzusteuern, wurde das während den Versuchen erarbeitete Regelkonzept umgesetzt. Sämtliche Sensoren und Aktoren werden über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) erfasst und angesteuert. Durch die Flexibilität der SPS ist es jederzeit möglich, weitere Komponenten zu aktivieren und in das Regelsystem zu integrieren.

Priorität für diese Regelung ist die einfache Bedienung für den Benutzer. Dieser Leitsatz stand während der ganzen Entwicklung an vorderster Stelle.

Mit den gemachten Erfahrungen konnte ein Abbrand in verschiedene Phasen betreffend Zeit, Temperatur und Luftzufuhr unterteilt werden:

1. Start
2. Anfeuerphase
3. Hauptabbrandphase
4. Ausbrandphase
5. Gluthaltephase
6. Abbrandende

Um die Phasenabgrenzungen für die spätere Feuerungsregelung zu bestimmen, wurden feste Bezugswerte für die Abschnitte eines Verbrennungsvorganges festgelegt.

Nach Beendigung dieser Versuche wurde mit der Programmierung der Regelung begonnen. Sämtliche Signale der Sensoren und Aktoren Sensoren wurden in die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) geführt und dort verarbeitet. Damit wird ein emissionsarmer und automatisch ablaufender Betrieb gewährleistet. Die erfassten Messwerte und Regeleingriffe werden aufgezeichnet und können zur Kontrolle bei Fehlfunktionen eingesehen werden.

In der Schlussphase wurden alle Bestandteile der Ganzhausheizung miteinander verknüpft und mittels SPS geregelt und überwacht. So konnten alle Komponenten auch auf Funktion und Fehler getestet werden. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Anwendern wurde die Bedienung weiter vereinfacht und in einen seriennahen Zustand gebracht.

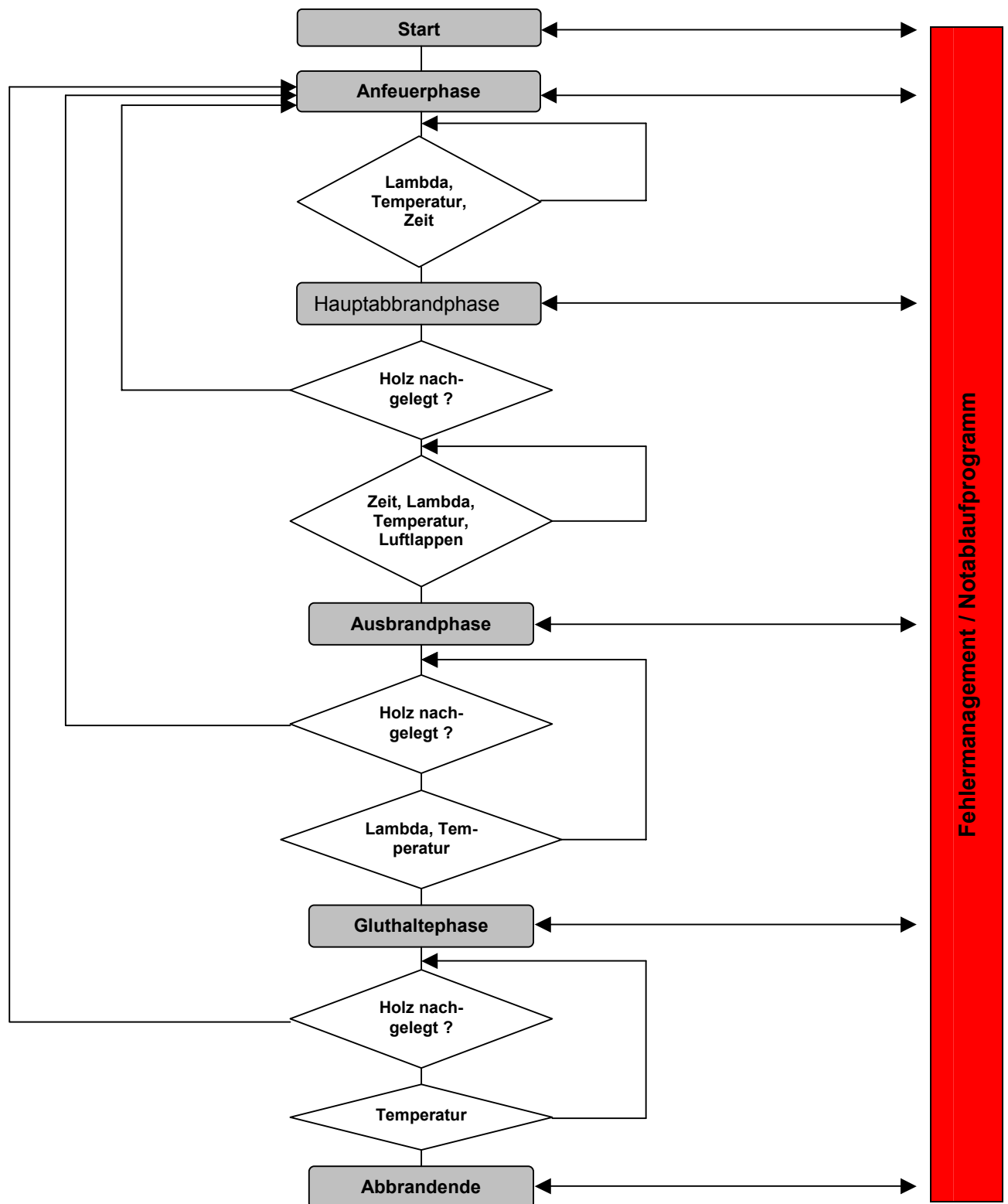


Bild 1

Programmablauf mit Fehlermanagement

3.4 Pilot- und Demonstrationsanlage - Anlage

Um die bisher einzeln getesteten Komponenten in einem Gesamtsystem zu testen, wurde ein neues Projekt als Pilot- und Demonstrationsanlage (P + D) gestartet. In einer Werkstatt in Steinen / Wila wurde ein idealer Raum zum Austesten gefunden. Die Werkstatt mit 3 Räumen und einem Energiebedarf von 5,9 kW (bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Aussentemperatur) bietet Platz für die Montage aller Messeinrichtungen.

Nach dem Start in der Wintersaison 1999/2000 konnten weitere Systemverbesserungen durchgeführt werden. Erstmals wurde auch das Speicherverhalten mit direkt angeschlossenen Wärmezeuger untersucht.

Abschliessend kann die komplette Anlage als „seriennah“ beurteilt werden.

4 Grundlagen

4.1 Holzverbrennung

Die Verbrennung des Holzes verläuft in 4 Phasen, welche durch die Eigenschaften des Holzes vorgegeben sind [Lit. 1]:

Trocknung: Bei Temperaturen bis ca. $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ trocknet das Holz aus. Das in der porösen Struktur vorhandene Wasser verdampft und diffundiert oder strömt in die Umgebung. Dieser Prozess verläuft endotherm, bis zur vollständigen Trocknung des Holzes wird ein Temperaturanstieg stark gebremst.

Vergasung / Pyrolyse: Bei Temperaturen von ca. 200 bis $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden die flüchtigen Bestandteile des Holzes vergast (Pyrolyse). Diese Bestandteile haben einen Anteil von ca. 85% der gesamten Holzmasse. Die Pyrolyse verläuft teilweise endotherm (aufbrechen der chemischen Verbindungen). Ein Teil der Pyrolyseprodukte (CO , Kohlenwasserstoffe) reagiert mit dem in der Glut vorhandenen Sauerstoff unter Wärmeabgabe. Diese exothermen Prozesse stehen mit den endothermen Vergasungsreaktionen in einem Gleichgewicht, welches wesentlich durch die Sauerstoffzufuhr in die Glut kontrolliert werden kann. Die Wärmeleitung im Holz sowie Diffusionsprozesse an der Holzoberfläche begrenzen dabei die Reaktionsgeschwindigkeit.

Oxidation: Bei Temperaturen bis zu theoretisch $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ verbrennen die produzierten Holzgase in der Flamme, wenn ihnen nach dem Verlassen der Glut genügend Sauerstoff zugeführt wird. Bei überstöchiometrischer Luftzufuhr kühlt die Flamme ab.

Kohleverbrennung: Nach der vollständigen Pyrolyse verbrennt die verbleibende Holzkohle unter starker Wärmeabgabe

4.2 Parameter

Die wichtigsten Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung von Holz sind hohe Temperaturen, ausreichende Aufenthaltszeit in der heissen Zone und eine gute Vermischung der Verbrennungsluft mit dem Holz und den aus dem Holz freigesetzten brennbaren Gasen [Lit. 2]

Zeit: Die Oxidation setzt sich zusammen aus Vorgängen von Stofftransport und Stoffaustausch sowie der eigentlichen Verbrennung.

Temperatur und Luftüberschuss: Zur Gewährleistung einer hohen Reaktionstemperatur darf die Flamme nicht direkt gekühlt werden. Die Verbrennung wird mit einem Luftüberschuss λ von 1,5 bis 2,5 durchgeführt, da sonst die Flammtemperatur – insbesondere bei der Verbrennung von feuchtem Holz – bei höherem λ nicht mehr genügend hoch ist.

Turbulenz / Vermischung: Damit die bei der Verbrennung freigesetzten Stoffe mit dem Luftsauerstoff reagieren können, müssen sie möglichst homogen durchmischt werden. Da die Viskosität von Gasen bei zunehmenden Temperaturen ansteigen, wird die Vermischung in einem Wärmeerzeuger zusätzlich erschwert.

4.3 Feuerungsablauf

Anfeuerphase: Im Anfeuervorgang wird frisch aufgelegtes Holz angezündet. Dabei muss unterschieden werden, ob im Feuerraum noch zündfähige Restglut vom vorherigen Abbrand vorhanden ist oder nicht. Im ersten Fall kann die neue Holzaufgabe direkt auf die Glut gelegt werden. Im kalten Zustand dauert ein Anfeuervorgang länger, da zuerst das ganze System aufgeheizt werden muss. Der Anfeuervorgang eines kalten Wärmeerzeugers bringt immer erhöhte Emissionen mit sich.

Hauptbrandphase / stationärer Betrieb: Während der Hauptzeit eines Abbrandes befinden sich die Teilprozesse in einem stationären Zustand. Im unteren Bereich des Glutbettes erfolgt die Oxidation der Holzkohle mit der Primärluft. Die brennbaren Gase, welche das Glutbett verlassen, werden in der Nachverbrennungskammer mit Sekundärluft oxidiert. Im stationären Betrieb sinken die Emissionen auf ein Minimum.

Ausbrandphase: Sobald die Pyrolyseaktivität abnimmt, beginnt die Ausbrandphase. Die verbleibende Holzkohle wird mit der Primärluft oxidiert, bis auch dieser Prozess abgeschlossen ist. In der Ausbrandphase steigen die Schadstoffwerte wieder deutlich an.

4.4 Emissionen aus der Verbrennung

Aufgrund der Teilprozesse Vergasung und Oxidation lassen sich die Schadstoffe wie folgt einteilen [Lit. 1]:

Emissionen aus unvollständiger Verbrennung

- Kohlenmonoxid CO
- Kohlenwasserstoffe HC
- Unverbrannte Partikel

Diese Schadstoffe können durch eine vollständige Verbrennung vermieden werden. Der Ausstoss dieser Emissionen ist stark abhängig von der Verbrennungsführung.

Emissionen aus vollständiger Verbrennung

- Kohlendioxid CO₂
- Stickoxide NO_x
- Aschepartikel

Da diese Schadstoffe auch bei einer vollständigen Verbrennung auftreten, können sie nicht (CO₂, Asche) bzw. nur bedingt (NO_x) vermieden werden. Da die Stickoxidemissionen bei Holzfeuerungen vorwiegend dem Holzstickstoff entstammen, können sie bis heute in Kleinholzfeuerungen praktisch nicht gezielt beeinflusst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur das Kohlenmonoxid CO (als Leitgrösse für die Schadstoffemissionen) und der Anteil Kohlendioxid CO₂ bzw. O₂ im Rauchgas gemessen.

5 Versuchsaufbau

5.1 Systemvarianten

Um überhaupt einen sinnvollen Einsatz des Heizsystems zu gewährleisten, wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt:

Variante 1

- Der Grundkörper (GK) ist die einzige Wärmeabgabequelle.
- Der GK wird raumübergreifend eingesetzt, d.h. er durchdringt den gesamten Wohnraum und kann somit die Wärme analog einem Kachelofen, jedoch über mehrere Räume verteilt, abgeben.
- Auf eine dezentralisierte Wärmeabgabe mittels zusätzlicher in das System integrierten Strahlungsflächen kann verzichtet werden.
- Einspeicherung in zentralen Speicher, welcher Wärme an zirkulierende Luft im GK abgibt.
- Schwerkraftumwälzung möglich und sinnvoll.

Vorteile	Nachteile
- Gestalterische Flexibilität bei frühzeitiger Planung - Platzbedarf pro Grundfläche gering - Individuelle Lösungen möglich - Speicherrestwärmenutzung - Anlagen mit herkömmlichen Kachelofeneinsätzen problemlos möglich - Fremdenergien nicht unbedingt notwendig (Umwälzpumpe) - Anlagen können vom Hafner selbständig geplant und gebaut werden (da ähnlich dem Kachelofen)	- Berechenbarkeit - Funktionssicherheit/ Regelbarkeit - Optimale Wärmeverteilung / Energiemanagement erschwert - Standortgebunden (Zentral, über mehrere Stockwerke) - Aufstellraum und dezentrale Räume haben voraussichtlich eine unterschiedliche Dynamik bezüglich Wärmehaushalt - Klar definierte Systemkomponenten, die konstruktiv wie auch wärmetechnisch aufeinander abgestimmt werden fehlen

Variante 2

- Wärmeerzeuger, Speicher und Wärmetauscher sind im GK integriert.
- Dezentrale Wärmeabgabe durch Strahlungsflächen.
- Wärmeabgabe in den Aufstellraum (z. B. Wohnraum): Der Wärmebedarf im Aufstellraum wird primär durch „Verluste“ des Wärmeerzeugers gedeckt, die Wärmeabgabe erfolgt ähnlich wie bei einem Kachelofen. Die Wärme wird über den unisolierten Speicher an die Kachelwände abgegeben. Der Speicher wird somit wenig - wenn überhaupt - isoliert.
- Dezentrale Wärmeverteilung: Der GK dient als Luftmantel, der WZ und der Speicher dienen als Wärmetauscher – eine konsequente und standardisierte Luftführung und –lenkung innerhalb des GK wird nicht zwingend vorgesehen.
- Die Luft wird mittels Umwälzventilator in Bewegung gehalten und dezentral verteilt.

Vorteile	Nachteile
- Flexibilität - Platzbedarf GK im Aufstellraum ähnlich einem Kachelofen - Individuelle Lösungen - Speicherrestwärmenutzung gut - Dezentralisierung der Wärmeabgabe - Anlagen mit herkömmlichen Kachelofeneinsätzen und Speichermaterialien möglich	- Berechenbarkeit/ Planbarkeit - Funktionssicherheit - Optimale Wärmeverteilung / Energiemanagement erschwert - Wenig modulares System - Aufstellraum und dezentrale Räume haben eine unterschiedliche Dynamik bezüglich Wärmehaushalt - Klar definierte Systemkomponenten, die konstruktiv wie auch wärmetechnisch aufeinander abgestimmt sind fehlen - Platzbedarf für Luftleitungen - Fremdenergie (Umwälzpumpe)

Variante 3

- WZ, Speicher und Wärmetauscher im GK integriert.
- Dezentrale Wärmeabgabe durch Strahlungsflächen.
- Wärmeabgabe in den Aufstellraum: Der Wärmebedarf im Aufstellraum wird analog den Räumen mit dezentralen Strahlungsflächen gedeckt. Die oben genannten „Verluste“ werden minimal gehalten, der WZ und der Speicher müssen isoliert werden. Anteil der „Wärmeverluste“ in den Aufstellraum müssen immer kleiner sein als der Bedarf.
- Dezentral Wärmeverteilung: Der WZ wird gut isoliert und nicht ins Wärmetauscher-/Umluftsystem integriert, die Verluste gehen über die Masse des Grundkörpers in den Wohnraum. Der Speicher dient als Wärmetauscher, eine konsequente und standardisierte Einbindung in die Luftführung muss vorgesehen werden (Luftmantel um Speicher mit Isolation).
- Der GK dient als Verkleidung des Systems und ist nicht mehr in die Luftführung eingebunden.
- Die Luft wird mittels Umwälzpumpe in Bewegung gehalten und dezentral verteilt.

Vorteile	Nachteile
- Berechenbarkeit/ Planbarkeit - Funktionssicherheit - Regelfähigkeit - Optimale Wärmeverteilung / Energiemanagement - Modularer Aufbau - Dezentralisierung der Wärmeabgabe - Aufstellraum und dezentrale Räume haben eine ähnlich Dynamik bezüglich Wärmehaushalt - Klar definierte Systemkomponenten, die konstruktiv wie auch wärmetechnisch aufeinander abgestimmt werden können	- Komplexität - Flexibilität - Platzbedarf im Aufstellraum grösser - Individuelle Lösungen eingeschränkt - Speicherrestwärmenutzung ineffizienter - Anlagen mit herkömmlichen Kachelofeneinsätzen und Speichermaterialien nicht mehr möglich - Platzbedarf für Luftleitungen - Fremdenergie (Umwälzpumpe, Rauchgasventilator...)

Durch die optimale Wärmeverteilung und gute Berechenbarkeit der ganzen Anlage wurde das Klimafam-System auf der **Variante 3** aufgebaut.

5.2 Anlagendisposition

5.2.1 Standort des Wärmeerzeugers und des Speichers

Alle Systemkomponenten werden im Wohnraum integriert. Wärmeerzeuger (WZ) und Speicher werden mit einer keramischen Verkleidung ummantelt. Der Einbau in einen Kellerraum ist möglich, aber nicht wünschenswert, es soll ein klarer Unterschied zur herkömmlichen Kesseltechnik bestehen. „Leben mit dem Feuer“ gilt als Leitsatz.

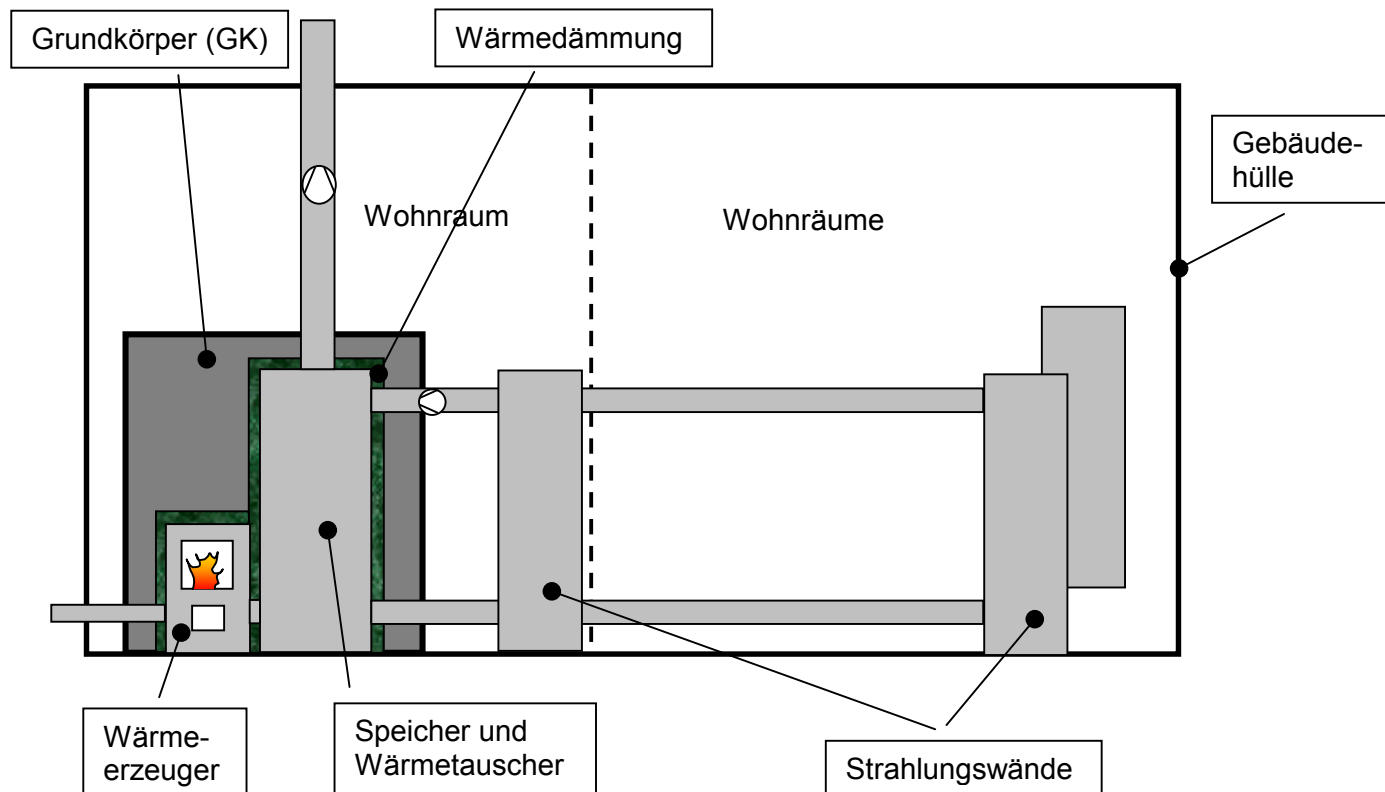
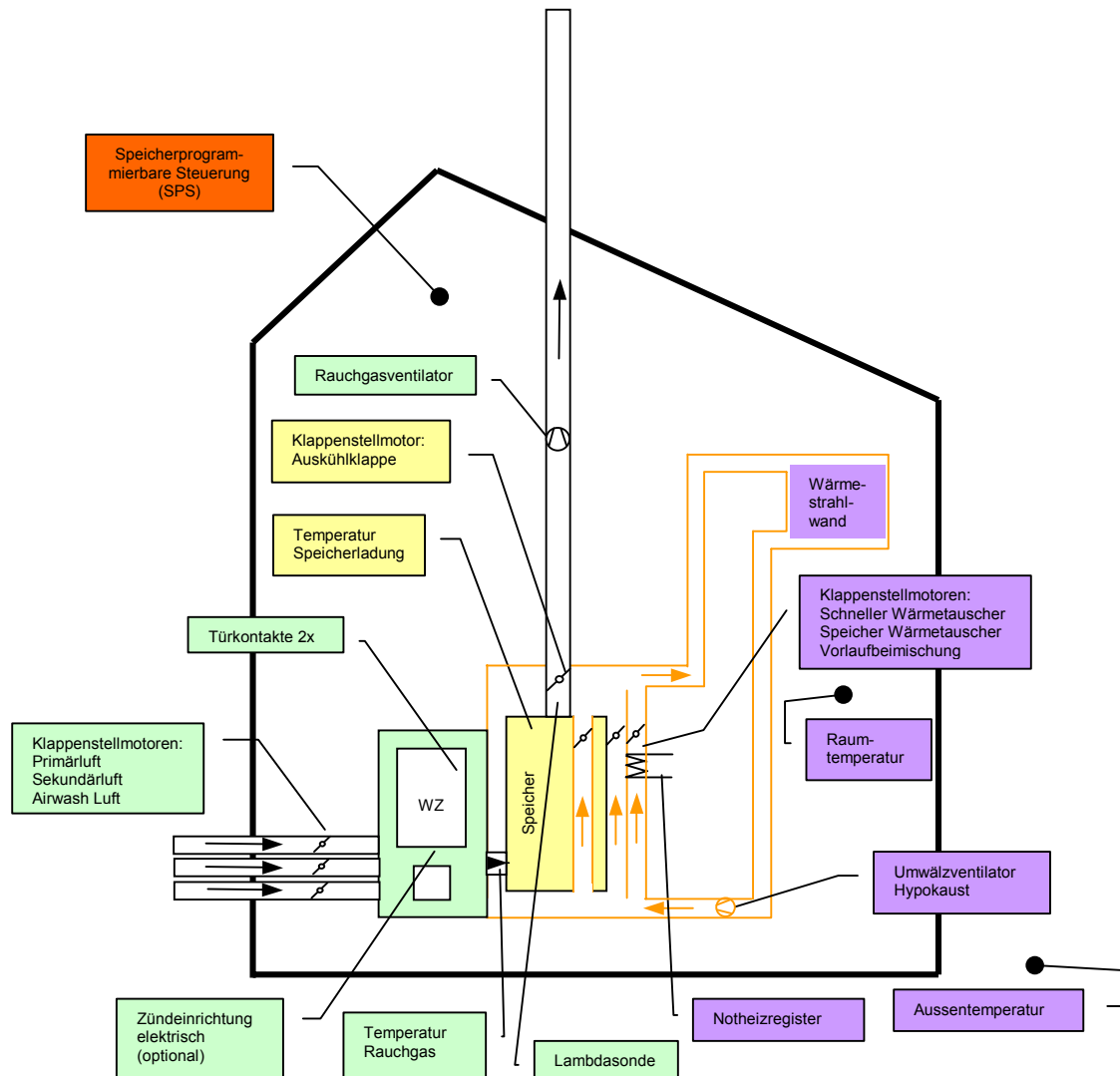


Bild 2 Schema zu Anlagenintegration in Wohnraum (Systemvariante 3)

5.2.2 Regeltechnisch relevante Anlagendisposition

Durch die Wahl der „Variante 3“ ergab sich folgende Disposition im Bezug auf die Regeleinheit, Aktoren und Sensoren:



Legende:

Wärmeerzeuger

Speichersystem

Wärmeverteilungssystem

Bild 3

Regeltechnisch relevante Anlagendisposition in einem Haus

5.3 Aufbau des Wärmeerzeugers

Der Aufbau des ersten und zweiten Prototypen (WZ I und WZ II) erfolgte fast ausschliesslich mit lasergeschnittenen Stahlteilen. Im Bereich des Feuerraumes und der Nachverbrennungskammer wurden feuerfeste Isolierbetonsteine verwendet. Der Grundkörper wurde jeweils komplett wärme-gedämmt.

