



**Bundesamt für Energiewirtschaft**  
**Office fédéral de l'énergie**  
**Ufficio federale dell'energia**  
**Uffizi federal d'energia**

---

Forschungsprogramm  
**Biomasse**

# **Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen**

ausgearbeitet durch  
**Peter Siegl, Ingenieurbüro, 8872 Weesen**  
**Konrad Imbach, Verband Schweizer Hafner-  
und Plattengeschäfte, 4600 Olten**

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energiewirtschaft**

September 1996

Schlussbericht

---

# Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen

Verfasser:

**Peter Siegl, Ingenieurbüro, 8872 Weesen**  
**Konrad Imbach, Verband Schweizer Hafner-  
und Plattengeschäfte, 4600 Olten**

inhaltliche Beiträge von

**Beat Seiler, Professur für Elektrotechnische  
Entwicklung und Konstruktionen,  
ETH-Zentrum, 8092 Zürich**

Projektnummer des

Bundesamtes für Energiewirtschaft: EF-REN (93) 024

|                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| <b>Inhaltsverzeichnis</b>                                                                  | <b>Seite</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>ZUSAMMENFASSUNG</b>                                                                     | <b>4</b>     |
| Zielsetzung                                                                                |              |
| Vorgehen                                                                                   |              |
| Ergebnisse                                                                                 |              |
| Summary                                                                                    |              |
| <b>1.    EINLEITUNG, FRAGESTELLUNG</b>                                                     | <b>8</b>     |
| <b>2.    VERSUCHSOBJEKTE</b>                                                               | <b>10</b>    |
| 2.1    Auswahl Versuchsobjekte                                                             | 10           |
| 2.2    Warmluft-Heizeinsatz                                                                | 11           |
| 2.3    Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer                                        | 14           |
| 2.4    Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise                                          | 16           |
| <b>3.    UNTERSUCHUNGSMETHODEN</b>                                                         | <b>18</b>    |
| 3.1    Untersuchungen an Praxisanlagen                                                     | 18           |
| 3.2    Untersuchungen im Labor                                                             | 20           |
| 3.2.1    Versuchseinrichtungen Wärmeerzeugung                                              | 20           |
| 3.2.2    Varianten Versuchsanordnung und Messmethoden                                      | 22           |
| 3.2.3    Versuchs- und Messanordnung Heizeinsatz mit Nachheizregistern                     | 24           |
| 3.2.4    Versuchs- und Messanordnung Heizeinsatz mit massearmem Rauchgas/Luftwärmetauscher | 26           |
| 3.3    Messtechnik                                                                         | 27           |
| 3.4    Verwendete Formeln                                                                  | 29           |

|                                                                      | <b>Seite</b> |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>4. VORERHEBUNGEN AN PRAXISANLAGEN</b>                             | <b>31</b>    |
| <b>4.1 Anlagentyp 1, schwere Bauweise</b>                            | <b>31</b>    |
| 4.1.1 Anlagenbeschrieb                                               | 31           |
| 4.1.2 Versuchsablauf, Messmethode                                    | 32           |
| 4.1.3 Auswertung                                                     | 34           |
| <b>4.2 Anlagentyp 2, leichte Bauweise</b>                            | <b>37</b>    |
| 4.2.1 Anlagenbeschrieb                                               | 37           |
| 4.2.2 Versuchsablauf, Messmethode                                    | 37           |
| 4.2.3 Auswertung                                                     | 39           |
| <b>4.3 Diskussion der Ergebnisse,<br/>        Schlussfolgerungen</b> | <b>40</b>    |
| <b>5. VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG LABOR</b>                     | <b>41</b>    |
| <b>5.1 Vorversuche</b>                                               | <b>41</b>    |
| <b>5.2 Warmluft-Heizeinsatz</b>                                      | <b>41</b>    |
| 5.2.1 Heizeinsatz mit Nachheizregistern                              | 41           |
| 5.2.2 Heizeinsatz mit masselosem Wärmetauscher                       | 42           |
| <b>5.3 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer</b>              | <b>43</b>    |
| <b>5.4 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise</b>                | <b>44</b>    |
| 5.4.1 Paralleler Betrieb                                             | 45           |
| 5.4.2 Serieller Betrieb                                              | 45           |
| <b>5.5 Versuchssystematik</b>                                        | <b>46</b>    |
| 5.5.1 Versuchsablauf                                                 | 46           |
| 5.5.2 Abbrandzyklen                                                  | 46           |
| 5.5.3 Brennstoff                                                     | 46           |
| <b>6. VERSUCHSRESULTATE</b>                                          | <b>48</b>    |
| <b>6.1 Warmluft-Heizeinsatz</b>                                      | <b>49</b>    |
| 6.1.1 Warmluft-Heizeinsatz mit Nachheizregistern                     | 49           |
| 6.1.2 Warmluft-Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher              | 54           |

|                                                         | <b>Seite</b> |
|---------------------------------------------------------|--------------|
| <b>6.2 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer</b> | 59           |
| <b>6.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise</b>   | 65           |
| 6.3.1 Paralleler Betrieb, 12 Std. Heizintervall         | 65           |
| 6.3.2 Paralleler Betrieb, 8 Std. Heizintervall          | 72           |
| 6.3.3 Serieller Betrieb, 12 Std. Heizintervall          | 78           |
| <b>7. DISKUSSION</b>                                    | 85           |
| 7.1 Warmluft-Heizeinsatz                                | 85           |
| 7.2 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer        | 92           |
| 7.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise          | 95           |
| <b>8. SCHLUSSFOLGERUNGEN, AUSBLICK</b>                  | 102          |
| Danksagung                                              | 104          |
| <br><b>ANHANG</b>                                       |              |
| Anhang 1: Symbolverzeichnis                             | 105          |
| Anhang 2: Messgeräteliste                               | 107          |
| Anhang 3: Glossar                                       | 108          |
| Anhang 4: Kachelofenberechnung                          | 110          |