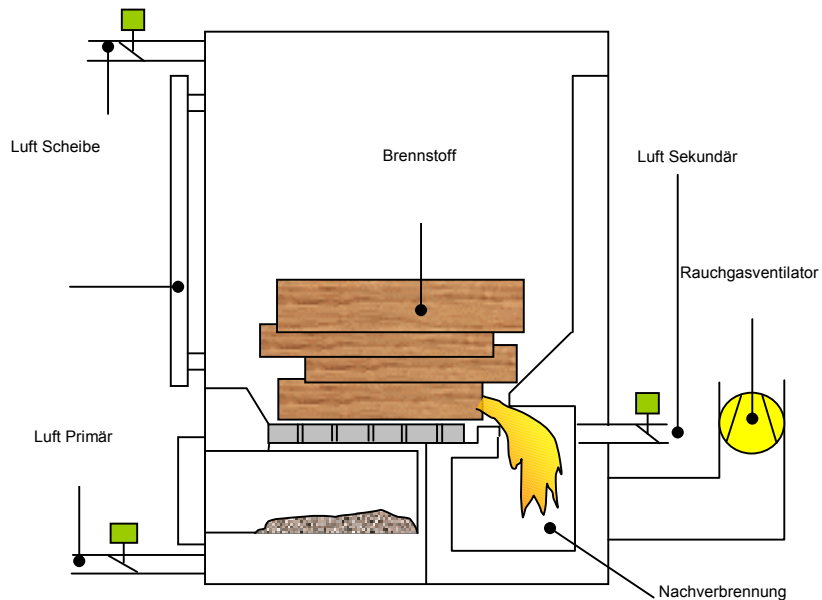


Bild 4 Schematischer Aufbau des ersten Wärmeerzeugers WZ I

Basierend auf den gemachten Erfahrungen mit dem WZ I wurde der Wärmeerzeuger WZ II konstruiert.

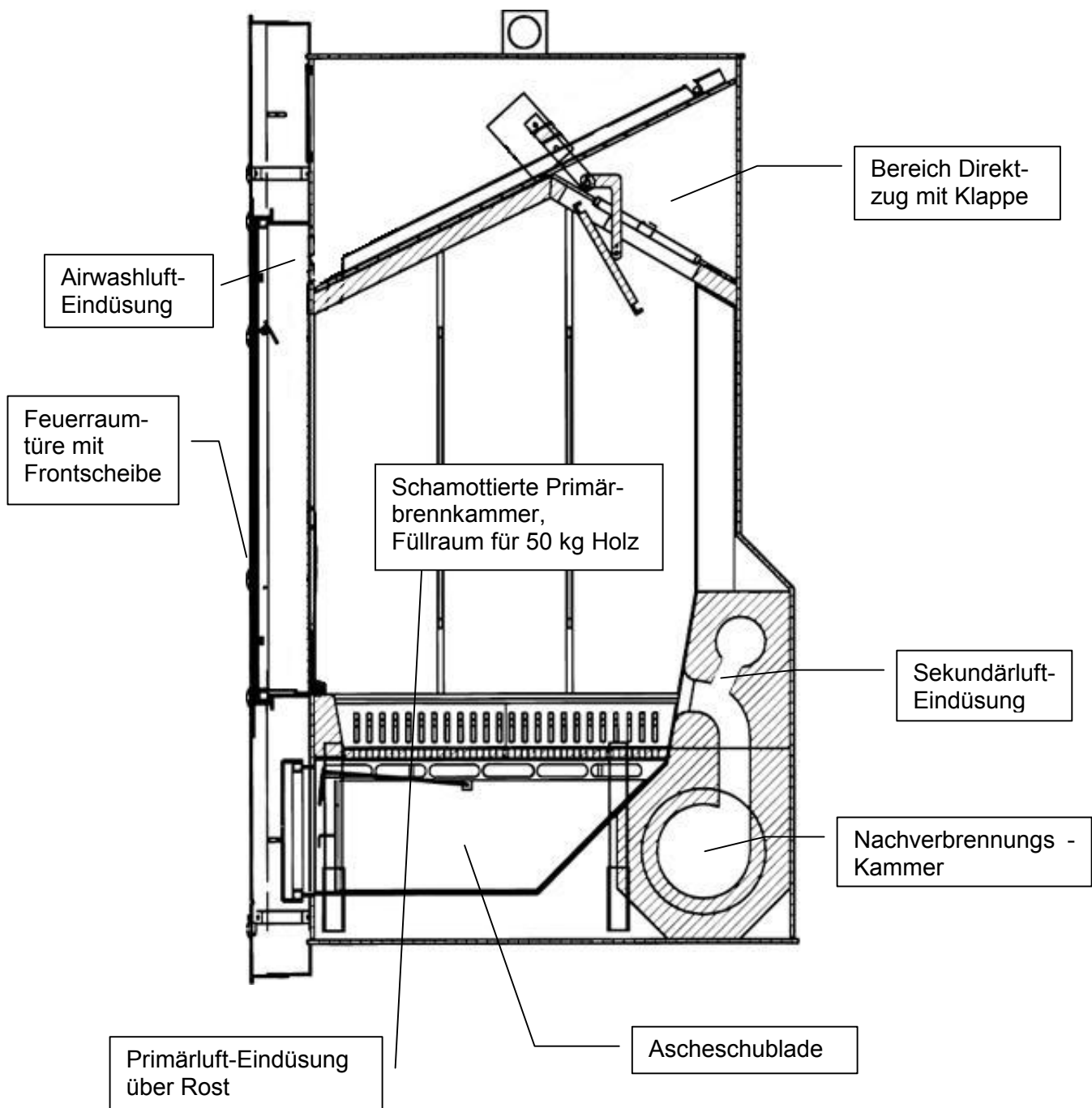


Bild 5 Seitenriss vom Wärmeerzeuger WZ II (Prototyp II)

Verbesserungen am WZ II wurden im Bereich der Materialien, Rauchgasaustritt bei Manipulationen (Direktzug) und Strahlungsverluste über die Frontscheibe erzielt.

Der Prototyp WZ II kann nach Abschluss der Arbeiten als seriennahes Gerät beurteilt werden.

5.4 Aufbau des Speichers

Mit der Wahl der „Variante 3“ aus den „Systemvarianten“ wurden hohe Ziele auch an den Speicher gestellt. Im Gegensatz zu einem traditionellen Speichersystem vergrösserte sich der Aufwand beträchtlich.

5.4.1 Versuchsaufbau / Versuchsanordnung Speicher I

Der erste Aufbau des Speichers erfolgte gemäss Bild 6. Daraus wird ersichtlich, dass die Konstruktion mit zwei getrennten Rauchgaszügen aufgebaut wurde. Mit dieser Anordnung sollte die Wärmetauscheroberflächen (innen und aussen) möglichst gross gestaltet werden.

Die Luftführung musste mittels im Luftmantel integrierten Schikanen während des Versuchsaufbaues mehrmals angepasst werden. Die Breite des Luftspaltes wurde von anfangs 7 cm auf später 3-4 cm reduziert, um mit erhöhter Luftgeschwindigkeit einen besseren Wärmeübergang zu erreichen. Zur Energieentnahme wurde die Luft mit einem Ventilator von oben nach unten (Gegenstromprinzip) durch den Spalt zwischen Speichermasse und Aussenhülle geblasen. Zur Volumenstrommessung der Warmluft wurde ein Flügelrad- Anemometer eingesetzt.

Als Speichermaterial wurde ein hochwertiges mineralisches Material eingesetzt, welches neben einer hohen Wärmespeicherkapazität auch eine gute Wärmeleitfähigkeit aufwies ($\lambda = 7.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ bei 400°C).

Um einen vertikalen Temperatenausgleich zu unterbinden (Zielsetzung waren verschiedene Temperaturzonen) wurde der Speicher in drei gegeneinander wärmegeädämmte Zonen aufgeteilt. Die Masse der drei entstanden Zonen teilte sich folgendermassen auf:

Zone A = 401 kg, Zone B = 519 kg, Zone C = 322 kg.

Als Wärmeerzeuger diente ein Ölbrenner, welcher über die gesamte Versuchsdauer eine konstante Wärmeabgabe ermöglichte (11,9 kW). Bei Versuchsbeginn wurde das Rauchgas des Ölbrenners einmal analysiert.

Die Temperaturen wurden auf verschiedenen Messebenen und Einstichtiefen abgegriffen.

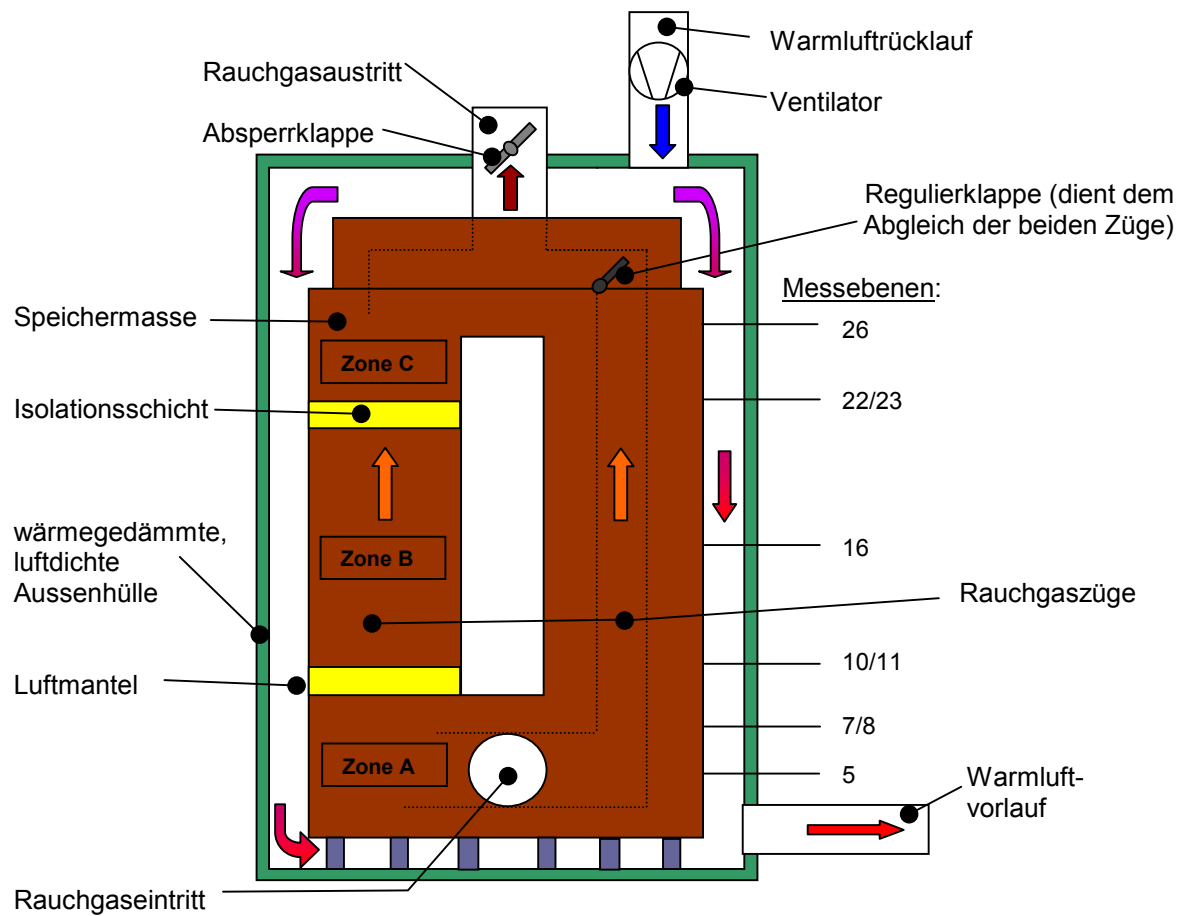


Bild 6

Schema Speicher I

5.4.2 Versuchsaufbau / Versuchsanordnung Speicher II

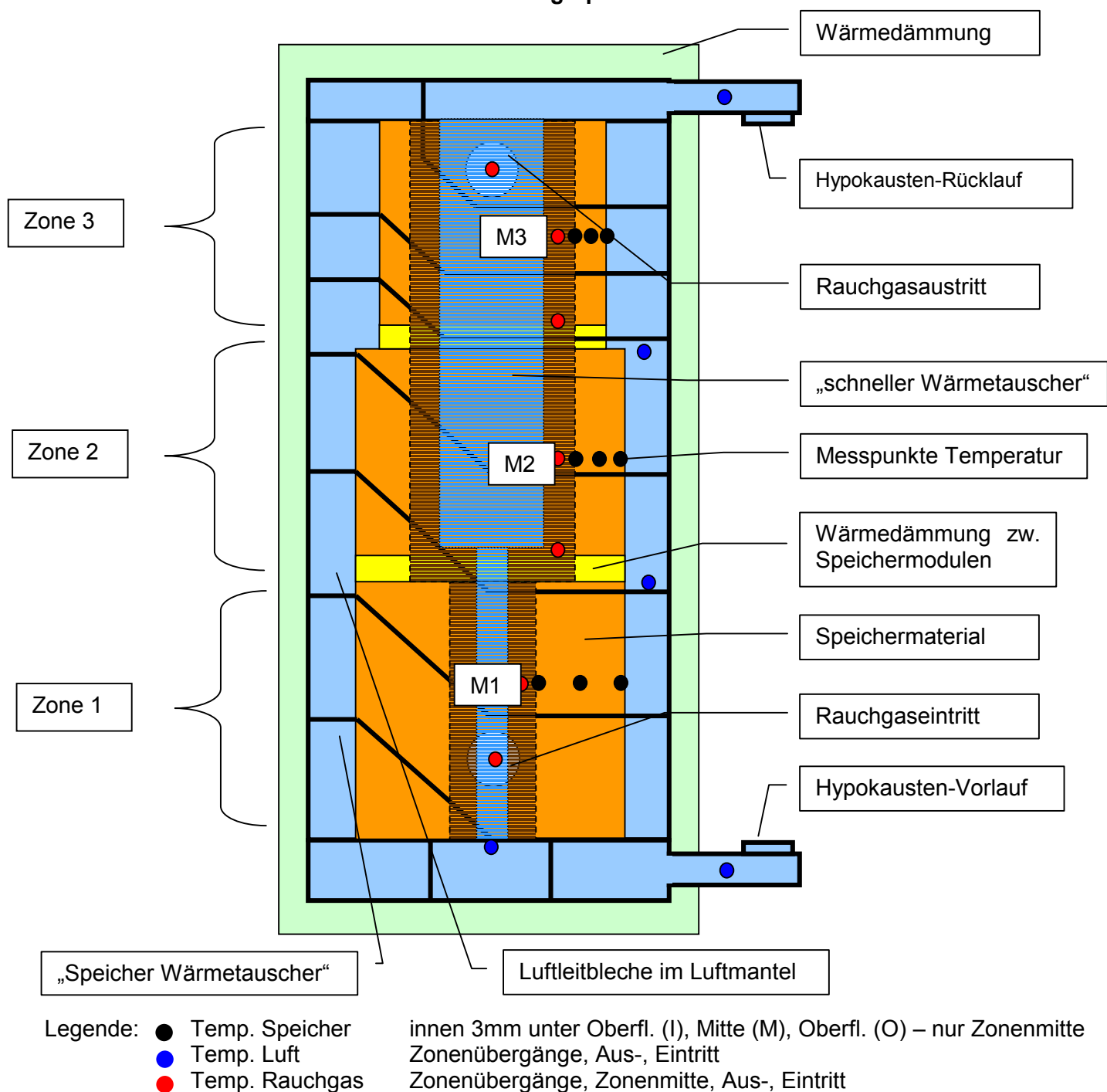


Bild 7 Schema Speicher II

Basis des ganzen Speichers ist auch hier das identische Speichermaterial wie im ersten Versuchsaufbau. Mit Beginn eines Anfeuervorganges beginnen diese Speichersteine, Energie aufzunehmen. Da bis zum Erreichen einer Betriebstemperatur längere Zeit verstreicht, wurde zusätzlich ein „schneller Wärmetauscher“ integriert. Dieser wird direkt von den heißen Rauchgasen beaufschlagt. Damit ist es möglich, kurz nach dem Anfeuern Energie in den Hypokaustenkreislauf zu leiten. Die Umschaltung der Wärmeentnahme über die Speicherbausteine oder den „schnellen Wärmetauscher“ wird von der Regelung übernommen.

5.4.3 Speicher II mit Anschlüssen an das Hypokausten-System

Schematische Darstellung des Speichersystemes mit Anschlüssen für Rauchgase und Hypokaustenluft:

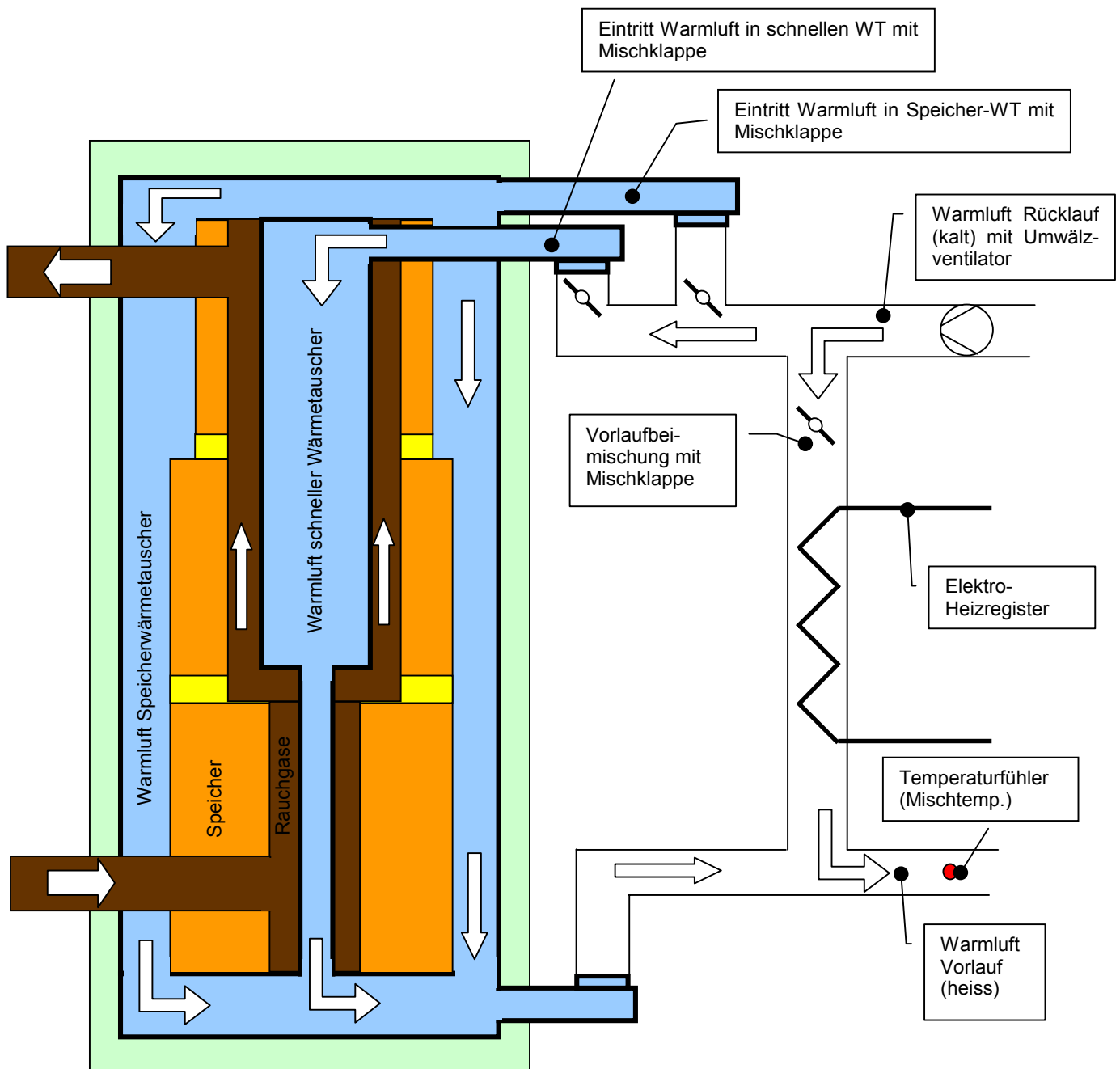


Bild 8

Schema des Speichers mit Vor- und Rücklauf

5.5 Regelung

Im Gesamtsystem übernimmt die SPS die Funktion als zentrales Überwachungs- und Regelement. Zusätzlich zur Verbrennungsregelung ist das Energiemanagement des ganzen Hauses mit folgenden Funktionen integriert:

- Bereitstellen der nötigen Energiemenge anhand der aktuellen Wärmesituation innerhalb und ausserhalb des Hauses
- Berücksichtigung von verschiedenen Temperaturvorgaben zu verschiedenen Tageszeiten
- Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit und -leistung nach momentaner Energiesituation
- Möglichkeit zur Einbindung von weiteren Energiequellen
- Erweiterbarkeit allgemein auf Hard- und Softwareseite
- Benutzerfreundliche und einfache Bedienbarkeit für jeden Anwender

5.6 Sichtfeuer / Heizfeuer

Der Wärmeerzeuger des Klimaflam-Systems wird im Wohnbereich installiert und ersetzt gleichzeitig das traditionelle Cheminée. Somit muss ein gemeinsamer Feuerraum für ein normales Cheminéefeuer wie auch für ein heiztechnisches Feuer konstruiert werden.

Im Klimaflam-Projekt wurden die 2 Modi „Sichtfeuer“ und „Heizfeuer“ definiert. Somit kann je nach Bedarf ein „gewohntes“ Kaminfeuer mit ansprechendem Flammenbild oder ein extrem emissionsarmes „Heizfeuer“ zum Heizen des Hauses genutzt werden. Folgend die wichtigsten Unterschiede:

Sichtfeuer: Der Feuerraum wird nur durch eine Doppelglasscheibe zum Benutzer abgetrennt. Während dem Feuervorgang wird nur Primär- und Airwashluft eingesetzt. Die Lufteindüsung verläuft auch hier komplett geregelt. Im Gegensatz zum Heizfeuer ist der Strahlungsverlust durch die Glasscheibe höher als beim Heizfeuer. Die Emissionswerte bewegen sich auf dem Niveau eines guten Cheminéeinsatzes. Die durchschnittliche Feuerungsleistung liegt beim Sichtfeuer höher als beim Heizfeuer. Die maximale Holzaufgabemenge liegt beim Sichtfeuer bei ca. 15kg.

Heizfeuer: Die Grundidee beim Heizfeuer ist eine möglichst emissionsarme Verbrennung mit einem hohen Wirkungsgrad. Versuche haben gezeigt, dass der Strahlungsverlust durch die Frontscheibe hoch ist. Dadurch wurde für die Betriebsart Heizfeuer eine integrierte Abdeckblende konstruiert, welche Strahlungsverluste durch die Glasscheibe reduziert. Eine Kontrollöffnung in dieser Abdeckklappe gewährt trotzdem eine optische Kontrolle des Feuers. Das Heizfeuer funktioniert nach dem Holzvergaserprinzip, d.h. in der Primärbrennkammer wird das Holz vorwiegend vergast (keine Flammenbildung). Aufgrund dieser Funktionsweise kann der Verbrennungsprozess gut leistungsgeregelt werden. Die Holzaufgabemenge kann hier bis 50kg betragen.

5.7 Sensorik

Zur Messung der verschiedenen Werte wurden folgende Elemente eingesetzt:

Temperatur: Die Temperaturwerte über 600 °C wurden mit stahlummantelten Thermoelementen Typ „K“ aufgezeichnet. Wegen der hohen Temperatur in der Brennkammer (bis 1200 °C) wurde eine keramikummanteltes Element eingesetzt. Im Bereich des Speichers und des Hypokaustensystems wurden Widerstandselemente „PT100“ verwendet.

Luftvolumen: Für die Durchflussmessung wurden Hitzedrahtanemometer der Firma Schmidt Feinwerktechnik eingesetzt. Mittels elektrischer Energie wird die Spitze dieses Sensors aufgeheizt, die

zu messende, vorbeiströmende Luft kühlt das Element wieder ab. Aus dieser Temperaturdifferenz resultiert die Luftgeschwindigkeit.

CO / CO₂: Mit einem Fisher-Rosemount Binos 100 wurde die Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid erfasst. Dieses Gerät arbeitet nach dem Infrarot-Absorptions-Prinzip, die Wellenlänge der Absorptionsbanden charakterisiert dabei die Gasart, während die Stärke der Absorption ein Mass für die Konzentration der Messkomponente ist. Durch die langen Ansaugwege der Rauchgase ergaben sich hier Verzögerungen der Signale von ca. 90 Sekunden.

O₂: Der Restsauerstoff wird mit einem Fisher-Rosemount Oxinos 100 gemessen. Dabei wird die Messung nach dem paramagnetischen Prinzip durchgeführt, die Eigenschaft des Sauerstoffmoleküls wird zur Konzentrationsbestimmung genutzt. Durch die langen Ansaugwege der Rauchgase ergaben sich hier Verzögerungen der Signale von ca. 90 Sekunden.

Holzgewicht: Um den Gewichtsverlauf des abbrennenden Holzes aufzuzeichnen, wurde der gesamte Versuchsaufbau auf einer Mettler-Grubenwaage platziert. Vor jedem Versuch wurde die Waage auf Null geeicht.

Lambda: Die Messung des Luftüberschusses erfolgte mit einer Lambda-Sonde von Bosch (Typ LSM-11). Wegen der zulässigen Maximaltemperatur von 800 °C ist eine Montage direkt im Brennraum nicht möglich. Der Sensor wurde deshalb im Kaminrohr nach dem Speicher montiert.. Daraus resultierten Verzögerungen der Signalaufnahme, welche aber durch die Trägheit der Feuerung nicht gewichtig sind. Parallel zur Messung wurde Lambda berechnet durch den Anteil an CO und CO₂ im Rauchgas. Somit konnten Abweichungen und Genauigkeiten miteinander verglichen werden.

Druck: Zur Messung des Kaminzuges wurde ein Drucksensor eingesetzt. Damit wurde ein Bereich von 0 bis 200 Pa abgedeckt.

Datenerfassung allgemein: Sämtliche zu verarbeitenden Signale wurden mit Datenerfassungsmodulen vom Typ „Strawberry Data Shuttle“ erfasst. Danach wurden die Daten mit der Software „Workbench“ und „Dasylab“ aufgezeichnet und anschliessend mit „Microsoft Excel“ weiterverarbeitet.

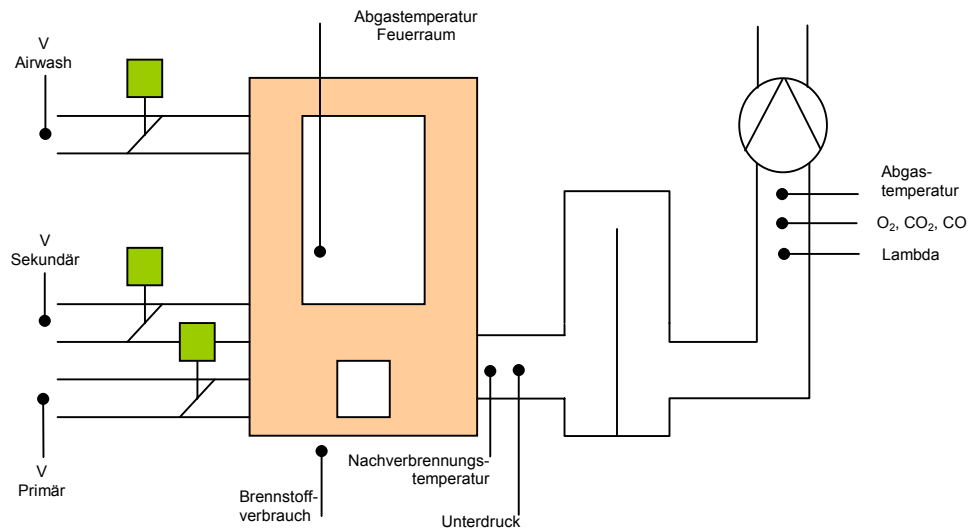


Bild 9 Schematische Darstellung der Messwerterfassung für Wärmeerzeuger mit Nachheizfläche

Legende:

V Primär	[m ³ /h]	Primärluft-Eindüsung
V Sekundär	[m ³ /h]	Sekundärluft-Eindüsung
V Luft Scheibe	[m ³ /h]	Airwashluft-Eindüsung
Brennstoffverbrauch	[kg/h]	Holzverbrauch
Abgastemperatur Feuerraum	[°C]	Temperatur im Primärbrennraum
Nachverbrennungstemperatur	[°C]	Temperatur im Sekundärbrennraum
Unterdruck	[Pa]	Zug im Kamin
Lambda	[-]	Verhältnis effektiver/theoretischer Luftbedarf
Abgastemperatur	[°C]	Kamintemperatur
Sauerstoff O ₂	[%]	Sauerstoffanteil im Kamin
Kohlenmonoxid CO	[ppm]	Kohlenmonoxidanteil im Kamin
Kohlendioxid CO ₂	[%]	Kohlendioxidanteil im Kamin

6 Hauptergebnisse

6.1 Allgemeine Werte

Im ersten Teil der Hauptergebnisse werden generelle Aussagen und Messwerte zum Klimaflam-System gezeigt. Die meisten Werte stammen aus Versuchen mit dem WZ II, da damit das ausgereifere Modell zur Verfügung stand. In den darauffolgenden Kapiteln wird auf die Problematik der einzelnen Wärmeerzeuger gezielter eingegangen.

6.1.1 Emissionen / Lambda

Als Leitgrösse zur Emissionsmessung wurde der Wert des Kohlenmonoxides genutzt. Vorausgegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass zwischen CO und anderen Emissionen wie Russ und NO_x ein direkter Zusammenhang besteht.

Als wichtigster Parameter zur Messung der Verbrennungsqualität wurde Lambda mittels einer Sonde (Typ Bosch LSM 11) erfasst. Gleichzeitig wurde Lambda aus den Emissionswerten CO₂ und CO berechnet. So stand immer eine Vergleichsmessung zur Seite, um allfälligen Defekten der Lambda-Sonde vorzubeugen.

Im traditionellen Ofenbau wird mit Lambda-Werten zwischen 1,6 bis 2,0 gearbeitet. Durch den Einsatz einer Wirbelkammer zur Vermischung der Gase mit Sekundärluft konnte dieser Wert im Versuchsaufbau deutlich reduziert werden. Optimal bewegte sich der Lambda-Wert zwischen 1,2 und 1,5.

Unterhalb eines Lambda-Wertes von 1,2 konnte nicht mehr genügend Sauerstoff zur vollständigen Verbrennung der brennbaren Gase zur Verfügung gestellt werden. Die Folge war ein massiver Anstieg der CO-Emissionen, welche teilweise über 10'000 ppm stiegen. Im Grenzbereich um Lambda 1,2 wird das System instabil, es empfiehlt sich nicht, ein Lambda-Wert tiefer 1,3 als Führungsgrösse der Regelung zu wählen.

Problematisch war die Zuführung einer genügend grossen Menge Sekundärluft. Wegen der im ersten Prototyp zu niedrig dimensionierten Querschnitte der Luftzuführung zur Nachverbrennungskammer wurde dieses Problem wiederholt festgestellt. Durch Montage eines Ventilators am Einlass der Sekundärluft konnte dem zu hohen Druckverlust entgegengewirkt werden.

Im zweiten Prototyp wurde die Luftzuführung besser ausgearbeitet. Neben einer Erhöhung des Querschnittes der Luftzuführung wurde auch die Länge des Luftkanals reduziert. Der Querschnitt konnte bis zum Ort der Eindüsung beibehalten werden.

Mit diesen Massnahmen wurden gute Erfahrungen gemacht. Die Klappenstellung zur Luftzufuhr bewegte sich nicht immer im Grenzbereich, eine Reserve bei Spitzen ist damit gewährleistet. Probleme ergaben sich, wenn während dem Anfeuervorgang während mehr als 30 Minuten alle Zuluftklappen offen standen. So hat das Feuer Zeit genug, den ganzen Stapel Holz (50 kg) in Brand zu setzen. Anschliessend steht nicht mehr genügend Luft zu einer sauberen Verbrennung zur Verfügung. Mittels der Regelung konnte die Anfeuerzeit reduziert werden, dass sich dieses Problem nicht mehr stellt.

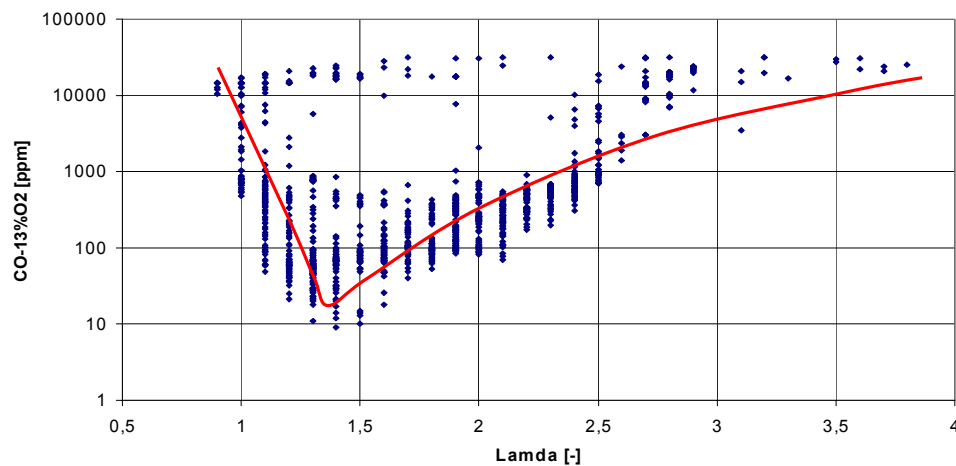


Diagramm 1

Bestimmung der CO / λ Abhängigkeit

Diese Graphik resultiert aus Versuchen mit verschiedenen Sollleistungen (25-45 kW) und zeigt das sogenannte „Lambda-Knie“ für diesen Wärmezeuger. Wie die Auswertungen zeigten, beträgt das minimale λ , bei welchem tiefe CO-Emissionen erreicht werden, über den gesamten Leistungsbereich 1,2 – 1,4.

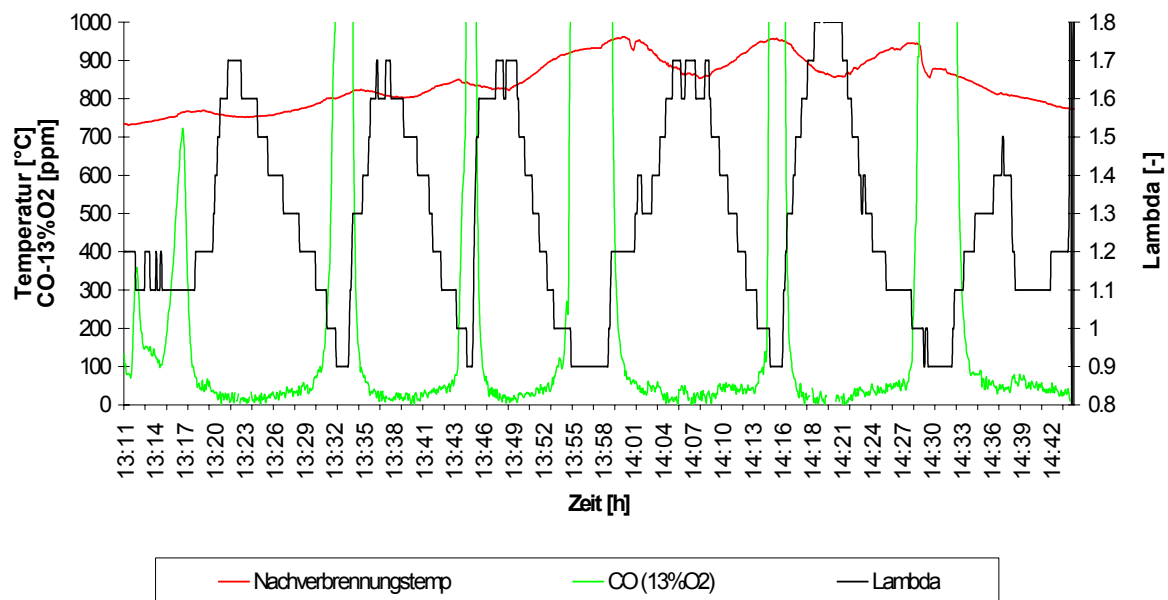


Diagramm 2

Regelungstechnischer Versuch: Variation des Sauerstoffüberschusses

Einfluss des Lambda-Wertes (in Stufen reduziert) in Zusammenhang mit den CO-Werten

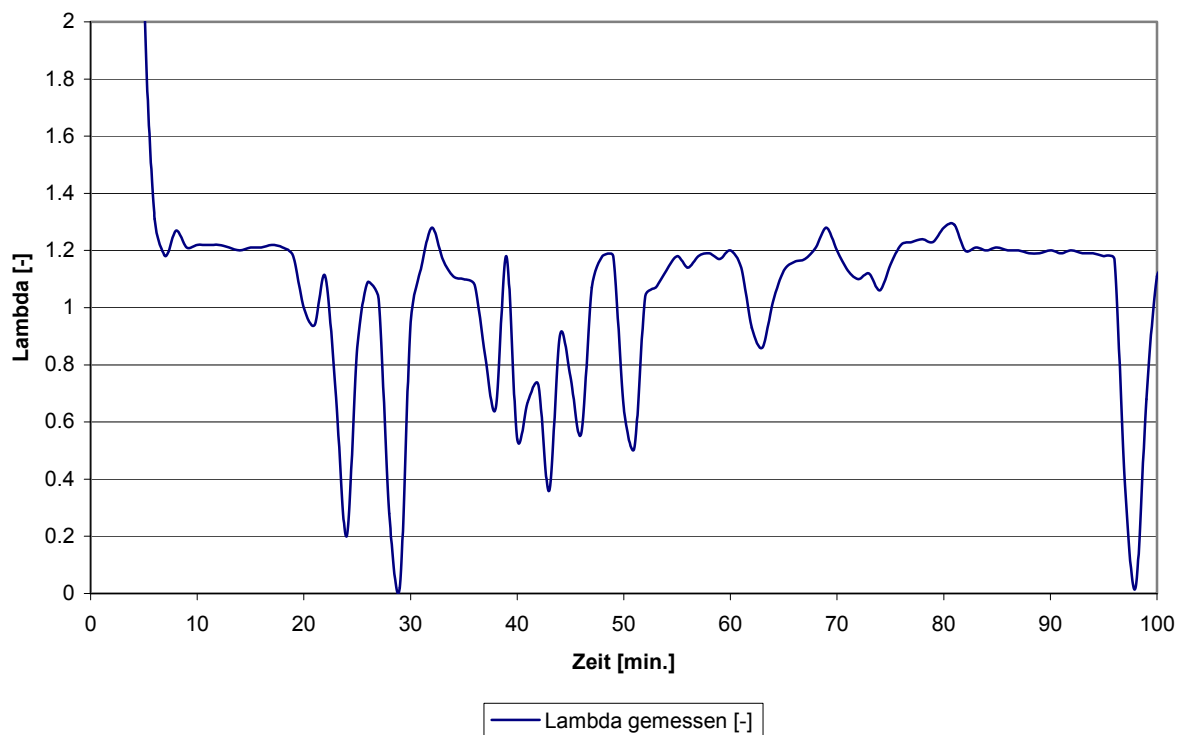


Diagramm 3

Beispiel einer schlechten Verbrennung

Der Verbrennungsvorgang mit Lambda-Werten $< 1,2$ ist sehr instabil und zeitweise unterstöchiometrisch (Versuch 1999-07-23_1)

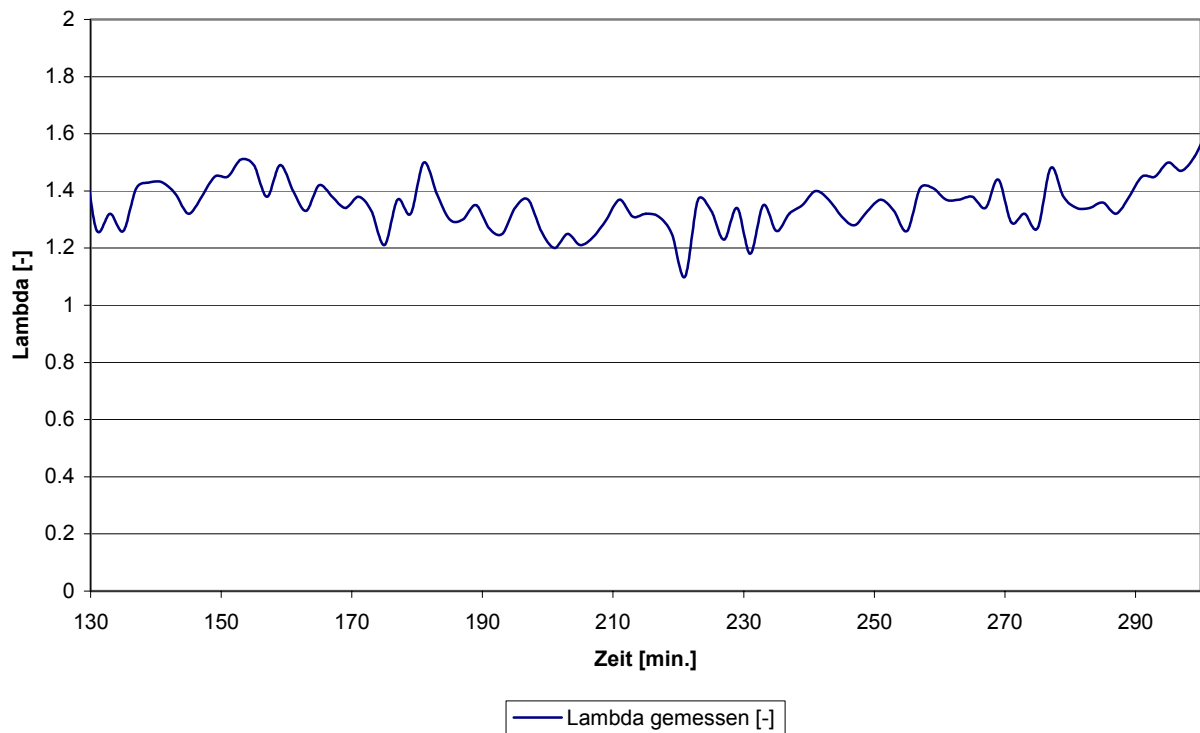


Diagramm 4 Beispiel einer optimierten Verbrennung

Verbrennungsvorgang mit Lambda-Werten um 1,4 zeigt einen stabilen Verbrennungsablauf (Versuch 2001-03-30_1)

In Versuchen konnte ein optimales Betriebsfeld für Lambda eruiert werden. Durch die Häufigkeit der Punkte wird der Bereich zwischen 700 und 1000 °C mit einem Lambda-Wert um 1,4 bis 1,5 nachgewiesen.

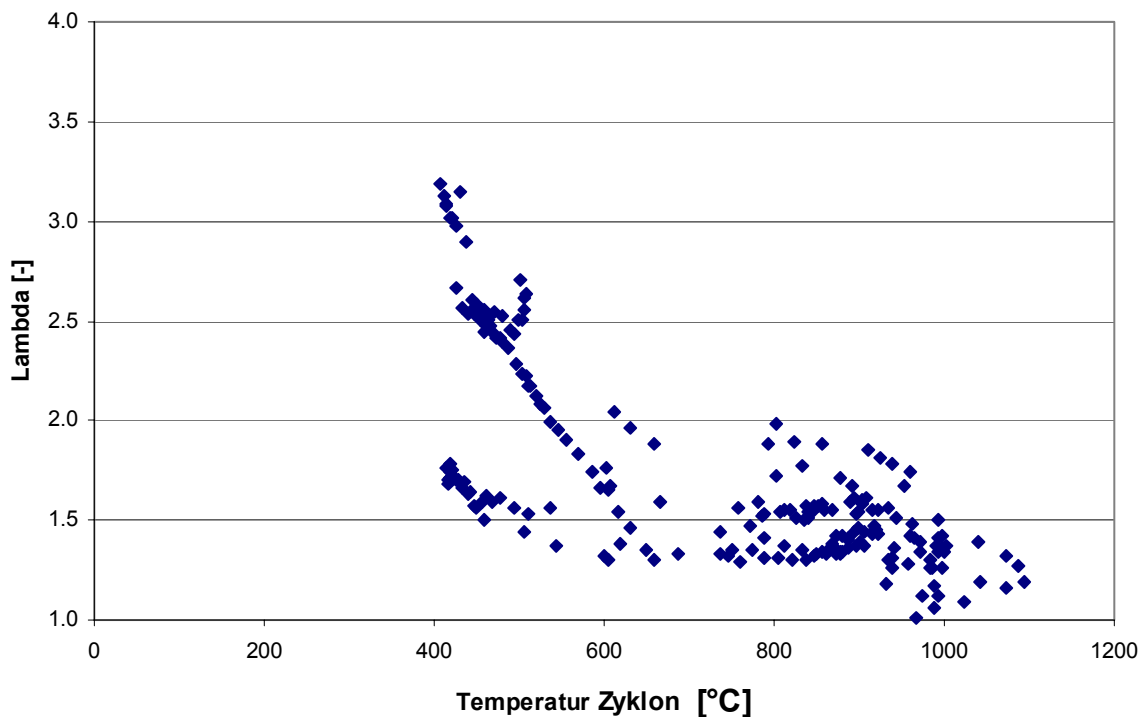


Diagramm 5 Lambda in Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur.

Gut sichtbar der nutzbare Temperaturbereich zwischen 700 und 1000 °C bei Lambda-Werten um 1,4 (Versuch 1999-07-29_1)

6.1.2 Leistung

In einem optimierten Heizsystem liefert der Wärmeerzeuger genau die Menge der momentan benötigten Wärmeenergie. Die stark variierenden Aussentemperaturen würden auch einen modulierenden Wärmeerzeuger voraussetzen.

Bei der Holzverbrennung stellt sich im Gegensatz zur Ölfeuerung eine eigene Problematik: Die Abbrandleistung muss zu Beginn eines Abbrandes hoch gewählt werden, um die Verbrennung möglichst schnell in einen emissionsarmen und stationären Betrieb überzuführen. Diese hohe Leistung kann innerhalb des Abbrandes nur schwer reduziert werden. Ist eine bestimmte Menge Holz einmal im Brand, muss die Leistung langsam reduziert werden. Dabei stellt sich häufig ein Luftmangel ein, welcher die Emissionswerte der Verbrennung wieder erhöht.

So können zwei verschiedene Ideen verfolgt werden: Abbrennen einer Ladung Holz mit exakt der geforderten Leistung oder ein schneller Abbrand des ganzen Holzes mit Speicherung der überschüssigen Energie in einen nachgeschalteten Speicher.

Das Konzept der Klimaflam-Feuerung sieht eine möglichst tiefe Feuerungsleistung mit einem kleineren nachgeschalteten Speicher vor. In den Versuchen konnten minimale Leistungen von ca. 10 kW erreicht werden. Der Wärmeerzeuger wurde aber in diesem Leistungsbereich labil, d.h. die Verbrennungsluft musste exakt dosiert werden, ansonsten die Nachverbrennung nicht mehr aktiviert war.

Die Voraussetzung des Energiebedarfes von 8 kW bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Aussentemperatur zeigt auch, dass mit den erreichten 10 kW immer noch ein Überschuss von Energie vorhanden ist. Im Verlauf der Versuche konnte bei höheren Leistungen eine bessere Konstanz der Verbrennung nachgewiesen werden. Somit wurde die mögliche Leistungsbandbreite zugunsten der verbesserten Emissionen reduziert.

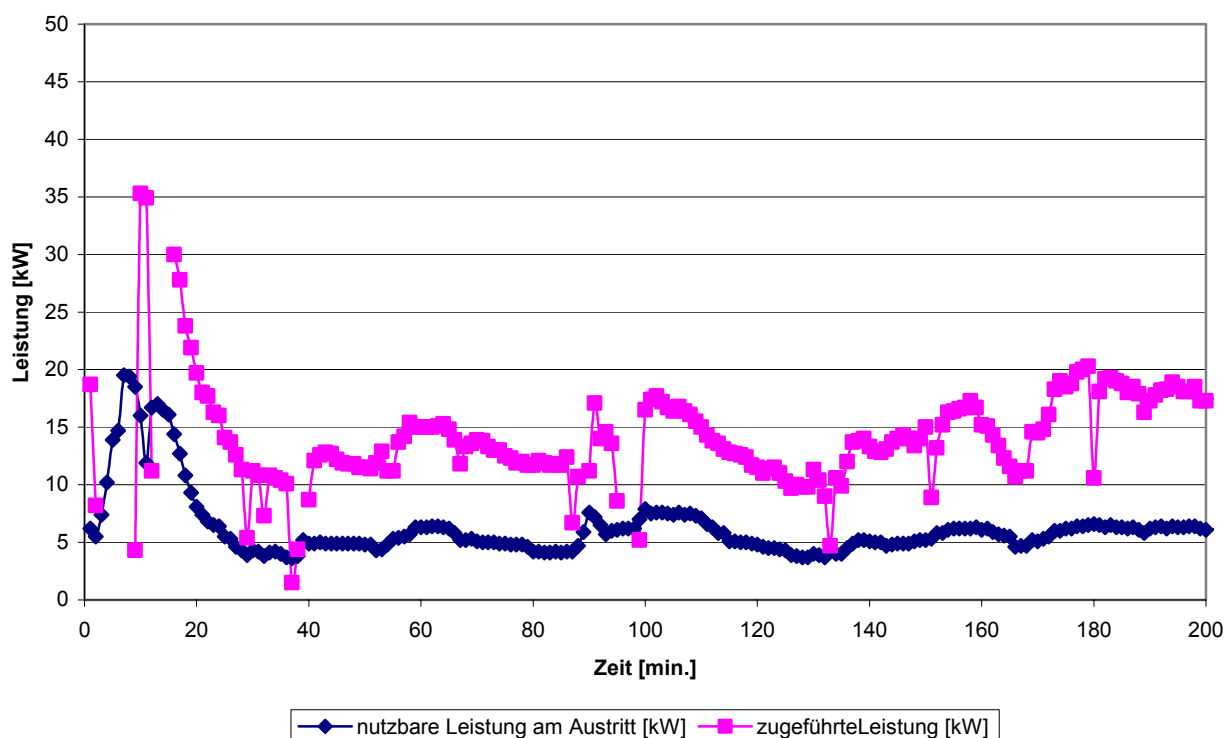


Diagramm 6

Leistungsverlauf eines Versuches mit dem Ziel möglichst tiefer Abbrandleistung

Massiver Unterschied zwischen den beiden Kurven. Bei der nutzbaren Leistung wurde die Temperatur im Zentrum des Nachverbrennungsraumes gemessen, was nicht unbedingt den höchsten Temperaturwert ergeben muss. Die starken Einbrüche in der zugeführten Leistung führen vom Absinken der Lambda-Werte tiefer 1,1 und daraus folgendem Streichen dieser Werte in der Auswertung. (Versuch 1999-07-01_2)

Der eingesetzte Speicher hat genügend Kapazität, um die komplette Feuerungsenergie einer Charge Holz abzuspeichern. Wird das Heizsystem aktiviert, obwohl kein Wärmebedarf vorhanden ist, kann trotzdem alle Verbrennungsenergie direkt in den Speicher eingeleitet werden. Dadurch wird die Anforderung an möglichst geringe Leistung des Wärmeerzeugers hinfällig. Die Leistungsvorgabe für den Wärmeerzeuger kann so nach dem Speicherinhalt definiert werden. Bei leerem Speicher ist die Leistung des Wärmeerzeugers höher als bei vollem Speicher. Ist der Speicher komplett leer und ein Heizungsbedarf vorhanden, kann die volle Leistung am Wärmeerzeuger verlangt werden.

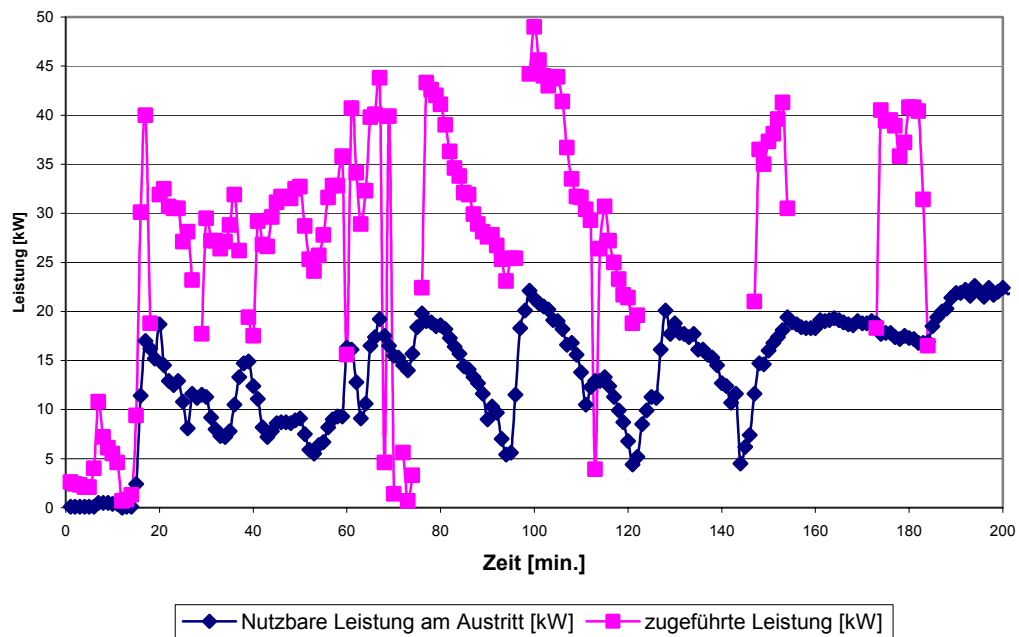


Diagramm 7

Leistungsverlauf eines Versuches mit stark variierender Leistung.

Die Grafik zeigt ein „Pumpen“ des Wärmeerzeugers, welches durch schlechtes Nachregeln der Luftklappen hervorgerufen wird. Die starken Einbrüche in der zugeführten Leistung führen vom Absinken der Lambda-Werte tiefer 1,1 und daraus folgendem Streichen dieser Werte in der Auswertung. (Versuch 1999-07-21_1)

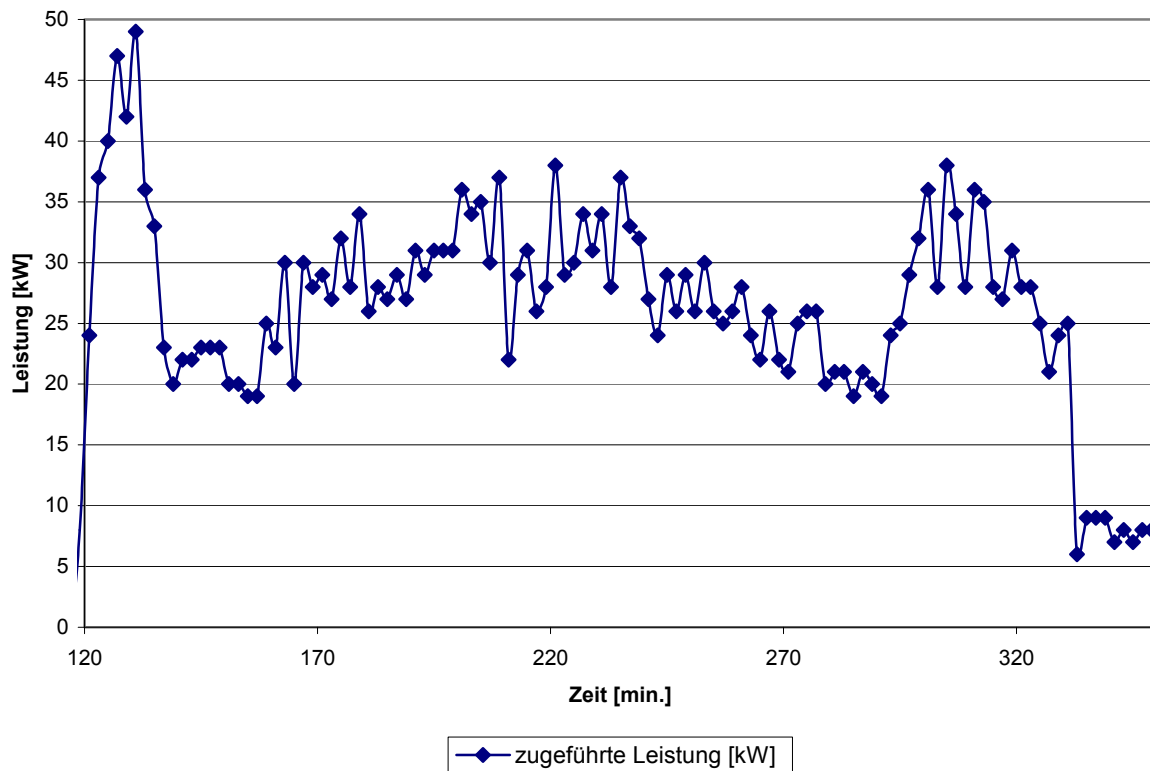


Diagramm 8

Leistungsverlauf eines Versuches mit anfänglich hoher Leistungsabgabe (50kW) und anschliessend während fast 3 Stunden noch ca. 30 kW. Dieser Wert entspricht der durchschnittlichen Leistung in den P + D -Versuchen. (Versuch 2001-03-30_1)

6.1.3 Temperaturen

Zur emissionsarmen Verbrennung wird der Verbrennungsvorgang 2-stufig ausgeführt. In einer ersten Phase wird unter dem Holzstapel ein Glutbeet erzeugt. Damit steht genügend Energie zur Ausgasung des Holzstapels bereit. Die entstehenden Gase werden weitergeleitet und mit Sekundärluft angereichert. Das Gasgemisch wird in einen Zyklon weitergeleitet, durchmischt und emissionsarm verbrannt.

Damit die entstehenden Emissionen tief gehalten werden können, muss neben einer genügenden Verweilzeit und Durchmischung der Rauchgase auch die Temperatur genügend hoch sein. In Versuchen wurde für den WZ I und WZ II eine Minimaltemperatur von 700 °C bestimmt.

Unterhalb dieser Grenztemperatur von 700 °C ist keine Nachverbrennung mehr möglich, die Emissionswerte steigen massiv an. Die entstehenden Gase werden unverbrannt durch den Kamin weitergeleitet.

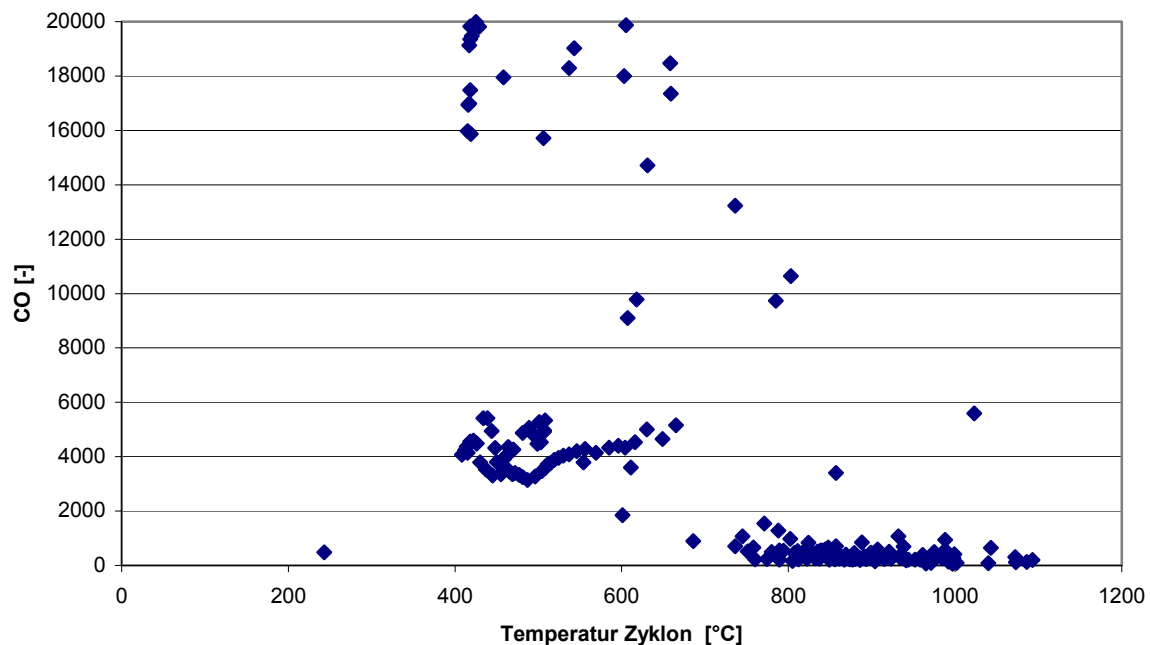


Diagramm 9

Abhängigkeit der Emissionswerte CO gegenüber dem Temperaturbereich.

Zwischen 700 und 1100 °C können die CO-Werte tief gehalten werden.
(Versuch 1999-07-29_1)

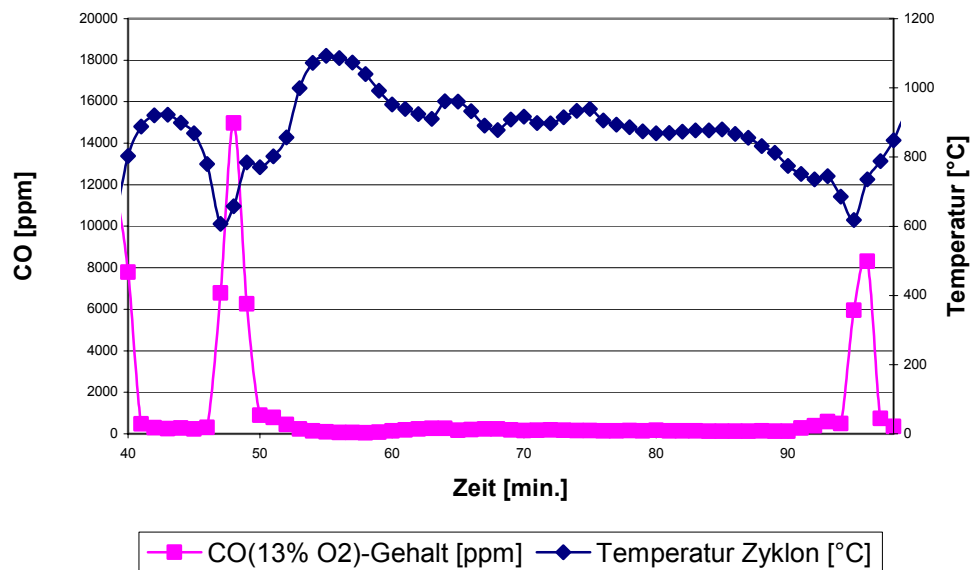


Diagram 10 Zusammenhang der Verbrennungstemperatur mit CO-Emissionen

Sobald die Verbrennungstemperatur unter 700 °C sinkt, steigen die CO-Emissionen massiv an. (Versuch 1999-07-29_1)

Die gemessene Temperatur hat einen direkten Zusammenhang zur gemessenen Leistung. Um den Wärmeerzeuger leistungsmulierend arbeiten zu lassen, wird die Verbrennungstemperatur im Zyklon als Führungsgrösse benutzt. Bei konstanter Verbrennungstemperatur (>700°C) werden konstante Leistungs- und Emissionswerte erreicht.

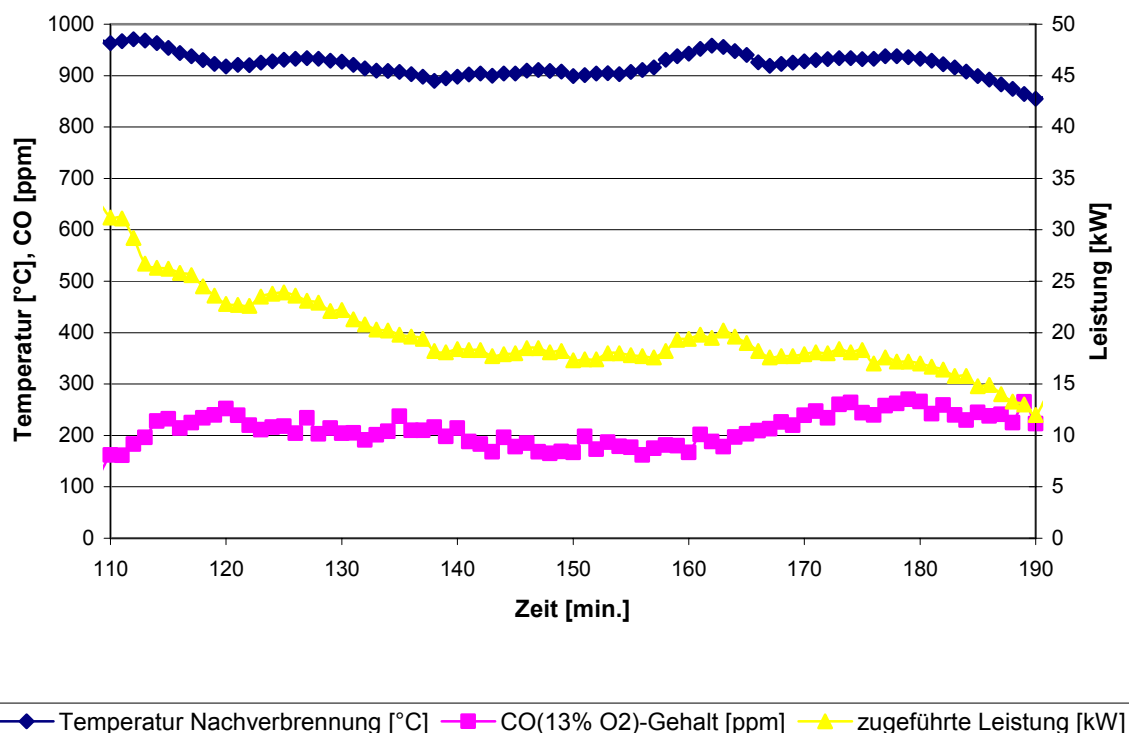


Diagramm 11 Zusammenhang der Verbrennungstemperatur, CO-Emissionen und Leistung

Während die Temperatur und die Leistung ähnlich verlaufen, bleiben die CO-Emissionen von deren Verlauf unberührt (Versuch 1999-07-22_1)

Der Wärmeerzeuger wird von der Steuerung her mit 3 Leistungsstufen betrieben. Optimal ist eine konstante Leistung während des ganzen Abbrandes, damit die Emissionen konstant tief gehalten werden können. Muss die Leistung während eines Abbrandes angepasst werden, muss die Überführung von der einen Leistungsstufe in die nächste Stufe sehr langsam durchgeführt werden. Dabei sind Leistungsreduktionen schwieriger handhabbar als Erhöhungen.

Innerhalb eines Abbrandes legen sich Russpartikel im Feuerraum nieder. Um diese Partikel zu entfernen, wird in der Ausbrandphase der Primärluftanteil erhöht und damit das vorhandene Glutbett erhitzt. So können die niedergeschlagenen Russpartikel ausgeglüht werden. Der Wärmeerzeuger ist so mit einer „Selbstreinigungsfunktion“ ausgestattet.

Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit der Temperatur ist die Kondenswasserbildung. Die entstehenden Kondensate werden z. T. zusammen mit den Russpartikeln abgebrannt. Bestehen bleibt die Problematik aber in kühleren Ecken oder dem Feuer entfernten Orten. Insbesondere in den vorhandenen Hohlräumen wurden in den Versuchen massive Anbackungen festgestellt. An exponierten Stellen, welche vom Benutzer beim Öffnen der Türe einsehbar sind, wurde mit angepassten Geometrien gearbeitet, um die Kondensatbildung zu unterbinden.

6.1.4 Speichersystem

Ziel des Speichers ist die Abpufferung überschüssiger Wärmeenergie. Die Bandbreite des Speichers muss von der Einspeicherung der Energie aus Verbrennungsspitzen bis zur Speicherung eines kompletten Abbrandes reichen.

Für den Benutzer wichtig ist nach dem Anfeuern eine möglichst schnelle Wärmeabgabe über die Strahlungswände. Dazu wurde der Speicher mit zwei verschiedenen Systemen ausgestattet. Neben dem traditionellen Steinspeicher ist ein „schneller Wärmetauscher“ integriert, welcher dem Benutzer bereits kurz nach dem Anfeuern Wärmeenergie zur Verfügung stellt.

Resultate Speicher I

Um das dynamische wie auch das statische Verhalten des Speichers aufzeigen zu können, wurden mehrere Lade- und Entladeversuche gefahren.

Es zeigte sich, dass die Zone A, welche sich direkt nach dem Brenner befand, knapp 2/3 der Energie aufnahm. Dadurch waren die beiden anschliessenden Zonen auf einem tiefen Temperaturniveau. Durch den relativ kleinen äusseren Flächenanteil der Zone A ergab sich eine nicht optimale Wärmeabgabe an die Luft. Mit verschiedenen Varianten der Luftführung konnte jedoch der Wärmeübergangskoeffizient noch erhöht werden. Die Werte lagen zwischen 20 – 50 W/m² K.

Die benötigte Vorlauftemperatur der Warmluft auf die Strahlungskörper beträgt maximal 100°C. Diese Temperatur ist notwendig um den Maximalwärmebedarf bei gegebenen Grössen der Normstrahlungswände zu decken und dies bei einer Luftförderleistung der Gesamtanlage von ca. 400-500m³/h. Dies ergibt eine Speicheroberflächentemperatur beim Warmluftaustritt (Zone A) die immer grösser als 100°C ist. Somit kann der Speicher nicht vollständig entladen werden, respektive deckt die Entladung des Speichers unter diese Temperatur nicht mehr den maximalen Wärmebedarf. Diese „Schwellentemperatur“ wurde als Leitgrösse herangezogen, um Aussagen über die Qualität des Wärmeüberganges (Speicher / Warmluft) zu machen.

Anhand der Bilanzierung der Aufheizversuche zeigte sich, dass der Speicher einen Wirkungsgrad von 90% aufwies.

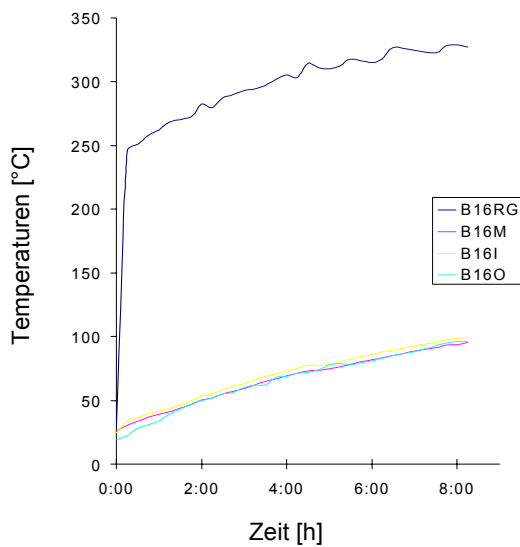


Diagramm 12

Speicher
/Rauchgastemperaturen

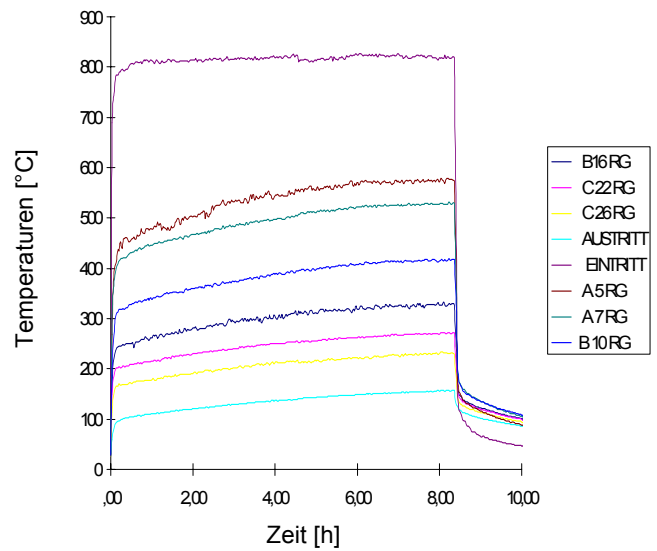


Diagramm 13

Rauchgastemperaturen

Legende:

A5RG	= Zone A	Rauchgas	Messebene 5
A7RG	= Zone A	Rauchgas	Messebene 7
B10RG	= Zone B	Rauchgas	Messebene 10
B16RG	= Zone B	Rauchgas	Messebene 16
B16I	= Zone B	Speicher Innen	Messebene 16
B16M	= Zone B	Speicher Mitte	Messebene 16
B16O	= Zone B	Speicher Aussen	Messebene 16
B16RG	= Zone B	Rauchgas	Messebene 16
C22RG	= Zone C	Rauchgas	Messebene 22
C26 RG	= Zone C	Rauchgas	Messebene 26
Eintritt	= Rauchgas Speicher Eintritt		
Austritt	= Rauchgas Speicher Austritt		

Details zu den Messebenen siehe „Versuchsaufbau / Versuchsanordnung Speicher I“ / Bild 5

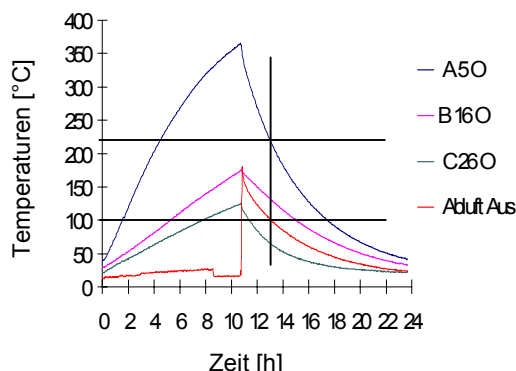


Diagramm 14

Speicher laden / entladen
Oberflächen- und Lufttemperaturen

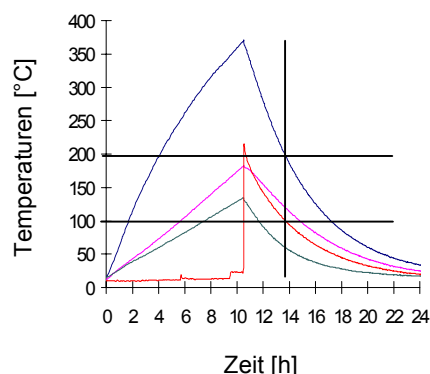


Diagramm 15

Speicher laden / entladen
Oberflächen- und Lufttemperaturen

Legende:

A5O	= Zone A	Speicher Oberfläche	Messebene 5
B16RG	= Zone B	Rauchgas	Messebene 16
C26O	= Zone C	Speicher Oberfläche	Messebene 26
Abluft aus	= Erwärmte Abluft aus Speicher	(Vorlauf Hypokaust)	

In den Diagrammen 12 und 13 ist gut ersichtlich, dass das verwendete Material sehr gut wärmeleitend ist. Dies zeigt sich dadurch, dass innerhalb des Speichersteines in horizontaler Richtung kaum ein Temperaturgradient auftrat. Ein weiterer Hinweis auf die gute Leitfähigkeit des Materials waren die kaum ansteigenden Rauchgastemperaturen bei gleichzeitiger Speicherentladung.

Unbefriedigend waren hingegen die Resultate, die bei der Speicherentladung ermittelt wurden (Diagramme 14 und 15). Es zeigte sich, dass beim Diagramm 15 die erhitzte Luft nicht viel wärmer als die Oberflächentemperatur der Zone B wird. Beim Absinken der Warmluftvorlauftemperatur auf 100°C war die Oberflächentemperatur der Zone A noch über 200°C. Dies entsprach einer Restwärmemenge im Speicher von 183MJ oder der Energiemenge von ca. 12.3 kg Holz. Bei weiteren Versuchen konnte durch Anpassung der Schikanen im Luftmantel die Energieausbeute geringfügig verbessert werden. Die umgesetzten Luftmengen waren bei beiden Versuchen mit ca. 420 m³/h relativ hoch. Dies hat zur Folge, dass bei vermehrtem Einsatz von Schikanen, bzw. Umlenkungen innerhalb des Luftmantels der Druckverlust unverhältnismässig ansteigt.

Ein weiteres Problem war die ungleichmässige Durchströmung der beiden Rauchgaszüge. Derjenige Zug, welcher sich schneller erwärmte und somit mehr Auftrieb bildete, wurde vermehrt mit Rauchgasen durchströmt. Mit Hilfe von Regulierklappen wurde es erst möglich, den Durchsatz beider Züge so zu regulieren, dass der Volumenstrom gleichmässig auf beide Züge verteilt wurde.

Resultate Speicher 2

Durch die Problemstellungen, welche sich aus der Phase 1 ergeben haben, wurde beschlossen, ein neu konzipierter Speicher zu entwickeln, welche die Schwachpunkte eliminieren soll. Der neue Speicher beinhaltet parallel zum Steinspeicher den „schnellen Wärmetauscher“.

Mit dieser verbesserten Konfiguration konnten folgende Resultate gewonnen werden:

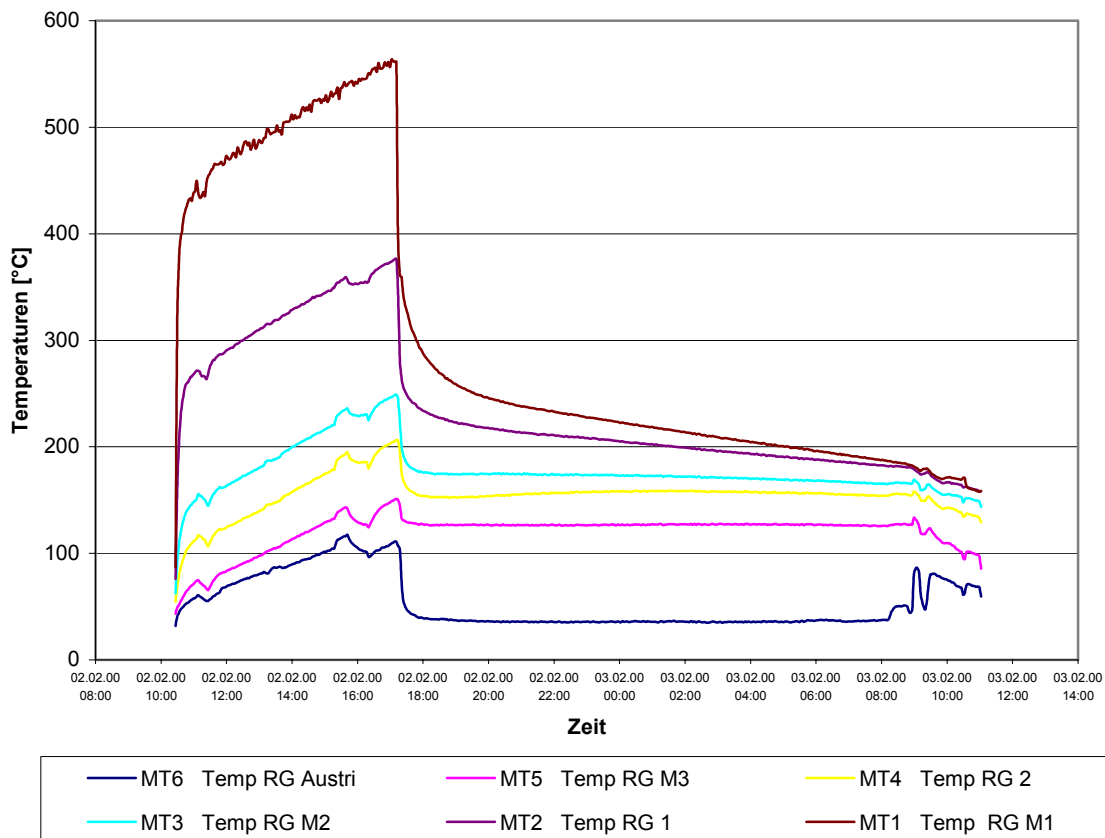


Diagramm 16 Temperaturverlauf innerhalb des Speichers bei einem Ladevorgang. Dabei wird keine Energie entnommen (Versuch 2000-02-02_1)

Legende:	MT1	Temp RG M1	Rauchgastemperatur	Mitte Zone 1
	MT2	Temp RG 1	Rauchgastemperatur	Übergang Zone 1/2
	MT 3	Temp RG M2	Rauchgastemperatur	Mitte Zone 2
	MT4	Temp RG 2	Rauchgastemperatur	Übergang Zone 2/3
	MT5	Temp RG M3	Rauchgastemperatur	Mitte Zone 3
	MT6	Temp RG Austri	Rauchgastemperatur	Speicher-Austritt

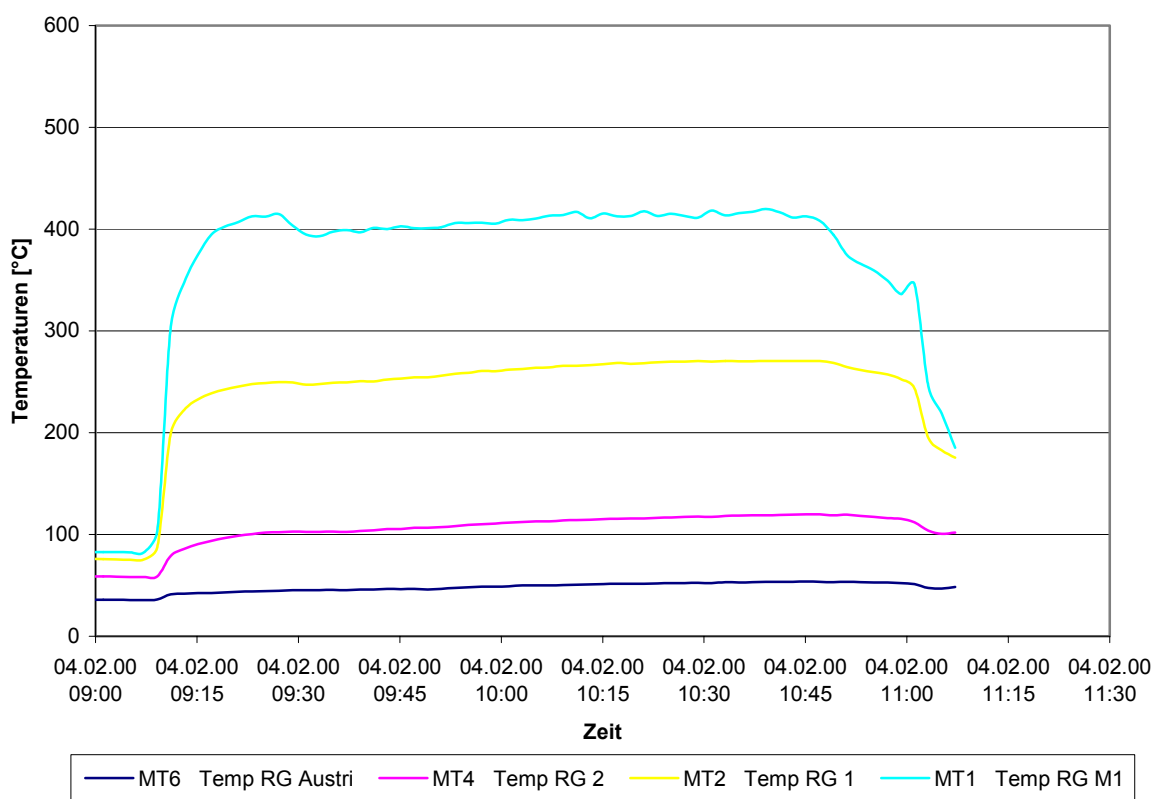


Diagramm 17 Temperaturverlauf innerhalb des Speichers bei einem Ladevorgang mit gleichzeitigem Entladen. (Versuch 2000-02-04_1)

Legende:

MT1	Temp RG M1	Rauchgastemperatur	Mitte Zone 1
MT2	Temp RG 1	Rauchgastemperatur	Übergang Zone 1/2
MT4	Temp RG 2	Rauchgastemperatur	Übergang Zone 2/3
MT6	Temp RG Austri	Rauchgastemperatur	Speicher-Austritt

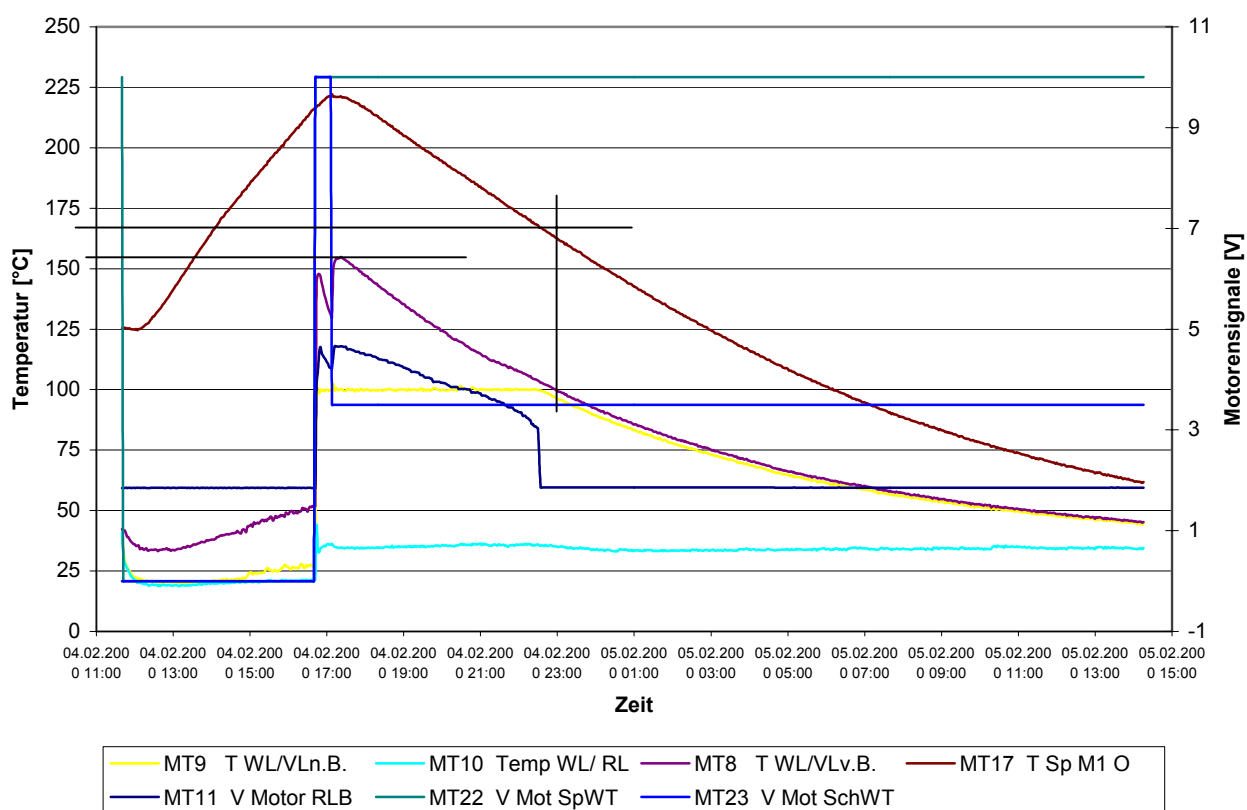


Diagramm 18

Temperaturverlauf Schwellentemperatur Speicher und Vorlauftemperaturen bei einem Ladevorgang ohne Entladung, anschliessend Entladevorgang ohne Ladung. Die Entladung des Speichers erfolgte über den Speicher-Wärmetauscher und nur zu einem sehr kleinen Teil über den schnellen Wärmetauscher. (Versuch 2000-02-04_2)

Legende:

MT9	T WL/VLn.B.	Lufttemperatur Vorlauf nach der Vorlaufbeimischung
MT10	T WL/RL	Lufttemperatur Rücklauf
MT8	T WL/VLv.B.	Lufttemperatur Vorlauf vor der Vorlaufbeimischung
MT17	T Sp M1 O	Speichertemperatur in der Mitte Zone 1, Oberfläche
MT 11, 22, 23		Motorensignale der verschiedenen Mischklappen

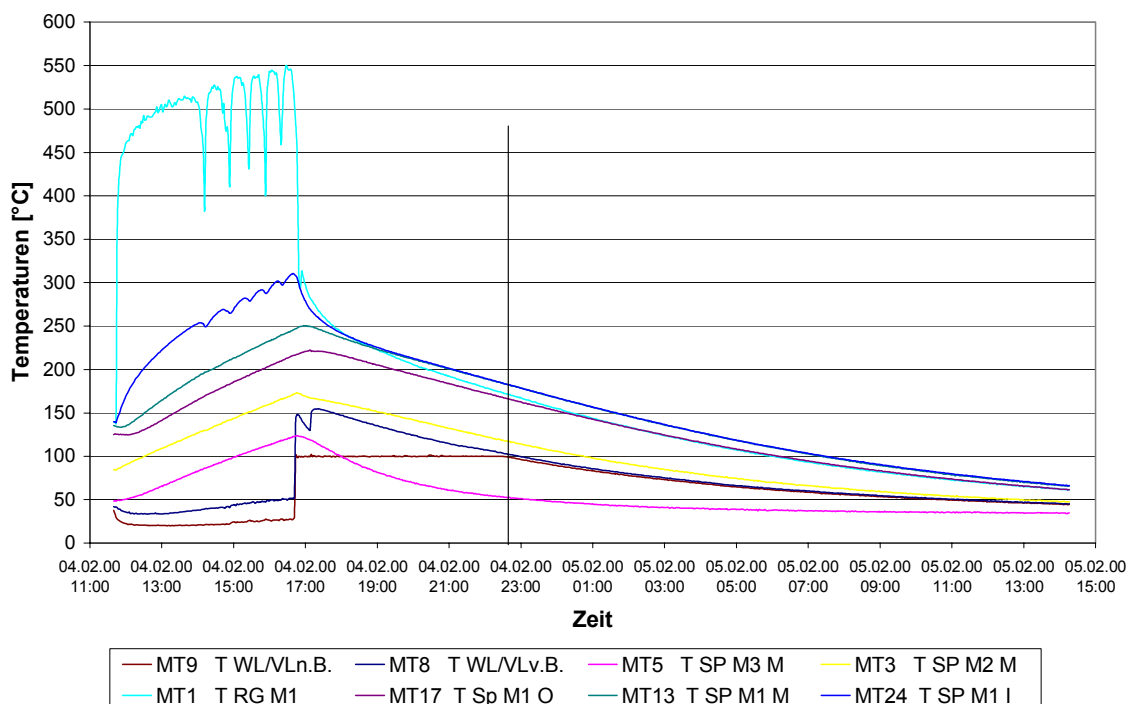


Diagramm 19 Temperaturverlauf von Speicher, Warmluft und Rauchgase bei einem Ladevorgang ohne Entladung, anschliessend Entladevorgang ohne Ladung (Versuch 2000-02-04_2)

Legende:	MT9	T WL/VLn.B.	Lufttemp.	Vorlauf nach der Vorlaufbeimischung
	MT8	T WL/VLv.B.	Lufttemp.	Vorlauf vor der Vorlaufbeimischung
	MT5	T Sp M3 M	Speichertemperatur	Mitte Zone 3 Mitte
	MT3	T Sp M2 M	Speichertemperatur	Mitte Zone 2 Mitte
	MT24	T Sp M1 I	Speichertemperatur	Mitte Zone 3 Mitte
	MT13	T Sp M1 M	Speichertemperatur	Mitte Zone 3 Mitte
	MT17	T Sp M1 O	Speichertemperatur	Mitte Zone 3 Mitte
	MT1	T RG M1	Rauchgastemperatur	Mitte Zone 1

Die Effizienz der Anlage ist insgesamt gut, die Rauchgastemperaturen am Austritt stiegen während der ganzen Versuchsdauer nicht wesentlich über 100°C. Die Kondenswasserbildung muss als klarer Nachteil gewertet werden!

Die Rauchgastemperaturen blieben bei gleichzeitiger Wärmeentnahme über den schnellen Wärmetauscher während der ganzen Versuchsdauer gleichmässig hoch. Die Temperaturen der Rauchgase liegen hier noch wesentlich tiefer als bei reinen Ladeversuchen. Die Schwellentemperatur konnte im Gegensatz noch weiter optimiert werden. Sie liegt beim Speicher II neu bei ca 165°C.

Die Effizienzsteigerung liegt zu einem grossen Teil in der gut gewählten Warmluftführung. Wichtig ist der Einbezug aller Oberflächen, inkl. Boden und Deckel und die gezielte Luftführung (spiralförmig) mit hoher Geschwindigkeit um den Speicherkern. Die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien ist hoch, die Temperaturen innerhalb einer Speicherschicht werden nach dem Ladevorgang sehr schnell ausgleichen.

Das Ansteuern der Motoren für die Mischklappen ist einfach und wird im Betrieb mit entweder/und/oder geregelt: Die Klappenstellungen sind abhängig vom jeweiligen Betriebszustand des Speichers oder und des Wärmeerzeugers. Die Vorlauftemperatur im Hypokaustsystem ist abhängig von der Raumtemperatur und konnte in den Versuchen auch sehr genau geregelt werden. Um eine konstante Leistung des ganzen Systems zu gewährleisten muss auch auf den Warmluft-Gesamtvolumenstrom im System geachtet werden. Die Problematik liegt im Abgleich der Widerstände in den verschiedenen Wärmestrahlwänden und Beimischkanälen.

6.1.5 Anfeuerphase

Innerhalb eines kompletten Abbrandes treten insbesondere in der Anfeuerphase Emissionsspitzen auf. Deshalb muss dieses Zeitfenster möglichst kurz gehalten werden um die Emissionen auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Qualität eines Anfeuervorganges setzt sich aus verschiedenen Faktoren zusammen. Neben der Holzqualität, welche massgeblich für den weiteren Verlauf des Abbrandes verantwortlich ist, muss die Regelung optimale Luftzuführungen ermöglichen.

In Versuchen hat sich folgende Einstellung erwiesen: Zu Beginn des Anfeuervorganges wird die Primärluft vollständig geöffnet. Der bewusst eingesetzte Luftüberschuss hilft, schnell ein Glutbett aufzubauen. Sobald ein Glutbett vorhanden ist, wird der Luftüberschuss kontinuierlich reduziert, bis eine Verbrennung im günstigen Lambda-Bereich stattfinden kann. Durch die elektronische Regelung ist ein solcher Vorgang einfach zu bewerkstelligen.

Mit einem geeigneten Regelungsablauf konnte eine Anfeuerungszeit unter 5 Minuten in einem kalten System erreicht werden. Nach dieser Zeit erreichten die Temperaturen der Nachverbrennungszone bereits Werte von über 700 °C. Somit kann während einer gesamten Abbrandzeit von mehreren Stunden die Zeitdauer der hohen Emissionen auf ein Minimum reduziert werden.

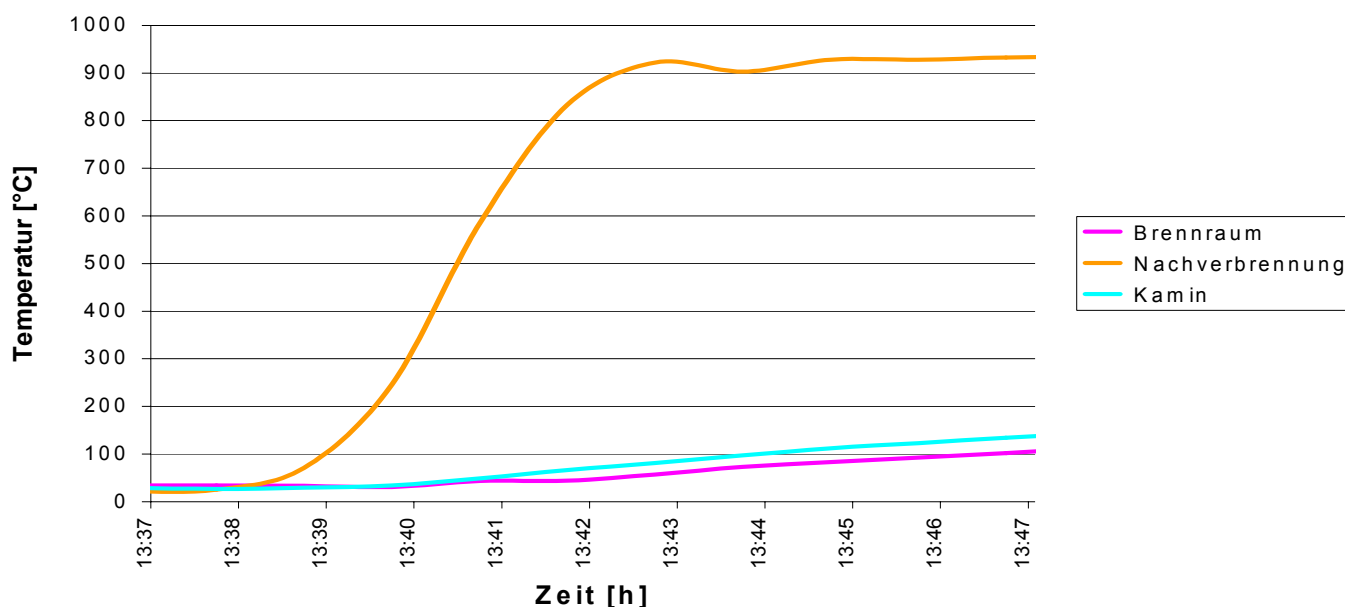


Diagramm 20

Diagramm der Startphase eines Abbrandes in einem kalten System. Beachtlich ist die schnelle Erhöhung auf Betriebstemperatur innerhalb der ersten 5 Minuten. Durch einen am Rande des Primärbrennraumes positionierten Temperaturfühlers ist dieser Wert entsprechend tief.

6.1.6 Abbrandverhalten im Heizfeuer / Regelung

Zur optimalen Unterstützung des Abbrandes wurde ein ganzer Zyklus in verschiedene Abschnitte unterteilt. In den laufenden Versuchen konnten total fünf Zeitabschnitte eingeteilt werden:

1. *Anfeuerphase 1:* Der Start eines kalten Wärmeerzeugers ist mit hohen Emissionsspitzen verbunden. Deshalb gilt es, diese Zeitspanne möglichst gering zu halten. In Versuchen hat sich folgendes Vorgehen als optimal erwiesen:
 - Vollständiges Öffnen der Primärluftklappe
 - Öffnen der Airwashluft zur Grundspülung der Scheibe
 - Sekundärluft geschlossen
 - Anzünden des Holzstapels
 - Startstellung des Kaminventilators

Das Ende der Anfeuerphase 1 ist erreicht, wenn im Sekundärbrennraum die Grenztemperatur erreicht ist.

2. *Anfeuerphase 2:* Mit Übernahme der Grenztemperatur aus der Anfeuerphase 1 wird die Anfeuerphase 2 begonnen. So gilt es, die Primärluft und den Kaminventilator langsam bis auf die geforderte Stufe zu reduzieren. Gleichzeitig wird durch Zugabe der Sekundärluft die Nachverbrennung initialisiert. Von diesem Zeitpunkt an ist auch die Lambdaregelung aktiviert. Der Feuerungsvorgang wird jetzt auf die nächste Phase vorbereitet.
3. *Hauptabbrandphase:* Der grösste Zeitabschnitt innerhalb eines kompletten Abbrandes wird im stationären Betrieb in der Hauptabbrandphase verbracht. Mit den Leistungsvorgaben wird ein möglichst ruhiger und konstanter Abbrand angestrebt. Die Pyrolyse des Holzes, sowie die Verbrennung des entstehenden Gases halten sich im Gleichgewicht. Die Emissionen reduzieren sich während dieser Zeit auf ein Minimum. Gegen Ende der Hauptabbrandphase sinkt die Verbrennungstemperatur im Nachverbrennungsraum wieder ab. Gleichzeitig wird die Zugabe der Primärluft erhöht, um das Absinken der Temperatur zu kompensieren. Bei Überschreiten eines bestimmten Verhältnisses von Primär- und Sekundärluftzugabe wird die Ausbrandphase eingeleitet.
4. *Ausbrandphase:* Durch den erhöhten Primärluftanteil steigt der Lambdawert gegenüber der vorherigen Phase wieder an. Dadurch wird die Sekundärluft reduziert und später komplett geschlossen. Um den hohen Energieinhalt der Holzkohle weiter zu nutzen, wird weiterhin Primärluft von unten her in das Glutbett geblasen. Gleichzeitig wird mittels Zugabe von Airwashluft von oben her das Glutbett mit Luft umstrichen. So findet von allen Seiten her eine Umspülung des Glutbettes mit Luft statt. Unter starker Hitzeentwicklung brennt nun die Glut aus und glüht die Anbackungen im Feuerraum ab. Die CO-Emissionen steigen gegenüber der Hauptabbrandphase an. Nach unterschreiten einer Grenztemperatur ist die Ausbrandphase beendet.
5. *Gluthaltephase:* Nach dem Verbrennen des grössten Kohleanteils sinkt die Temperatur im Verbrennungsraum. Jetzt werden alle luftzuführenden Klappen geschlossen, um die verbleibende Glut möglichst lange aufrecht zu erhalten. Wird neu angefeuert, kann über einen Zeitraum von ca. 12 Std. auf die bestehende Glut aufgelegt werden. Wird dieser Zeitpunkt überschritten, bietet Wärmeerzeuger keine zündfähige Glut mehr.

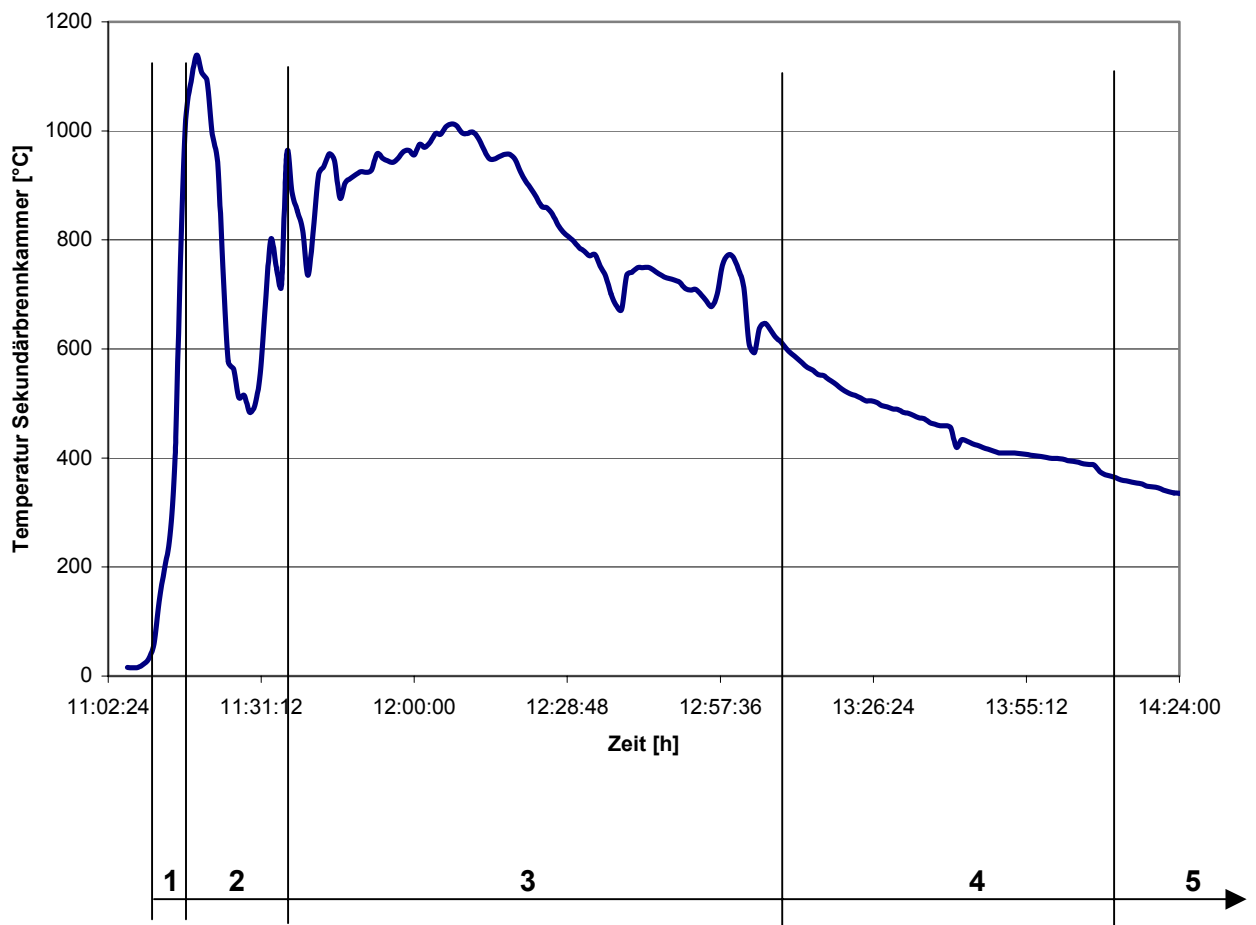


Diagramm 21

Unterteilung eines Abbrandes in die 5 Hauptabschnitte. Während der „Anfeuerphase 2“ in diesem Versuch sinkt die Verbrennungstemperatur nochmals auf einen tiefen Wert (Versuch 2000-01-12_1)

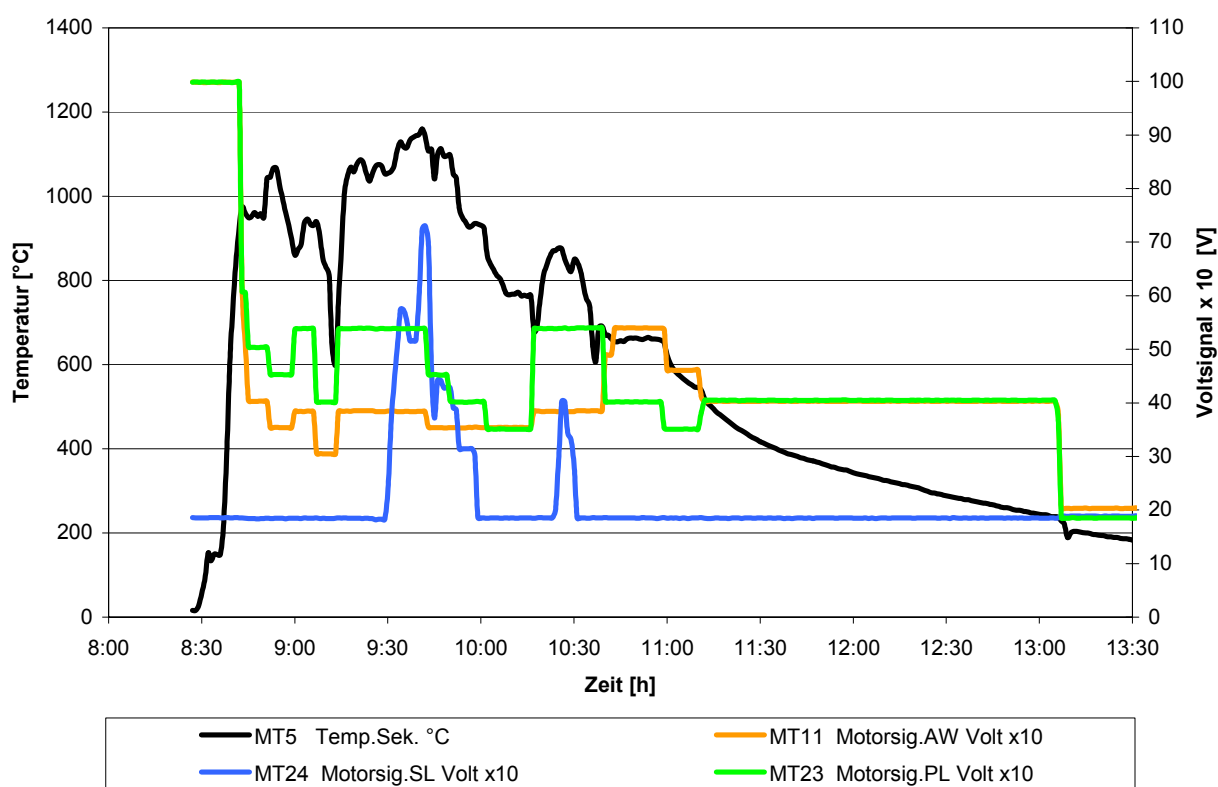


Diagramm 22 Verteilung der Verbrennungsluft auf die 3 Luftzuführungen während eines Abbrandes

Kurven von Primärluft, Sekundärluft und Airwashluft. Das Signal geht von 2 Volt (Klappe geschlossen) bis 10 Volt (Klappe offen). Um ein Beschlagen der Frontscheibe zu vermeiden, wird die Airwashluft auf ein Minimum von 3,5 Volt eingestellt. (Versuch 2000-05-09_1)

Legende	MT5 Temp. Sek	Temperatur im Sekundärbrennraum
	MT11 Motorsig. AW	Klappenstellung Airwashluft
	MT23 Motorsig. PL	Klappenstellung Primärluft
	MT24 Motorsig. SL	Klappenstellung Sekundärluft

6.1.7 Verluste

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, müssen die Verluste auf ein Minimum reduziert werden. Dazu müssen verschiedene Ansatzpunkte beachtet werden:

Verluste durch heiße Rauchgase: Bei Holzfeuerungen mit unregelmässiger Energieproduktion geht allgemein viel Energie in Form von heißen Rauchgasen verloren. Als Faustregel gilt: pro 20°C Rauchgastemperatur resultieren 1 % Wirkungsgradverlust des Systems. Um die Verluste zu minimieren, müssen verschiedene Massnahmen getroffen werden.

Neben den Verlusten durch Strahlung und Konvektion muss möglichst viel Energie zwischen Wärmeerzeuger und Kaminausgang mittels Speicher oder Wärmetauscher abgenommen werden. So kann die Rauchgastemperatur bis knapp über die Kondensationstemperatur der Rauchgase gesenkt werden.

In Versuchen konnten mit der P+D - Anlage Abgastemperaturen hinunter bis 60 °C erreicht werden. Gegenüber dem sehr tiefen Energieverlust steht aber die Kondensation der Rauchgase gegenüber. Das korrosive Kondensat kann Bestandteile der Konstruktion angreifen.

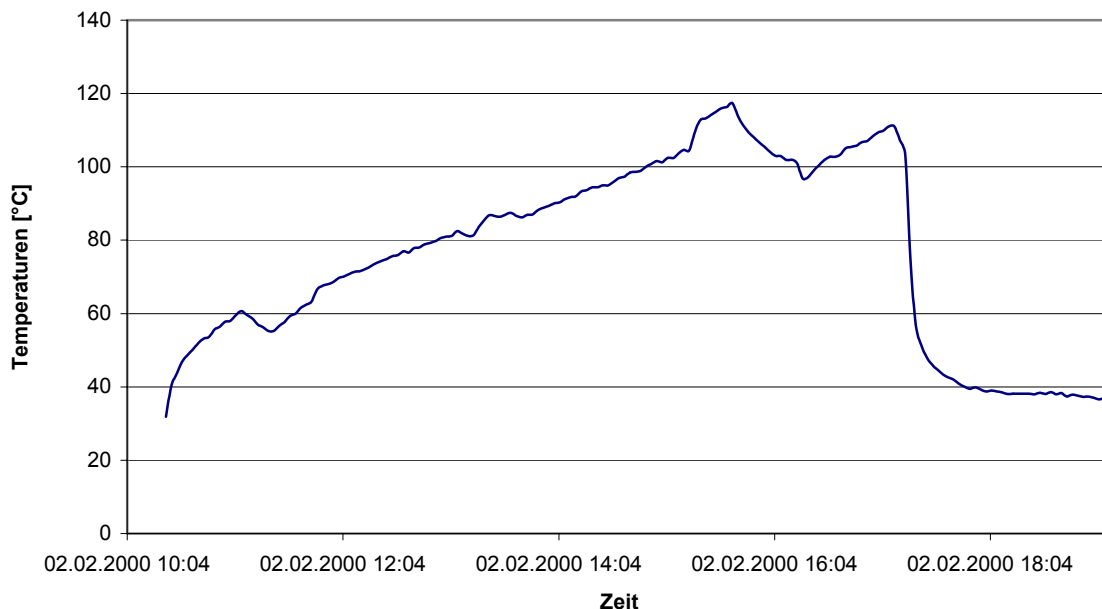


Diagramm 22 Temperaturverlauf der Rauchgase am Ausgang des Speichers. Durch die tiefen Werte traten z. T. Probleme mit Kondenswasser im Kamin auf. (Versuch 2000-02-02_1)

Verluste durch Strahlung: Der hohe Strahlungsanteil durch die Frontscheibe wärmt den Wohnraum unkontrolliert auf. Bei einer Leistung von 160 kW pro m² Glutbett kommt beim Wärmeerzeuger WZ II eine Fläche von ca. 0,1 m² zum Einsatz. Davon wird ungefähr die Hälfte an die Umgebung abgegeben. Übrig bleibt eine Strahlungsleistung von ca. 8 kW, welche in den Wohnraum abgegeben wird. Lösungsansätze mit beschichtete Frontscheiben sind aus Kostengründen gescheitert.

Als optimale Lösung wurde eine im WZ II integrierte Abdeckblende entwickelt. Damit ist gewährleistet, dass der Strahlungsanteil durch die Frontscheibe minimiert wird. Messungen an der Oberfläche der Frontscheibe zeigen, dass die Temperatur 1 Stunde nach dem Start des Feuerungsvorganges bei ca. 40 °C liegt.

Verluste durch Konvektion: Durch die grossen Oberflächen des gesamten Systems steigen auch die Konvektionsverluste. In den Versuchsreihen wurde der Wärmeerzeuger komplett mit Isolit (6 – 9cm) und der Speicher mit Steinwolle (6cm) isoliert. Das Verbindungsrohr zwischen Wärmeerzeuger und Speicher wurde innen mit Keramikfasermaterial (1,5 – 2cm) und aussen mit Steinwolle (3cm) isoliert.

6.2 Komplettanlage im Geer /Steinen

Im Rahmen eines eigenen P+D-Projektes wurden sämtliche Komponenten miteinander installiert und ausgetestet. Dazu wurden die Bauteile in einem Hausteil mit einem Energiebedarf von 5,8 kW (bei Aussentemperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) im Zürcher Oberland installiert.

Grundsätzliches Ziel war die Optimierung der ganzen Anlage betreffend Wirkungsgrad, Emissionen und Bedienerfreundlichkeit. Bis anhin konnten die einzelnen Komponenten nur separat betrachtet werden.

Viele der Resultate und Problemstellungen der kompletten Anlage wurden bereits in vorherigen Versuchen aufgezeigt. In diesem Abschnitt folgen noch Kennwerte der Anlage, welche nur als ganze Einheit möglich sind.

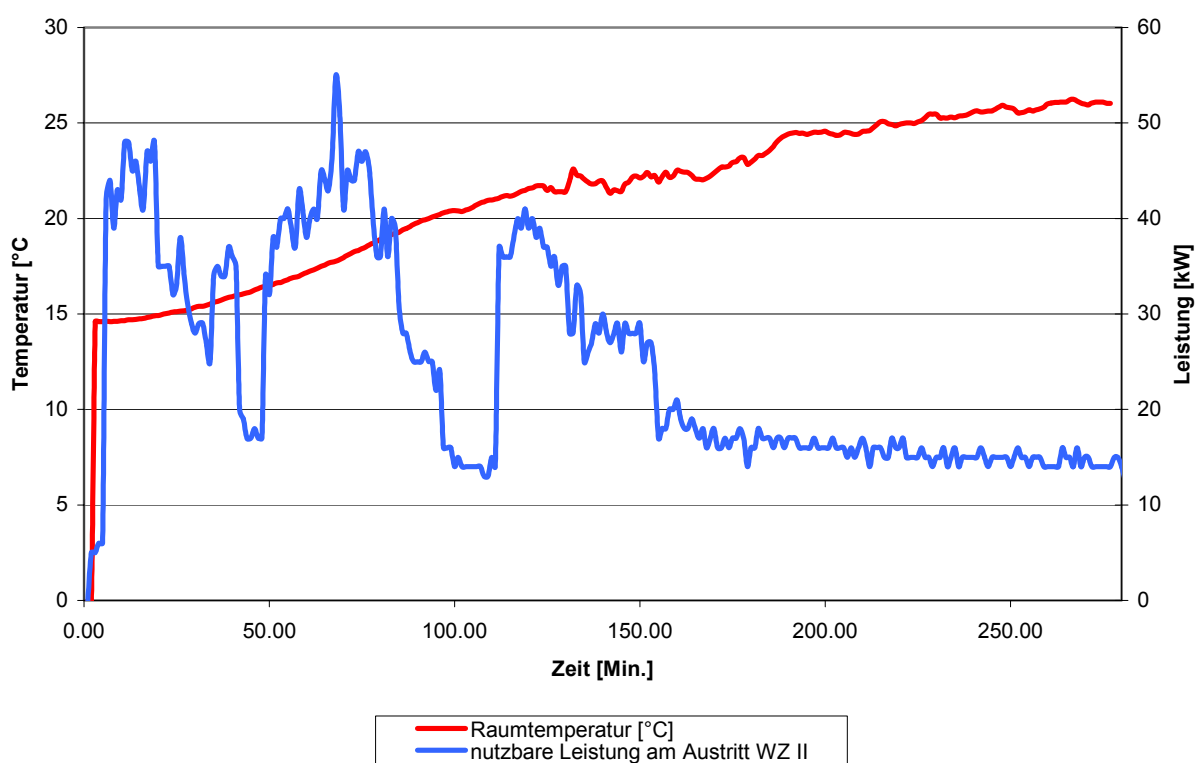


Diagramm 23 Temperaturverlauf im Wohnraum

Bereits nach rund 1,5 Stunden ist der Wohnraum von 14 auf $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt. In diesem Versuch erfolgte keine kontrollierte Überwachung der Raumtemperatur, es wurde die stetige Zunahme der Temperatur getestet (Versuch 2000-05-09_1)

Die Anlage im Geer zeichnet sich durch einen sehr hohen Systemwirkungsgrad aus ($>90^{\circ}$). Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn das System von Raumtemperatur (Speicher entladen) auf Betriebstemperatur (Erreichung der Schwellentemperatur, siehe Ergebnisse Speicher I und II) aufgeladen wird. Der Wirkungsgrad ist ebenfalls unvermindert hoch, wenn nur der Speicher aufgeladen wird und nicht gleichzeitig Wärme zur Bedarfsdeckung entzogen wird.

Bestätigt wurde in der P+D - Anlage der hohe Wärmeverlust des Wärmeerzeugers. Dabei werden ca. 30% der Gesamtleistung über das Gehäuse abgegeben. Dieses Resultat entspricht nicht den geforderten Zielen vom Pflichtenheft, in welchem man durch die massive Wärmedämmung eine maximale Wärmebereitstellung für den Speicher und Wärmetauscher definierte. Dabei handelt es sich aber nicht um echte Verluste, da die Energie immer noch im Wohnraum zur Verfügung steht. Der grosse Nachteil liegt darin, dass diese Wärmeenergie nicht mehr in das aktive und bedarfsorientierte Wärmeverteilsystem eingebunden werden kann. Zudem fällt diese Energie auch an, wenn sie vom Betreiber der Anlage nicht gebraucht wird. Dieser Energieverlust wird nicht über Strahlung oder Konvektion direkt an den Raum abgegeben, sondern wird zu grossen Teilen im Wärmeerzeuger eingespeichert.

Mittels Hochrechnung wurde eine Energieeinspeicherung in den Wärmeerzeuger von 16 kWh über den ganzen Versuch ermittelt. Die Wärmedämmung des Wärmeerzeugers erreicht über eine Versuchsperiode eine durchschnittliche Oberflächentemperatur von 60°C. Das ergibt eine Abgabeleistung über die Oberfläche (5,8m²) von ca. 3,2 kW. Diese Wärmeleistung wird aber nicht direkt an den Wohnraum abgegeben, sondern wird im Hohlraum der Gesamtanlage (Grundkörper GK) zwischengespeichert. Auch vom Speicher wird über dessen wärmegeämmte Oberfläche (trotz durchschnittlich 40°C) und die Luftkanäle für den Hypokaustenvorlauf noch Wärme in diesen Hohlraum abgeben.

Die Oberfläche des Grundkörpers (Mantel aus Gasbetonsteinen, 7,5cm) wurde nicht höher als Raumtemperatur erwärmt. Somit kann angenommen werden, dass ein Teil der in diesen Hohlraum abgegebenen Wärme über die Warmluftleitungen doch gezielt in das System eingetragen wird (Rückkoppelung).

Die Front des Wärmeerzeugers ist, abgesehen von den Strahlungswänden, die grösste Wärmequelle direkt in den Wohnraum. Die errechnete Wärmeleistung ergab eine Energieabgabe von 1,1 kW im Heizfeuerbetrieb.

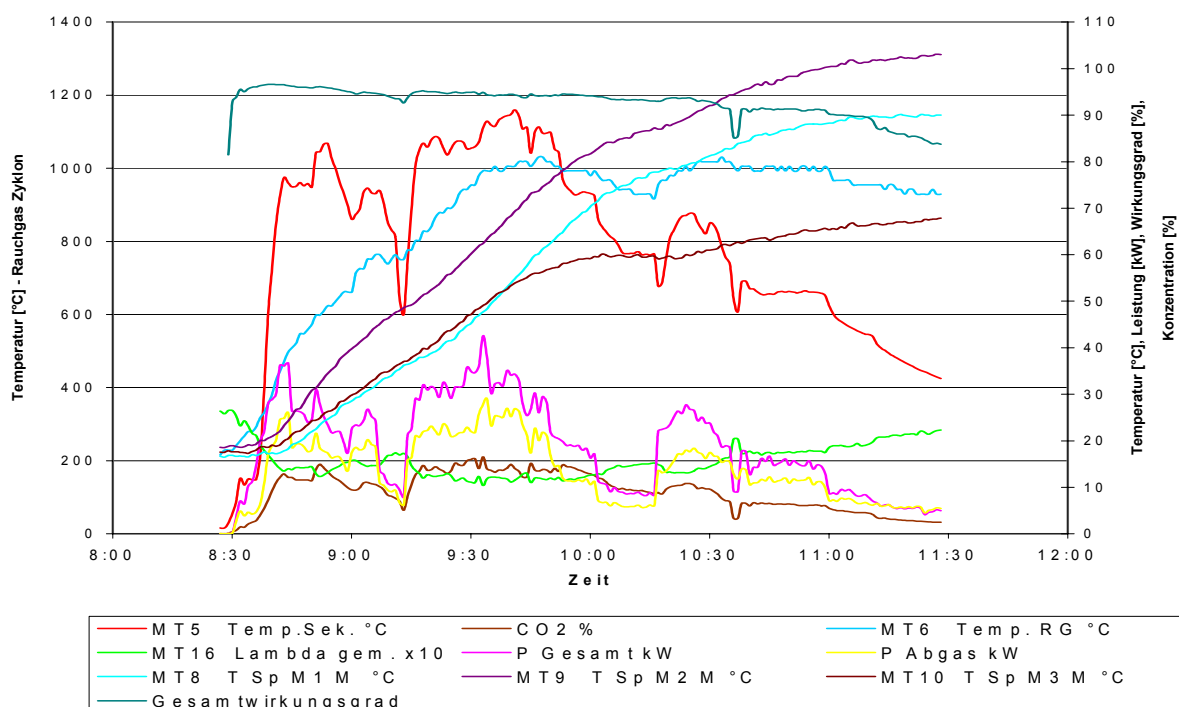


Diagramm 24 Versuch der P+D - Anlage, Temperaturverlauf von Speicher und Rauchgase, Verlauf der Leistungen und Systemwirkungsgrad bei einem Ladevorgang ohne Entladung, (Versuch 2000-05-09_1)

Legende:	MT5 Temp. Sek. °C	Rauchgastemperatur Nachverbrennung
	CO2 %	CO2- Konzentration im Abgas
	MT6 Temp. RG °C	Rauchgastemperatur Systemaustritt
	MT16 Lambda gem. x10	Lambda (Werte müssen durch 10 geteilt werden)
	P Gesamt kW	zugeführte Leistung
	P Abgas kW	Abgasleistung (erm. über Wärmeinhalt Abgas nach WZ)
	MT8 T Sp M1 M °C	Speichertemperatur Mitte Zone 1 Mitte
	MT9 T Sp M2 M °C	Speichertemperatur Mitte Zone 2 Mitte
	MT10 T Sp M3 M °C	Speichertemperatur Mitte Zone 3 Mitte
	Gesamtwirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad ermittelt nach DIN

Die in diesem Versuch bis zum Messende ermittelte, dem ganzen System zur Verfügung gestellte Wärmemenge betrug 56.7kWh. Davon wurden 39,7kWh dem Speichersystem weitergeleitet, welches bis auf einen Abgasverlust von 2.3kWh alle Energie einspeicherte. Die gesamte Energiemenge entspricht etwa 13kg Holz (w=10.9%). Diese Menge reichte aber nicht aus, um die geforderte „Schwellentemperatur“ des Speichers zu überschreiten (Speichertemperatur, Zone 1 Mitte, am Ende nur 90°C). Die Gesamtleistung der Anlage überstieg dabei nur über kurze Perioden die 30kW-Grenze.

7 Offene Probleme / Diskussionen / Ausblick

Durch die komplexe Thematik haben sich viele Problemstellungen ergeben. In den meisten Fällen konnte eine Lösung gefunden werden. Trotzdem bleiben Punkte offen, bei welchen sich eine Diskussion lohnt.

7.1 Wärmeerzeuger

7.1.1 Reduktion der Wärmeverluste

Durch die hohen Verbrennungstemperaturen im Sekundärbrennraum erwärmt sich der Wärmeerzeuger trotz Isolation auch an der Aussenhülle. Da das ganze System aber im Wohnraum installiert ist, geht die Energie nicht verloren, sondern wird unkontrolliert abgegeben. Bei beengten Platzverhältnissen muss ein Kompromiss in der Wärmedämmung gefunden werden. Vielleicht müsste die im Vorfeld angesprochene Systemvariante 2 weiterverfolgt werden.

7.1.2 Sichtfeuer

Der Wärmeerzeuger ist zur Abschirmung der Strahlung in den Wohnraum mit einem Doppelglas ausgestattet. Damit wird ein maximal möglicher Schutz erreicht.

Abzuwägen bleiben neuartige Gläser mit Metallbedampfungen, welche sehr hohe Strahlungsanteile zurückhalten können. Damit könnte sich ein besserer Kompromiss ergeben. Dieser Weg wurde zum Zeitpunkt der Versuche wegen zu hohen Kosten nicht weiterverfolgt.

7.1.3 Serielle Umsetzung

Für die Produktion des Wärmeerzeugers müssen klar Vereinfachungen der Blechteile angestrebt werden. Der Versuchsaufbau wurde bereits mit entsprechender Voraussicht geplant und lässt sich für eine serielle Umsetzung einfach abändern.

7.1.4 Konzeption / Grösse

Die komplette Einheit mit einem wärmegeprägten Wärmeerzeuger und von diesem getrennten Speicher nimmt erheblich Platz im Wohnraum ein. Zur besseren Integration sind auch Lösungen mit einem Speicher im Kellerraum möglich. Wichtig ist eine attraktive „Verpackung“ des ganzen Systems, um dem Benutzer ein wohnliches Gefühl zu geben. Des weiteren wird viel Platz für die Luftführung im System benötigt. Da die Luft gezielt an die einzelnen Komponenten vorbeigeführt werden muss, sind entsprechende Luftleitungen notwendig. Das weiterverfolgen der Systemvariante 2 würde Abhilfe bringen.

7.1.5 Zugänglichkeit zu den Elementen

Im Testbetrieb hat sich gezeigt, wie wichtig der offene Zugang zu den einzelnen Komponenten ist. Durch den modulartigen Aufbau ist der Kunde relativ frei in der Gestaltung und Platzierung der Anlage. Wichtig ist die Montage von entfernbaren Abdeckung an den entsprechenden Stellen.

7.1.6 Design

Mit dem eingesetzten Prototypen „WZ II“ wurde bereits ein ansprechendes und den beteiligten Personen gefälliges Design entwickelt.

Der Wärmeerzeuger als Grundkörper bietet aber Potential auch für andere Ideen. Solange die Technik im Hintergrund unberührt bleibt, können am Chassis und im Innenraum Änderungen durchgeführt werden.

7.1.7 Leistungsregelung

Durch den Einsatz von Stückholz gestaltet sich eine Leistungsregelung während dem Abbrand als schwierig. Generell angestrebt werden aber möglichst bedarfsgerechte Leistungen, welche im Falle eines Niedrigenergiehauses nur noch wenige kW betragen. Somit könnte auf einen Speicher verzichtet werden.

7.1.8 Variabilität

Konstruktionsbedingt wird das Rauchgasrohr am Wärmeerzeuger an der Seite herausgeführt. Dadurch ergibt sich auch die Lage des Speichers. Denkbar ist der Bau von sog. linken und rechten Geräten, um alle Anwendungen abzudecken. Bei der Konstruktion des Wärmeerzeugers wurde bereits versucht, mit möglichst viel gemeinsamen teilen auszukommen.

7.1.9 Integration mit anderen Systemen

Durch die Kombination mit dem Steinspeicher und den Wärmestrahlwänden ergibt sich eine klassische Hypokaustanlage. Der Wärmeerzeuger kann aber auch mittels einem Wasserwärmetauscher versehen werden und so weitere Bedürfnisse abdecken. Bei der Programmierung der Regelung wurden solche Konstellationen miteinbezogen.

7.2 Speicher / Wärmeverteilung und –Abgabe

7.2.1 Materialwahl

Um möglichst viel Energie in ein kompaktes Volumen zu bringen, sind Speichermaterialien mit einer hohen Speicherdichte gesucht. Hier musste ein Kompromiss zwischen Materialwahl und Kosten eingegangen werden. Sicher wird es in Zukunft neuere Materialien geben, welche auch kostengünstiger eingesetzt werden können.

7.2.2 Modularer Aufbau

Durch den modularen Aufbau des Speicher kann das System an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden. Im Versuchsaufbau wurden lieferbare Dimensionierungen verwendet. Für einen seriellen Einsatz sind aber wählbare Dimensionen beim Hersteller denkbar.

7.2.3 Wärmeabgabe an Medium Luft

Mit Luft als Wärmeträgermedium wird der Wärmeübergang um ein Mehrfaches schwieriger als mit Wasser. Im Versuchsaufbau wurde die nutzbare Fläche mit dem Einsatz von Luftleitblechen maximiert. Mit eigens gegossenen, modulartigen Speicherelementen kann diese Technik auch integriert werden.

7.2.4 Reinigung

Durch den erhöhten technischen Aufwand beim Speicher wie auch beim Wärmeerzeuger gestaltet sich die Reinigung entsprechend schwieriger. Wichtig ist, neben der Vermeidung von Russ bereits bei der Verbrennung, an den Schlüsselstellen die Reinigungsöffnungen vorzusehen.

7.2.5 Dichtigkeit

Mit dem komplexeren Aufbau ist der Speicher klar anfälliger gegenüber Dichtungsproblemen. Im Versuchsbetrieb haben sich Schwachstellen gezeigt, welche sich mit entsprechenden Massnahmen beheben liessen. Eine fachgerechte Montage ist in jedem Fall zwingend.

7.2.6 Platzbedarf

Durch die aufwendige Speicherkonstruktion ist der Platzbedarf des Systems angestiegen. Hier gilt es, die gesteigerte Leistung mit dem erhöhten Platzbedarf in ein Gleichgewicht zu bringen. Gegenüber dem Versuchsspeicher ist noch Entwicklungspotential vorhanden.

7.2.7 Handhabung / Installation für das Gewerbe

Die Installation muss in jedem Fall durch das traditionelle Hafnergewerbe ausgeführt werden können. Das notwendige Wissen kann in Schulungen weitervermittelt werden.

7.3 Regelung

7.3.1 Kosten

Im Versuchsaufbau wurde eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) eingesetzt. Durch die höheren Kosten der SPS verteuert sich aber das Gesamtsystem. Die SPS ermöglicht durch ihren flexiblen Aufbau vielfältige Variationen für das gesamte Heizsystem. Für grössere Stückzahlen ist eine Adaption der Software in eine Lösung mittels Mikroprozessor möglich.

7.3.2 Sicherheiten

Mit den programmierten Notfallszenarien kann die Regelung möglichen Defekten der Sensorik entgegenwirken. Trotzdem sind Situationen denkbar, wo mutwillig eine Überbrückung der Sensorik stattfindet.

Verbessert werden kann eine mögliche Situation bei Stromausfall durch den Einbau von Akkumulatoren.

7.3.3 Sensorik

Die eingesetzten Sensoren und Aktoren haben sich im Versuchsbetrieb bewährt. Trotzdem ist aus Kosten- und Lieferbarkeitsgründen der Einsatz anderer Produkte möglich. Durch die universellen Aufnahmepunkte kann von Seiten des Speichers und des Wärmeerzeugers eine Plattform für verschiedene Typen geboten werden.

7.3.4 Elektromagnetische Verträglichkeit EMV

Die höhere Dichte von elektrischen und elektronischen Geräten im Haushalt führt zu neuen Problemstellungen. Die eingesetzte SPS erfüllt die einschlägigen EMV-Normen und stellt so keine Gefährdung dar. Für die verwendeten Elektromotoren müssen entsprechende Abklärungen noch getätigt werden.

7.3.5 Platzbedarf

An der Versuchsanlage wurde die komplette Elektronik in ein Schaltschrank montiert, einzig das Display wurde in den Wohnraum ausgelagert. Durch die minimalen Abmasse des Displays kann überall eine Montage erfolgen. Offen bleibt eine allfällige Verbesserung des Designs.

7.3.6 Kabelführung

Die hohe Anzahl an Sensoren und Aktoren bringen eine beträchtliche Menge an Kabel mit. Für einen Serieneinsatz muss ein vieladriges Kabel konfektioniert werden, welches sämtliche Elemente abdeckt. Speziell zu achten ist auf eine genügende Abschirmung.

7.4 Gesamtsystem

7.4.1 Kosten

Durch den komplexen Aufbau der gesamten Anlage sind auch die Kosten entsprechend gestiegen. Erwartet werden darf ein „Öko-Bonus“ von Benutzerseite, welche ökologische Produkte bevorzugen und ein höheres Preisniveau akzeptieren. Trotzdem muss der Kostenreduktion eine hohe Priorität eingeräumt werden.

7.4.2 Lärm

Durch den Einsatz des Hypokausten-Ventilators ergeben sich Laufgeräusche des Lüfterrades. Was in einem Testraum kaum wahrnehmbar ist, kann sich in einem Wohnraum durchaus als störende Lärmquelle darstellen. Für die Serie sollten weitere Schalldämmmassnahmen durchgeführt werden.

8 Symbolverzeichnis

λ	Lambda	Luftüberschuss bei der Verbrennung
V	Volt	Spannung
W	Watt	Leistung
CO	Kohlenmonoxid	Anteil CO in ppm
CO ₂	Kohlendioxid	Anteil CO ₂ in Prozent
O ₂	Sauerstoff	Anteil O ₂ in Prozent
ppm	parts per million	
$\dot{V}$	Volumenstrom pro Zeiteinheit	
h _u	unterer Heizwert	Energieinhalt eines Mediums
L _{min}	stöchiometrischer Luftbedarf	Minimaler Luftbedarf zur vollständigen Verbrennung
Pa	Druck	Unterdruck im Kamin

9 Literaturverzeichnis

- | | | |
|----------|---|---------------------|
| [Lit. 1] | Regelung einer Stückholzfeuerung
Abhandlung zur Erlangung
des Dokortitels der Naturwissenschaften | Dieter Kerschbaumer |
| [Lit. 2] | Verbrennungstechnik

Einführung in die Verbrennungstechnik
und Anwendungen von Holzfeuerungen,
Vorlesung HTL Biel | Thomas Nussbaumer |

10 Anhang

10.1 Berechnungen / Formeln

Stöchiometrischer Luftbedarf

$$\text{Lambda} \quad \lambda = \frac{20,4}{CO_2[\%] + CO[\%]} [-]$$

Emissionen

$$\text{Kohlenmonoxid} \quad CO_{(13\%O_2)} = \frac{C_{gemessen}[ppm] * O_2[\%]}{13} [ppm]$$

Leistungsberechnung

Um die effektive Leistung des Wärmeerzeugers online zu messen, kamen zwei verschiedene Modelle zum Einsatz:

1. **Zugeführte Leistung:** Messung von Lambda und des Luftvolumenstromes am Eingang; Rückrechnung auf den stöchiometrischen Luftbedarf und damit das verbrannte Holzgewicht

Nachteil: Lambda-Signal reagiert verzögert (ca 30 Sek. durch Position innerhalb des Kamins), mögliche Fehler bei der Messung des Volumenstroms der Luft

$$\text{Zugeführte Leistung} \quad P = \frac{\dot{V}[\frac{m^3}{h}] * h_u[\frac{kJ}{kg * K}]}{\lambda[-] * L_{min}[\frac{m^3}{kg}] * 3600} [kW]$$

2. **Nutzbare Leistung am Austritt Wärmeerzeuger:** Messung der Verbrennungstemperatur im Sekundärbrennraum und des Luftvolumenstromes am Eingang, Rückrechnung auf benötigte Energie zur Erwärmung des Luftmassenstromes

Nachteil: Temperatursonde nicht mit Sicherheit am heissesten Punkt in der Verbrennungskammer, mögliche Fehler bei der Messung des Volumenstromes

$$\text{Nutzbare Leistung am Ausgang} \quad P = \frac{\dot{V}[\frac{m^3}{h}] * \Delta T[K] * \rho_{Luft}[\frac{kg}{m^3}] * c_{p, Luft}[\frac{kJ}{kg * K}]}{3600} [kW]$$

10.2 Stellglieder / Sensorik

Folgende Sensoren und Aktoren werden im Versuchsaufbau des Klimaflam-Systems verwendet:

10.2.1 Wärmeerzeuger und Zubehör KLIMAFLAM

<u>Funktion</u>	<u>Stück</u>	<u>Typ</u>	<u>Reglersignal</u>
Temperatur Rauchgas (nach Sekundärbrennkammer) Kontrolle Nachverbrennung	1	Thermoelement Typ K mit Keramikschutzrohr inkl. Messumformer	Regler Input analog 0..10 [V]
Lambda-Sonde Überwachung der Verbrennungsqualität, Stellgrösse Sekundärluftmenge	1	Bosch Typ 0 258 104 002 Leistungsaufnahme 18 W	Regler Input analog 3,5 .. 68 [mV]
Türkontakte Sicherheitsschalter für Türöffnung, Initialisierung des Regelprozesses	2	0/1 – Schalter Potentialfrei	Regler Input digital 0/1
Klappenstellmotor Primärluft Leistungsregelung	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung, Federrückstellend Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output analog 0 .. 10 [V] Rückmeldung Regler Input analog 0 .. 10 [V]
Klappenstellmotor Sekundärluft Lambdaregelung	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output analog 0 .. 10 [V] Rückmeldung Regler Input analog 0 .. 10 [V]
Klappenstellmotor Airwashluft Scheibenreinigung, Lambda-regelung im Sichtfeuertrieb	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output analog 0 .. 10 [V] Rückmeldung Regler Input analog 0 .. 10 [V]
Rauchgasventilator Regulierung Unterdruck, Absaugung bei geöffneter Türe	1	Versorgungsspannung 220 Volt, drehzahl geregelt mit Frequenzumformer Leistungsaufnahme 180 W	Regler Output analog 0..10 [V] Rückmeldung Regler Input digital I/O

10.2.2 Speichersystem

<u>Funktion</u>	<u>Stück</u>	<u>Typ</u>	<u>Signal</u>
Temperatur Speicher Bestimmung Speicherlade- stand	1	Thermoelement Typ K Inkl. Messumformer	Regler Input analog 0..10 [V]
Temperatur Speicheraustritt Kamintemperatur	1	Thermoelement Typ K Inkl. Messumformer	Regler Input analog 0..10 [V]
Klappenstellmotor (optional) Verhindern der Speicherauskühlung	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung, Federrück- stellend Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output digital 0/1 [V] Rückmeldung Regler Input digital 0/1 [V]

10.2.3 Wärmeverteilsystem Hypokaust

<u>Funktion</u>	<u>Stück</u>	<u>Typ</u>	<u>Signal</u>
Umwälzventilator Hypo- kaust Bedarfsabhängige Umwäl- zung	1	Versorgungsspannung 220 Volt Leistungsaufnahme 360 W	Regler Output analog 0 .. 10 [V] Rückmeldung Regler Input digital I/O
Raumtemperaturfühler Saia PCD7.L711 Bestimmung Raumtemp. Inkl. Anwesenheitstaste	1	Einzelraumregler Saia	Schnittstelle Saia PGU oder Saia RS 422
Aussentemperatur Bestimmung Aussentempera- tur (Wärmebedarf)	1	PT 100 / 1000	Regler Input analog PT 100
Warmluft Vorlauftemperatur Bestimmung Vorlauftempera- tur Hypokaust	1	PT 100 / 1000	Regler Input analog PT 100
Klappenstellmotor Mischung Heizluft schneller Wärmetauscher	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output digital 0/1 [V] Rückmeldung Regler Input digital 0/1 [V]
Klappenstellmotor Mischung Heizluft Speicher direkt	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output analog 0 .. 10 [V] Rückmeldung Regler Input analog 0 .. 10 [V]

Klappenstellmotor Mischung Heizluft /Rücklaufbeimischung	1	Belimo 24 Volt DC mit Rückmeldung Leistungsaufnahme 4 W	Stellsignal Regler Output analog 0 .. 10 [V] Rückmeldung Regler Input analog 0 .. 10 [V]
Elektro-Notheizregister Frostschutz, Notbetrieb, Vor- heizen	1	Versorgungsspannung 380 Volt Leistungsaufnahme 4 kW	Regler Output digital 0/1

10.2.4 Optionale Erweiterungen

Zündeinrichtung elektrisch Zeitunabhängige, autonome Zündung des Abbrandes	1	Versorgungsspannung 220 Volt	Regler Output digital Ein/Aus
---	---	---------------------------------	----------------------------------

10.2.5 Regelsystem

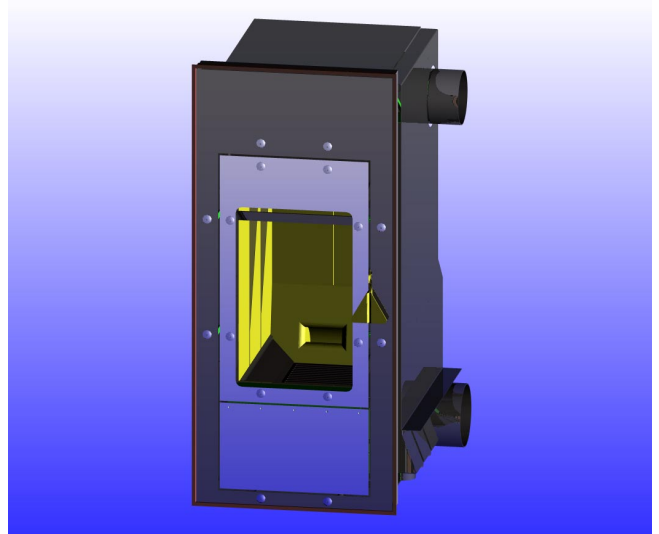
<u>Funktion</u>	<u>Stück</u>	<u>Typ</u>	<u>Signal</u>
SPS SAIA Regeleinheit PCD2.M 110 Memory 128 kB Schnittstelle RS422/485 Multifunktionsm. PCD2.G400 Analogmodul PCD2.W300	1 1 1 1 1	Versorgungsspannung 24 Volt	Signalgeber
Bedien- und Anzeigegerät Saia PCD7.D795 Vierzeiliges Display mit fünf Funktionstasten, extern UP montierbar	1	Versorgungsspannung 24 Volt	SAIA PGU oder RS 422

10.3 Zubehör

<u>Funktion</u>	<u>Stück</u>	<u>Typ</u>	<u>Signal</u>
Trafo 24 V / 50 W	1	Versorgungsspannung 24 Volt für SPS, Messum- former und Klappenstell- motoren	
Trafo 12 V / 25 W	1	Versorgungsspannung 12 V für Lambdasonde	
LED	1	Versorgungsspannung 24 V	Direkt an SPS ohne Relais
Summer	1	Versorgungsspannung 24 V	Direkt an SPS ohne Relais

10.4 Bilder

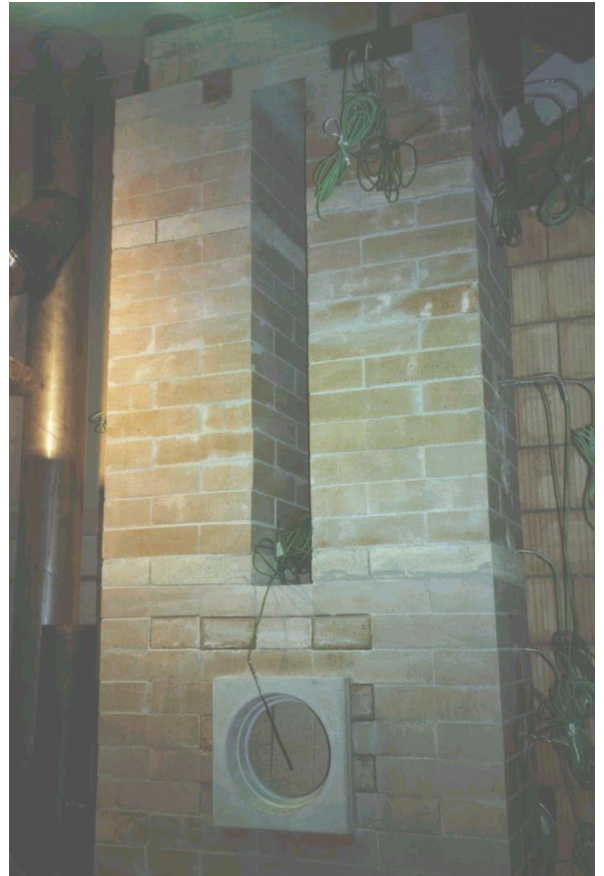
Zeichnung des Wärmeerzeugers WZ II



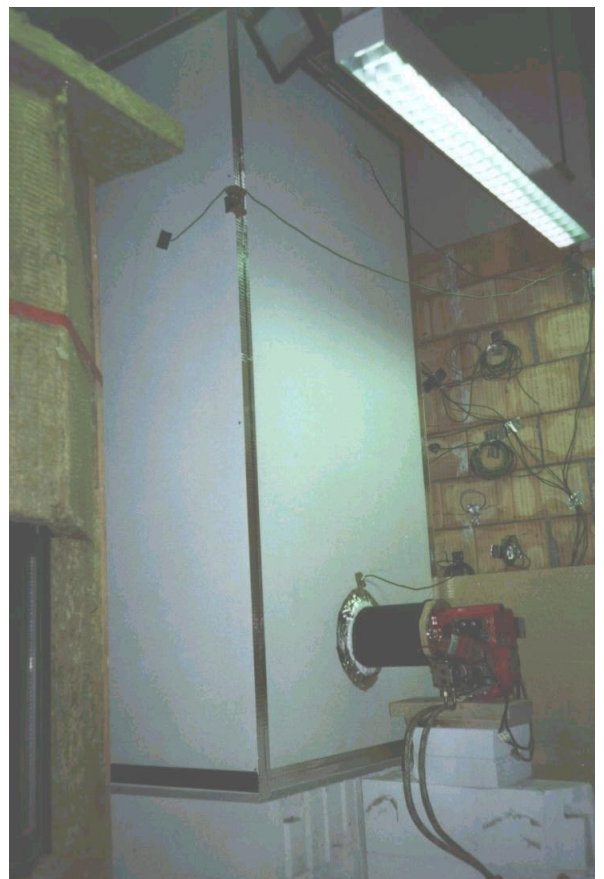
Versuche im Sichtfeuerbetrieb im Testraum der Rüegg Cheminée AG



Erster Prototyp eines Speichers mit 2 Zügen, Rohzustand



Einbaufertiger Zustand des Speicherprototypen, hier im Versuchsbetrieb mit einem Ölbrenner



Aufbau des zweiten Speichers als Bestandteil der Komplettanlage im Geer / Steinen



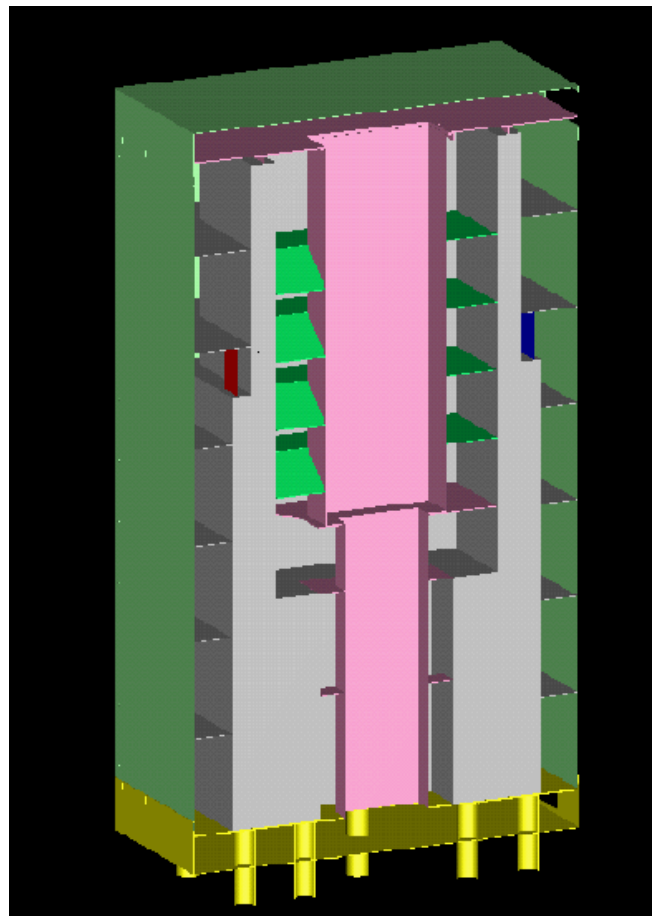
Montage der äusseren Leitbleche



Einsatzbereiter, Isolierter Speicher, auf der Fläche rechts die Sensorik zur Temperatureaufnahme



CAD-Schnittbild des Speichers



Aufbau der Komplettanlage im Ger/Steinen



Ansicht des fertigen Einbaus, oben im Bild die Vorlaufleitungen zu den Wärmestrahlwänden



Ventilatorbox zur Umwälzung der Hypokaustenluft



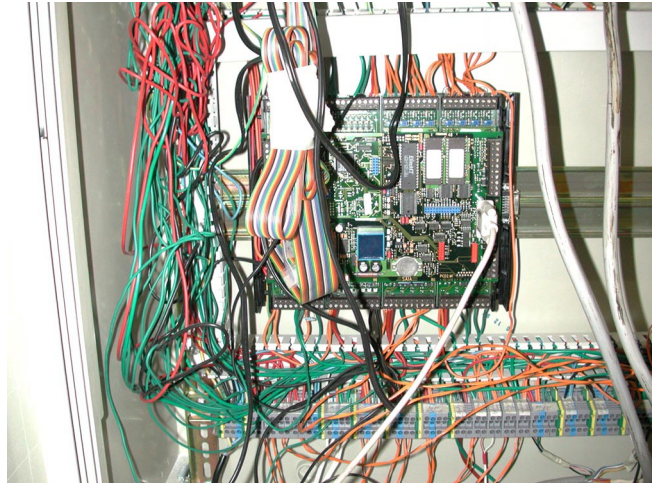
Schaltschrank mit integriertem Bedienerdisplay und Schaltern zur Simulation von Ausfällen von Sensoren / Aktoren



Für den Benutzer sichtbares Bedienerpanel in Warteposition zum Anfeuern



Speicherprogrammierbare Steuerung
(SPS) mit Ein- und Ausgabeleitungen



Geregelte Lufteinlässe für die drei Bereiche
Airwashluft, Primärluft und Sekundär-
luft



Anschlüsse der Luftleitungen in den Wärmerzeuger



10.5 Versuche Wärmeerzeuger Phase I

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1998-06-03_1	Kennenlernen des Systems nach erfolgtem Aufbau	Gemäss Vorgabe der gewählten Konzeptvarianten	System kann keine Nachverbrennung starten
1998-06-04_1	Verhalten mit schwachem Überdruck zwischen Ein- und Auslass	Druckventilator an Lufteinlass montiert	Nachverbrennung konnte gezündet werden, allgemein sehr tiefes Lambda (1,1 bis 1,5)
1998-06-04_2	Gleicher Versuch mit bereits heissem System	---	Viel schnellere Zündung der Nachverbrennung
1998-06-05_1	Zuführen der Primärluft via Airwash (Idee: Durchdringung des ganzen Holzstapels und mitnehmen der Brenngase)	Airwash-Eindüsung nur vom oberen Scheibenrahmen her	Primärluft muss dort eingedüst werden, wo sie gebraucht wird (Glutbett)
1998-06-05_2	Gleicher Versuch mit bereits heissem System	---	Nachverbrennung konnte nicht mehr gestartet werden, sonst wie oben
1998-06-09_1	Verhalten mit Änderungen	Deckel aus Vermiculite, Druckreduktion am Druckventilator, bis im Brennraum leichter Unterdruck entsteht.	Allgemein starkes Auskühlen der Gase am Düsenstein: Sekundärluft besser vor Düsenstein zugeben.
1998-06-09_2	Verhalten mit Änderungen	Lose Platte aus Vermiculite auf Holz gelegt, um Flammen einzudämmen (Verkleinerung des Primärbrennraumes, Erhöhung der Temperatur)	Abbruch: Implosion im oberen Kaminteil, sonstiger Abbrand O.K.
1998-06-10_1	Verhalten mit neuer Sekundärlufteindüsung	Sekundärlufteindüsung vor Trichter im Düsenstein umgelenkt	Sekundärverbrennung wurde nicht erreicht. Holz muss mittels steil abfallender Wand über Rost geführt werden, damit überall Luft hinzukommt.
1998-06-10_2	Gleicher Versuch mit bereits heissem System	---	Sobald System heiss ist während längerer Zeit eine Sekundärverbrennung möglich. Verhältnis PL/SL bis 1:2 möglich.
1998-06-11_1	Neuer Anlauf mit ungeändertem System	---	Sekundärverbrennung nach ca. 8 min. möglich !
1998-06-11_1	Gleicher Versuch mit bereits brennendem System	---	Sofortiges Einsetzen der Sekundärverbrennung beim Nachlegen von Holz

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1998-06-12_1	Verkürzen der Anfahrphase mittels Isolationshülle	Isolation 90 mm montiert. Ausnahme: Front und Boden	Deutlich weniger Energieverlust am Chassis, sichtbar an hellrot glühendem Rauchgasrohr. Anfahrphase nicht schneller.
1998-06-15_1	Verbessern der Ausbrandphase	Rost aus Vermiculit mit grösserem Lufteinlassfeld	Sehr schnelles Einsetzen der Nachverbrennung (6 min.). Viel besseres Ausglühen der entstehenden Kohle. Sobald hochisolierende Materialien eingesetzt werden, verbessern sich die Verbrennungsvorgänge.
1998-06-15_2	Konzentrieren des Glutbettes vor Einlass Düsenstein	45°-Anschrägung rechts im Brennraum, damit Glutbett tendenziell links liegt.	Steilwand notwendig für vollständigen Ausbrand. Kleinstmögliche Abbrandmenge ca. 4 kg Holz/h
1998-06-17_1	Leistungsänderungen probieren	--- (neu abgedichtet)	Leistungsänderungen gut möglich, Bereich ca. 18 bis 60 kW gemäss Berechnung. Führung mit PL, Anpassung Nachverbrennung mit SL.
1998-06-22_1	Verhalten mit verschiedenen Änderungen	Rost mit Lufteindüsung nur über Aschenschublade. Düsenstein strömungsgünstig ausgeformt. Anschrägung 45° auf beiden Seiten im Feuerraum.	Rost muss Luftzuführung bis an Düsenstein haben. Reagiert sehr sensibel mit der Nachverbrennung (fällt schnell heraus)
1998-06-22_2	Verhalten mit geändertem Rost, noch warmes System	Lufteindüsung über Rost bis an Düsenstein weitergezogen.	Wieder sehr lange Nachverbrennungsphasen möglich. Glutbett muss möglichst nahe an Düsenstein gebracht werden.
1998-06-26_1	Verhalten mit neuem Zyklondurchmesser	Entfernen des Kapirok-Einsatzes im Zyklon, dadurch Innendurchmesser von 150 mm auf 180 mm vergrößert.	Sehr träger Temperaturanstieg im Sekundärteil durch weglassen der Kapirok-Isolation, allgemein tiefere Temperaturen im Zyklon.
1998-06-26_2	Einfluss Airwash-Eindüsung während Ausbrandphase	---	Positiver Einfluss, wenn Airwash-Eindüsung erhöht und Rost-Eindüsung gesenkt wird während der Ausbrandphase.

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1998-07-02_1	Verhalten mit neuem Zyklondurchmesser	---	Allgemein träge Reaktionen. Am Schluss Sichtfeuer getestet, umschalten der Klappe bringt wenig Sichtunterschied, Rauchgase beim Türöffnen werden schlecht abgesaugt.
---	Testen verschiedenster Betriebszustände bei verschiedenen Leistungen (konstante Leistungsreduktion). System wurde vorgängig aufgeheizt.	---	Verhältnis von PL zu SL verschiebt sich je nach Leistung. Leistung kleiner als 22 kW nicht mehr möglich.
1998-07-07_1	Suchen der min. / max. Leistung bei Lambda = 1,15	---	Gutmütig erst ab ca. 30 kW, tiefste Leistung ca. 20 kW, darunter keine Nachverbrennung möglich, weil Zyklon unisoliert und zu stark auskühlt. Max. Leistung ca. 65 kW.
1998-07-08_1	Suchen der Kippschwelle des CO bei verschiedenen Lambda und verschiedenen Verbrennungstemperaturen	---	CO steigt fast temperaturunabhängig (zwischen 700 und 900 °C) an, sobald Lambda tiefer als 1,1 sinkt.
1998-07-09_1	Dito	---	dito
1998-07-14_1	Verhalten nach Komplettumbau	Zyklon-Durchmesser 18 cm Düsenstein Rost und Flanken Seitenwände	CO generell höher. Luft-einlass via Rost-Seitenflanken gelangt direkt in Sekundärverbrennung. Isolation vorteilhaft
1998-07-15_1	Emissionsprüfung WZ I	---	Sekundärluft wird teilweise in den Primärbrennraum zurückgeblasen
1998-07-15_2	Emissionsmessung mit bereits heissem System	---	---
1998-07-16_1	Sekundärluft gezielter in Zyklon eindüsen, damit kein Rückfluss in Primärbrennraum stattfindet	Luftleitblech im Düsenstein montiert	Luftleitblech funktioniert. Schikane in Düsenstein einbauen, damit bessere Verwirbelung stattfindet. Wenn längere Zeit mit hoher Leistung gefeuert wird, ist keine Leistungsreduktion mehr möglich
1998-07-17_1	Verhalten bei geändertem Rost, besserer Ausbrand durch Isolation	Horizontale Rostfläche isoliert gegenüber Auflagefläche, schräge Seitenflächen bleiben luftdurchspült.	Schritt in die richtige Richtung. Isolation gegenüber Glutbett bringt Ruhe in die Verbrennung

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1998-07-20_1	Verbesserung der Durchmischung Verbrennungsgase-Sekundärluft. Besserer Ausbrand durch Luftzufuhr auf ganzer Rostlänge	Düsenstein mit Lochblech für Sekundärluft-Eindüsung (20 Löcher à 6mm Durchmesser). Rost auf ganzer Länge Luftzuführend	Zu hoher Widerstand in Sekundärluft-Zuführung, dadurch zu wenig Sekundärluft. Lochfrass, weil Holzstücke oberhalb Düsenstein aufliegen.
1998-07-21_1	Verbesserung des Glutbettes durch keramischen Rost	Vermiculiteplatte 10mm auf Rost gelegt, Luftdurchtritt wie Originalrost. Rückwand mit Hofalith aufgefüllt, damit sich Scheiter nicht mehr verklemmen	Einfluss des isolierten Rostes nicht nachvollziehbar. Aschenanteil ca. 1%.
1998-07-24_1	Bessere Durchmischung der brennbaren Gase mit Sekundärluft, tieferes Lambda	Querschnittverengung im Zyklon von 35 cm ² auf 21 cm ² , leichte Kanalisierung	Verjüngung im Zyklon nur noch möglich bei Verbrennungsleistungen grösser 30 kW. Querschnitt wieder vergrößern.
1998-08-06_1	Verhalten mit neuem Düsenstein austesten, Leistungsfeuer	Neuer Düsenstein aus besser isoliertem Material, Eindüsung Sekundärluft oben und unten	Sekundärlufteindüsung bringt zuwenig Durchsatz. Nachverbrennung nach nur 2 Minuten gezündet.
1998-08-06_2	Verhalten mit neuem Düsenstein austesten, Sichtfeuer	---	Nach ca. 30 Minuten nur noch „Leistungsfeuer“ möglich. Im Primärbrennraum wird zu wenig
1998-08-07_1	Sichtfeuer mit Rauchgas-Durchgang durch Düsenstein	Druckventilator an Sekundärlufteinlass montiert	Durchgang im Düsenstein immer noch zu klein.
1998-08-10_1	Verhalten Sichtfeuer testen. Testen des Rauchgasaustrittes beim Öffnen der Türe	Direkte Öffnung im Zyklon aktiviert. In der Decke 15cm breiter Spalt hinten für Rauchgas-Abzug geöffnet.	Schönes und lebendiges Sichtfeuer möglich. Bei Öffnen der Türe tritt nur im oberen drittel der Türe Rauchgas aus
1998-08-10_2	Sichtfeuer mit tiefen Emissionen	Airwash-Spalt auf Maximum geöffnet. Gebläse Einlassseitig nur noch an Airwash	Airwash-Eindüsung immer noch sehr konzentriert. Wenn ganzes System sehr heiss, brennt das Sichtfeuer nicht mehr schön.
1998-08-12_1	Wiederholung des Sichtfeuerversuches vom 10.8.98.	In der Decke 7cm breiter Spalt vorne für Rauchgas-Abzug geöffnet	Rauchgasaustritt beim Öffnen der Türe immer noch vorhanden. Airwash bringt nicht genug Luft.
1998-08-12_2	Verbesserte Rauchgas-Absaugung bei geöffneter Türe	Decke komplett geöffnet, um Rauchgase abziehen zu lassen	Rauchgasaustritt nur noch auf den obersten 5-6 cm. Wenn im oberen Bereich eine Blende (Höhe 13 cm) montiert wird, tritt kein Rauchgas mehr aus.

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1998-08-13_1	Sichtfeuverhalten mit forcierter Airwashlufteindüsung (Pressluft-Anschluss)	Leitblech Airwashluft entfernt	Im ersten Durchlauf gute CO-Werte, nach erstmaligem Holznachlegen Feuer nicht mehr kontrollierbar
1998-08-14_1	Visuelle Beobachtung des Abbrandverhaltens. Lambda-Hochhaltung mit guten Emissionswerten.	Leitbleche vertikal rechts und links für Airwash montiert.	Visuell kein schönes Feuer. Mögliche Lufteindüsung insgesamt zu klein. Saubere Verbrennung zwischen Lambda 1,3 bis 2,7 möglich.
1998-08-17_1	Sichtfeuer nur durch Öffnung „Leistungsfeuer“ im Düsenstein probieren. Verhalten von leistungs- zu Sichtfeuer.	Innendurchmesser Zyklon auf 150 mm Reduziert (Kapirok). Hintere Öffnung im Zyklon (Einlass Sichtfeuer) geschlossen. In späterer Phase Airwash- und Sekundärluft über Ventilator gespiessen.	Reduktion Zyklondurchmesser hat keinen Einfluss auf die Leistung. Sichtfeuer sehr langsames Flammenbild, sehr gute Emissionswerte, aber optisch ungenügend. Mit Ventilator optisch ansprechendes Ergebnis.
1998-08-18_1	Optisch schönes Sichtfeuer mit tiefen CO-Emissionen, Abzug Rauchgase über Düsenstein.	Turbulator im Airwash-Einlass. Decke mit Vermiculite abgedeckt.	Turbulator bringt keinen Erfolg – wieder demonitiert. Optisch ansprechendes Sichtfeuer.
1998-08-19_1	Sichtfeuer mit Airwash- und Primärluft ohne Zwangsbelüftung (Ventilator).	Ventilator demontiert. Leitprofil aus Vermiculite eingesetzt (entspricht Schikane)	Kein befriedigendes Abbrandverhalten.
1998-08-20_1	Dito	Leitprofil entfernt, vorhandenes Leitblech für Airwash neu positioniert.	Kein befriedigendes Abbrandverhalten.
1998-09-23_1	Optisch schönes Feuer, saubere Scheibe, gute Emissionswerte entfernt (Sichtfeuer)	Düsenstein Einlassbreite von 12 cm auf 7 cm verjüngt. Direktzug 180 mm seitlich geschlossen (Verluste). Auskleidung Feuerraum mit 30 mm Vermiculite-Platten. Zug in Rückwand	Lange Anfahrphase, Nachverbrennung ohne zusätzliche Eindüsung von Sekundärluft
1998-09-24_2	Machbarkeit des Umschaltens von Leistungsfeuer auf Sichtfeuer	---	Generell möglich, Restmenge Holz darf nur noch 2-3 kg sein. Bereich Luftüberschuss sollte Lambda 1,5 bis 2 betragen.
1998-09-25_1	Sichtfeuer-verhalten visuell und emissionstechnisch	Sekundärluft-Anschluss an das Gerät mit Alu-Band abgedichtet.	Lange Anfahrphase ca. 30 min, CO ₂ nicht über 10 %, Erhöhung der Primärluft steigert die Feuerintensität.

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1998-10-06_1	Sichtfeuer-Verhalten visuell und emissionstechnisch	Sämtliche Airwash-Leitbleche entfernt. Direkter Einlass der Airwashluft in den Hohlrahmen rund um das Airwash, um Druckverluste zu reduzieren.	Nur ganz geringe Änderung des Flammbildes, keine sichtbare Aufwertung. Airwashluft-Volumen immer noch zu gering für emissionsarmen Abbrand.
1998-10-12_1	Verbesserung des Sichtfeuers	Airwashluft wird mittels Leitblech oben über und nicht in die Flammen geleitet	Verbesserung des Flammenbildes
1998-10-14_1	Schnelle Anfeuerphase (Anfahrüberhöhung)	Konstante Einstellung der Primärluftklappe (heisser Betriebszustand 15 m ³ /h)	Konstante Primärluft ergibt einen konstanten Abbrand. Kaltstart / Warmstart müssen regelungstechnisch anders definiert sein.
1998-10-15_1	Verhalten mit durchgeführten Änderungen	Ganzer Wärmeerzeuger neu abgedichtet. Sekundärluft neu durch 9 Löcher à 13 mm eingedüst. Einlass im Düsenstein auf 12x5 cm vergrößert (alt 7x5 cm)	Nachverbrennung nach 10 Minuten aktiviert.

10.6 Versuche Wärmeerzeuger Phase II

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1999-06-22_1	Ermitteln der minimalen Leistung während möglichst langer Zeit. Testen der Dasylab-Software	Originalzustand mit Isolation um Chassis (ohne Boden) und Zyklon	Minimale Leistung zwischen 40 kW zu hoch. Änderungen müssen im Bereich Zyklon und Düsenstein gemacht werden. Isolation um Chassis funktionsgerecht.
1999-06-24_1	Ermitteln der minimalen Leistung während möglichst langer Zeit	Kaminzug reduziert auf 20 Pa. Chassisboden isoliert	Nachverbrennung nach 5 Minuten erreicht. Unter 800 °C keine Nachverbrennung mehr möglich. Tiefste Leistung ca. 20 kW bei 35 Pa Kaminzug.
1999-06-24_2	Bestätigung für tiefere mögliche Leistung mit reduziertem Kaminzug	---	Minimale Leistung von 13 kW erreicht bei Lambda zwischen 1,1 und 1,2. Rauchgastemperatur im Kamin min. 69 °C

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1999-06-25	Reduktion der minimalen Leistung durch Isolation im Zyklon. Anfahren des Wärmeerezeugers mit tiefem Kaminzug.	Zyklon mit Kapirok (ca. 12mm) isoliert. Kaminzug auf 15 Pa reduziert (kalt).	Tiefe Leistung vom Versuch 1999-06-24_2 konnte nicht wiederholt werden. Kaminzug muss erhöht werden (20 Pa)
1999-06-28_1	Bestätigen von Leistungen unter 20 kW	Kaminzug auf 20 Pa erhöht	Allgemein problematische Verbrennung. Vermutlich Holzsplit quer von Düsenstein, Einlass verstopft.
1999-06-28_2	Bestätigen von Leistungen unter 20 kW	Kaminzug erhöht auf 35 Pa	Leistungen bis auf 11 kW möglich. Das höher isolierende Kapirok im Zyklon ist besser geeignet als Hofalith.
1999-07-01_1	Bestätigen der tiefen Leistung vom Versuch 1999-06-29_2. Zünden der Nachverbrennung im Zyklon innert 10 Minuten nach Versuchsstart.	---	Nachverbrennung nach 12 Minuten erreicht. Leistungen von ca. 13 kW erreicht. Sobald im Wärmeerezeuger Nachverbrennung nicht mehr aktiv, muss Klappe Primärluft voll geöffnet werden, um Nachverbrennung wieder zu aktivieren.
1999-07-01_2	Tiefe Leistung über längere Zeit halten	---	Minimale Leistungen von ca. 12 kW während 2 Stunden möglich. Nach ca. 1 Stunde Betrieb brennt das Holz im Brennraum auch ohne Primärluft ab.
1999-07-02_1	Sichtfeuerbetrieb: Bestimmen des nötigen Kaminzuges sowie des optimalen Verhältnisses Primärluft / Airwashluft.	---	Kaminzug liegt bei ca. 50 bis 60 Pa (im kalten Gerät). Verhältnis Primärluft / Airwashluft anhand dieses Versuches nicht bestimmbar.
1999-07-13_1	Abbrandregelung selbstständig (Lambda- und Leistungsregelung) über Software „Dasylab“	Software „Dasylab V 5.0“ für Regelung von Lambda und Leistung	Regelparameter schwer einzustellen. In weiteren Versuchen nur noch Lambda-Regelung einsetzen.
1999-07-14_1	Erstmaliger Abbrand von 25 kg Holz. Kaminventilator nur während der Anfeuerphase in Betrieb.	---	Mit 25 kg Holz muss länger gefeuert werden, bis die Ausgasung beginnt. Kaminzug ist nötig, da Naturzug zu gering. Verhältnis Primärluft zu Sekundärluft 1:2

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1999-07-19_1	Verhalten in der Anfahrcharakteristik und im Abbrand bei grösseren Holzmengen (30kg)	---	Im Übergang von der Anfahrphase zur stationären Phase muss die Zyklontemperatur ca. 900 °C sein, um die Nachverbrennung aktiviert zu lassen. Allgemein diffiziles Verhalten, anfällig auf Veränderungen.
1999-07-20_1	Schnelle Reduktion der CO-Emissionen. Sauberhalten der Frontscheibe innen	Erhöhung der Holzmenge auf 35 kg	Durchmischung im Zyklon bei tieferen Temperaturen schlechter (CO 500 – 1000 ppm). Lange Anfahrphase mit grossem Massenverlust. Frontscheibe bleibt sauber.
1999-07-21_1	Kurze Anfahrphase, saubere Frontscheibe	Kaminzug erhöht auf 40 Pa (kaltes System)	Nachverbrennung nach 2 Minuten aktiv, CO-Emissionen innerhalb Toleranz. Wichtig: geschickte Anordnung des Holzes im Feuerraum. Langsame Übergänge zwischen den einzelnen Phasen notwendig.
1999-07-22_1	Weitere Optimierung der Anfeuerphase bezüglich CO und Lambda	Kaminzug auf 50 Pa erhöht.	Misslungenes Anfeuern, kein gleichmässiger Abbrand möglich, besser Anfeuerholz mit Zündwolle benutzen.
1999-07-23_1	Weitere Optimierung der Anfeuerphase bezüglich CO und Lambda	Verlängerung der Sekundärluft-Eindüsung mit Stahlrohren Innendurchmesser 13 mm und Länge von 45 mm	Minime bessere CO-Emissionen durch verbesserte Sekundärluftdurchmischung. Anfahrphase muss verbessert werden.
1999-07-26_1	Anfeuerphase beschleunigen, beobachten der Ausbrandphase	---	Schlechte Anfeuerphase, da zu wenig dünnes Anfeuerholz verwendet. Keine verbesserten CO-Werte durch Modifikation aus Versuch 1999-07-23_1. Im Ausbrand Luftverhältnis Airwash zu Primärluft ca. 2:1 bei CO-Werten von 2500 ppm.

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
1999-07-27_1	Verschmutzung der Frontscheibe verbessern. Verhalten mit rückgebauter Sekundärlufteindüsung beobachten	Sekundärlufteindüsung aus Versuch 1999-07-23_1 rückgängig gemacht. In Abdeckplatte hinter Frontscheibe 10 Löcher mit 10mm Durchmesser in vertikaler Anordnung gebohrt, um in Ausbrandphase Luft über Glutbett streichen zu lassen. Airwashluft während ganzem Abbrand geöffnet.	Kein Rauchgasaustritt mehr zwischen Frontscheibe und Abdeckplatte sichtbar. Zusätzliche Luft mittels Airwash-Löcher muss im Verbrennungsvorgang als Zusätzliche und „überflüssige“ Primärluft akzeptiert werden.
1999-07-28_1	Verhalten mit geändertem Düsenstein beobachten. Anfeuerverhalten mit heißem System	Im Düsenstein 9 Löcher à 12 mm zur besseren Verwirbelung gebohrt.	Keine Verbesserung der CO-Emissionen. Für Sekundärlufteindüsung muss eine neue Lösung gesucht werden.
1999-07-29_1	Emissionsarme Verbrennung in verschiedenen Leistungsstufen. (ergibt Definitionsgrundlage für Regelungskonzept)	---	Leistungsreduktion muss langsam erfolgen, damit Glutbettbildung gewährleistet ist. Mit konstantem Kaminzug lässt sich der Rauchgasaustritt durch die Löcher der Abdeckplatte reduzieren.
1999-07-30_1	Reduktion des Rauchgasaustrittes durch die Abdeckplatte testen. Definieren der Phasenübergänge	Umleitblech vor Löcher an Abdeckplatte montiert (Idee: Bei Rauchgasaustritt durch Löcher kein Verschmutzen der Frontscheibe).	Umleitblech funktioniert, aber Kondensat tropft auf Boden (Idee: Tasche für Kondensat integrieren). Lambda in Ausbrandphase optimal bei 1,7 halten.
1999-08-05_1	Beobachten des Umleitbleches der Abdeckplatte.	---	Wenn zu Beginn des Feuerungsvorganges längere Zeit forciert wird, kann später die Leistung nicht mehr reduziert werden. Sekundärluftmenge nicht mehr ausreichend, schlechte Emissionswerte.
1999-08-06_1	Anfeuerphase verbessern, emissionsverhalten bei verschiedenen Phasen und Leistungen beobachten	---	Anfeuervorgang sehr wichtig für weiteren Verlauf des Abbrandes. Schneller Lambda-Regler ist wichtig zur schnellen und exakten Korrektur von Abweichungen.

10.7 Versuche Gesamtsystem

Versuch	Ziel	Änderungen	Erkenntnisse
2000-05-09_1	Versuch mit kompletter Hypokaust-Anlage, Systemverhalten	Dichtung an Flügelrahmen ersetzt, Primärluft durch Rost reduziert	Sehr lokales Glutbett nahe bei Öffnung Zyklon-daraus resultierender Luftüberschuss durch Primär- und Airwashluft.
2000-05-10_1	Versuch mit kompletter Hypokaust-Anlage, Systemverhalten	Rost um 180° gedreht, dadurch Luftanteil an Front reduziert	Lambda-Regelung immer noch über Primär-/Airwashluft möglich
2000-05-22_1	Versuch mit kompletter Hypokaust-Anlage, Systemverhalten	---	
2000-05-23_1	Aufladen des Speichers, Grundglut vorhanden	---	Zu hoher Sekundärluft-Eintrag, Temperaturen im Zyklon stark schwankend.
2000-05-24_1	Versuch mit kompletter Hypokaust-Anlage, Systemverhalten	---	Probleme mit der Regelung, System geht nach kurzer Zeit in Ausbrandphase
2000-05-30_1	Laden Speicher ohne Entladung,	---	Lambda pendelt, wird nur noch durch Sekundärluft bestimmt
2000-05-31_1	Speicher geladen, weiterfeuern mit Wärmeentnahme	---	Entnahme über Steinspeicher und schneller Wärmetauscher funktioniert
2000-06-09_1	Austesten Gesamtsystem mit Nachlegen Holz	Regelung Kaminventilator manuell	Alle Feuerphasen werden durchlaufen
2000-06-14_1	Austesten Gesamtsystem mit Nachlegen Holz	---	System läuft auch bei Volllast Wärmeerzeuger stabil
2000-06-15_1	Austesten Gesamtsystem	Regelung Kaminventilator wieder automatisch	Softwareprobleme in der Regelung
2000-07-04_1	Austesten Gesamtsystem	---	Abbrand i.O.

10.8 Teilelisten

Teileliste WZ II

<i>Nummer</i>	<i>Stk.</i>	<i>Teile</i>	<i>Material</i>
Chassis			
10100	1	Seitenwand rechts	St. 37
10101	1	Seitenwand links	St. 37
10102	1	Boden	St. 37
10103	1	Deckel	St. 37
10104	1	Frontplatte	St. 37
10105	1	Rückwand	St. 37
10106	4	Auflagewinkel für Einfassung Aschenschublade	St. 37
10107	1	Einlageblech Abdeckplatte	St. 37
10108	1	Einlageblech Direktzugklappe	St. 37
10109	2	Scheibenflügel-Dichtrahmen horizontal	St. 37
10110	2	Scheibenflügel-Dichtrahmen vertikal	St. 37
10111	1	Blende zu Dichtrahmen oben	St. 37
10112	1	Blende zu Dichtrahmen rechts	St. 37
10113	4	Keile Holzfüllraum	St. 37
10114	2	Lufteinlassrohr primär + Airwash	St. 37
10115	1	Lufteinlassrohr sekundär	St. 37
10116	1	Rauchgasrohr unten	St. 37
10117	1	Rauchgasrohr oben	St. 37
10118	2	Dichtblech Aschentüre horizontal	St. 37
10119	2	Dichtblech Aschentüre vertikal	St. 37
10120	1	Umrahmung innen rechts	St. 37
10121	1	Umrahmung innen links	St. 37
10122	2	Umrahmung innen oben + unten	St. 37
10123	2	Umrahmung aussen rechts + links	St. 37
10124	2	Umrahmung aussen oben + unten	St. 37
10125	1	Halterung für Lufteinlassrohr sekundär	St. 37
10126	1	Halterung Temperatursonde Zyklon	St. 37
10127	1	Abdeckplatte für Lufteinlasskanäle	St. 37
	4	Imbusschrauben M6x12 BN 272	
	4	Unterlagsscheiben M6	
10128	2	Halterung für Abdeckplatte	St. 37
	4	Imbusschrauben M5x14 BN 272	
	4	Unterlagsscheiben M5	
10129	1	Hülse für Feder	St. 37
10130	1	Blende zu Dichtrahmen links	St. 37
10131	1	Blende zu Dichtrahmen unten	St. 37
10132	1	Deckel Montageöffnung	St. 37
	6	Imbusschrauben M6x14 BN 272	
	6	Unterlagsscheiben M6	
10133	1	Halterung Türkontaktschalter	St. 37

	2Imbusschrauben M5x12	BN 272	
	2Unterlagsscheiben M5		
10134	4Aussenkörper Standfuss		St. 37
10135	4Innenkörper Standfuss		St. 37
10136	1Kranhaken		
Frontblende			
10300	4Abstandhalter horizontal		St. 37
	4Imbusschrauben M5x14	BN 272	
	4Unterlagsscheiben M5		
10301	1Blende		Spezial-Struktur
10302	1Abdeckung Aschentüre		Spezial-Struktur
10303	2Abstandhalter vertikal		St. 37
	4Imbusschrauben M5x14	BN 272	
	4Unterlagsscheiben M5		
Scheibenflügel			
10200	2U-Profil für Dichtzopf horizontal		St. 37
10201	2U-Profil für Dichtzopf vertikal		St. 37
10202	2Aussenblech vertikal		St. 37
10203	2Aussenblech horizontal		St. 37
	24Blebschrauben für Kernbohrung 3,2 (Rüegg)		
10204	1Glas innen		Spz. Glas
10205	1Glas aussen		Spz. Glas
	16Senkschraube mit Innensechskant M5x18	BN 0020	
	16Ueberschraubrossetten Oeschger	55.250.13	
	16Dichtfilz / Unterlagsscheiben D/d 15/5mm		
10207	4Aufnahmelaschen an Chassis		St. 37
	2Imbusschraube mit Schaft M8x45	BN 002	
	2Unterlagsscheiben M8		
	2Muttern M8		
10208	2Aufnahmelaschen an Scheibenflügel		St. 37
10210	2Grundblech zu Aufnahmelaschen Verschluss		St. 37
	8Imbusschrauben M5x10	BN 272	
	8Unterlagsscheiben M5		
10211	1Griff Scheibenflügel		St. 37
10212	1Simulation Einfärbung Glasplatte		nicht fertigen !
10213	1Teilerblech Airwash		V 4A
	2Blebschrauben für Kernbohrung 3,2 (Rüegg)		
10214	1Andruckblech Abdeckplatte		St. 37
10215	1Winkel Befestigung Abdeckung Aschentüre		St. 37
10216	1Zwischenplatte Abdeckung Aschentüre		St. 37
Abdeckplatte			
10400	1U-Profil vertikal zur Einrahmung Abdeckplatte		V 4A
10401	2U-Profil horizontal mit Schauglas		V 4A
10402	1Abdeckplatte		Schamotte

10403	1 U-Profil zur Führung Abdeckplatte rechts	St. 37
10404	1 U-Profil Führung Abdeckplatte links	St. 37
	6 Imbusschrauben M5x10 BN 272	
	6 Unterlagsscheiben M5	
10405	2 Lagerbock Laufräder	St. 37
	2 Imbusschrauben M6x10 BN 272	
	2 Unterlagsscheiben M6	
10406	2 Laufrollen in U-Profil	Messing
10407	2 Bügel für Verbindung Abdeckplatte mit Laufrollen	St. 37
10408	2 Abstandsbüchsen an Bügel	St. 37
	2 Imbusschrauben M6x10 BN 272	
	2 Unterlagsscheiben M6	
10409	2 Laufrollen an Bügel	Messing
10410	1 Griff an Einrahmung	St. 37
10411	1 Nocken/Tropfnase	St. 37
10412	1 U-Profil vertikal ohne Schauglas	V 4A
	1 Schauglas D=50 mm	Spz. Glas

Türmechanismus Version 2

10600	1 U-Profil zur Aufnahme Schwerspannstift	St. 37
	1 Schwerspannstift D6/24 BN 879	
10601	2 Grundkörper Verschlusskasten-Aufnahme	St. 37
	4 Imbusschraube M6x25 BN 272	
	4 Unterlagsscheiben M6	
10602	2 Lagerteil zu Grundkörper	St. 37
	4 Imbusschrauben M6x25 BN 272	
	4 Unterlagsscheiben M6	
	2 Imbusschrauben mit Schaft M6x35 BN 2	
	2 Unterlagsscheiben M6	
	2 Muttern M6	
10603	1 Befestigungshalter zu Türgriff	St. 37
	2 Imbusschrauben M6x40 BN 272	
	2 Unterlagsscheiben M6	
	1 Imbusschraube M8x40 mit Schaft BN 2	
	1 Unterlagsscheiben M6	
	1 Mutter M6	
10604	2 Verschlusskasten	St. 37
10605	1 Türgriff beweglich	St. 37
10606	2 Verbindungsstangen Türgriff-Verschlusskasten	nicht fertigen !
	16 Tellerfedern zu Grundkörper	DIN 1.4568

Direktzugklappe

10800	1 Klappe für Direktzug	St. 37
10801	1 Gegenstück Klappe	St. 37
10802	2 Lasche für Befestigung Hebel	St. 37

	1 Schwerspannstift D4/26	BN 879	
	1 Imbusschraube mit Schaft M6x30	BN 2	
	1 Unterlagsscheibe M6		
	1 Mutter M6		
10803	1 Hebel		St. 37
	1 Imbusschraube M6x12	BN 272	
10804	1 Lasche an Blech Chassis		St. 37
	2 Imbusschrauben M6x14	BN 272	
	2 Unterlagsscheiben M6		
10805	1 Uebertragungswelle		St. 37
10806	1 Hebel seitlich an Welle		St. 37
10807	1 Umlenkhebel an Chassis		St. 37
10808	1 Lagerbock für Umlenkhebel		St. 37
	1 Imbusschraube M6x12	BN 272	
	1 Unterlagsscheibe M6		
10809	1 Gestänge		nicht fertigen !
	2 Imbusschrauben mit Schaft M6x60	BN 2	
	2 Unterlagsscheiben M6		
	2 Muttern M6		
	1 Imbusschraube M6x10	BN 272	
10810	1 Befestigung Gegengewicht		St. 37
10811	4 Gegengewicht		St. 37
Luftzufuhr			
10900	1 Luftkanal Airwash		St. 37
10901	3 Reduktion 80mm zu Luftkanal		St. 37
10902	1 Luftkanal Primärluft		St. 37
10903	1 Luftkanal Sekundärluft		St. 37
10904	3 Aufweitung für Luftkanal		St. 37
10905	3 Deckel zu Luftkanal		St. 37
10906	1 Sekundärluft-Teil 2 von Luftkanal		
10907	1 Sekundärluft-Teil 3 von Luftkanal		
	3 Aluflex-Schlauch 80mm		Aluflex
Aschentüre			
11100	1 Türblech		St. 37
	12 Blebschrauben Innendurchmesser 3,2 mm		
11101	2 U-Profil horizontal für Dichtung		St. 37
11102	2 U-Profil vertikal für Dichtung		St. 37
11103	4 Aufnahme Tür Lagerung		St. 37
	2 Imbusschrauben mit Schaft M8x40	BN 2	
	2 Unterlagsscheiben M8		
	2 Muttern M8		
11104	2 Aufnahmelasche an Türe		St. 37
11105	1 Halterung Drehgriff		St. 37

	1 Imbusschraube M6x14	BN 272	
	1 Unterlagsschraube M6		
11106	2 Aufnahmelaschen an Drehgriff		St. 37
	1 Schwerverspannstift D6/20	BN 879	
11107	1 Drehgriff		

Aschenschublade

11200	1 Aschenschublade		Blech 1,5
11201	1 Tragbügel		Draht 4 mm
11202	1 Einfassung Aschenschublade		St. 37
11203	1 Griff Aschenschublade		St. 37
11204	2 Lagerbock für Tragbügel		St. 37

Brennraum

11300	1 Abschlusstein Glutbett Front		Scham.
11301	1 Auflagestein Rost rechts/links		Scham.
11302	2 Rost Boden		St. 37
11303	2 Rost Seitenteil rechts		St. 37
11304	2 Rost Seitenteil links		St. 37
11305	4 Rost Seitenauflage		St. 37
11307	1 Zyklon-Grundkörper		L.-Scham.
11308	1 Zyklon-Einsatz		Hofalith
11309	1 Isolierdeckel Zyklon		Hofalith
11310	1 Düsenstein		L.-Scham.
11311	1 Ergänzung Düsenstein		L.-Scham.
11312	1 Isolation Rückwand		Scham.
11313	2 Isolation Seitenwand vorne		Scham.
11314	1 Isolation Decke hinten		Scham.
11315	2 Isolation Seitenwand hinten		Scham.
11316	2 Isolation Seitenwand mitte		Scham.
11317	1 Isolation Decke vorne		Scham.

Airbox

11400	1 Blech Boden		Blech 2mm
	22 Blebschrauben für Innendurchmesser 3,2 mm		
11401	1 Blech Deckel		Blech 2mm
11402	2 Rohr Eingang		St. 37
11403	3 Rohr Ausgang		St. 37
11404	3 Halterung Rohr		St. 37
	3 Klappenstellmotoren Belimo LM24SR		