---

## ZUSAMMENFASSUNG

---

### **Zielsetzung**

Die generelle Zielsetzung des Projektes lag in der Erarbeitung von Grundlagen für die Planung und Ausführung von holzbetriebenen Hypokausten-Anlagen als Ganzhausheizung. Dabei wurden zwei Hauptziele schwerpunktmässig verfolgt:

- die Untersuchung von verschiedenen gebräuchlichen Bauarten und Komponenten der Wärmeerzeugung und Überprüfung ihrer für den Einsatz in Hypokausten-Anlagen relevanten Eigenschaften
- die Optimierung und systemgerechte Abstimmung der einzelnen Anlagekomponenten

### **Vorgehen**

Der Hauptteil der Arbeiten wurde auf einem Prüfstand im Labor durchgeführt. Dabei wurde bei verschiedenen Typen von Wärmeerzeugungsanlagen für Hypokausten-Heizungen die Heizungsluftleistung im dynamischen zeitlichen Ablauf zwischen den Heizintervallen ermittelt. Die Versuche erfolgten unter praxisgerechten Bedingungen bezüglich des Bedienungskomforts und des abzudeckenden Wärmebedarfes von Einfamilienhäusern.

Bei Feldmessungen an verschiedenen ausgeführten Hypokausten-Anlagen mit zwei Typen von Wärmeerzeugern (leichte und schwere Bauweise) wurden die Temperaturverläufe von Rauchgas, Heizungsluft und Speichermassen unter Praxisverhältnissen gemessen.

### **Ergebnisse**

Aufgrund der Versuchsergebnisse können jetzt die Charakteristiken der untersuchten oder ähnlicher Aggregate, bzw. Bauweisen von Hypokausten-Wärmeerzeugungsanlagen klar beschrieben werden. Für Hypokausten-Anlagen als Vollheizung im Einfamilienhausbereich stehen nun für Planung und Ausführung verlässliche Daten für die Dimensionierung und Angaben für eine energieeffiziente und funktionsgerechte, den Anforderungen der Hypokaustentechnik entsprechende bauliche Gestaltung der Anlagen zur Verfügung.

Insbesondere betrifft dies:

- Heizungsluft-Leistung und erreichbare Heizungsluft-Temperaturen im zeitlichen Verlauf des Abbrandes
- Kombinationen von Anlagekomponenten
- Grundlagen für die Anordnung und Dimensionierung von Speichern

Den individuell gefertigten, gemauerten Heizeinsatz mit integrierten keramischen Zügen kann man mit Hilfe des Ofenberechnungsprogrammes des Österreichischen Kachelofenverbandes nun auch in Bezug auf die Heizungsluft-Leistung für Hypokausten-Anlagen dimensionieren. Die Messungen haben eine Übereinstimmung zwischen den Berechnungen und den Versuchen ergeben.

---

## SUMMARY

---

### Aims

The general aim of the projekt was to work out a basis for planning and building wood-fired hypokaust-installations for whole-house heating.

Throughout, emphasis was placed on 2 main aims:

- to examine various commonly used construction methods and components used in heat-production, and to investigate their properties relevant to their use in hypokaust-installations.
- to coordinate the individual components of the installation in the best possible way to suit the system.

### Procedure

In field tests on various completed hypokaust-installations with two types of heat generators (light and heavy construction), the varying temperatures of flue gas, heating air and heat-retaining storage masses were measured under normal working conditions.

The majority of the tests were carried out in a laboratory. In these tests, the heating performance of the heating air from different types of heat producing installations for hypocaust-systems was measured throughout the intervals between wood charges to the furnace. The tests took place under normal working conditions with respect to user-friendly controls and the heating requirements to be met in self-contained houses.

### Results

On the strength of the test results, the characteristics of the systems tested or of similar systems, and construction methods for hypocaust heat producing systems can now be clearly defined. Reliable data about dimensions are now available for planning and building hypocaust heating systems as sole sources of heat in self-contained houses. There is also information for producing energy-efficient, functionally designed installations complying with all the requirements of hypocaust technology.

This concerns, in particular:

- heating air performance and temperatures reached by the heating air during the combustion process,
- combination of installation components
- basis for the arrangement and imensions of heat-retaining storage elements.

Using the stove calculation programme of the Austrian tile-stove association, individually made, built-in elements with integrated ceramic flues can now be sized with the heating air performance of hypocaust heating systems in mind. The measurements have shown that calculations and test results are in agreement.

## 1. EINLEITUNG, FRAGESTELLUNG

Hypokausten-Heizungen sind Flächenheizungen im Wand- oder Bodenbereich mit Luft als Wärmeträger in einem geschlossenen Kreislauf (geschlossenes Luftheizungssystem). Bei den in der Schweiz üblichen Systemen erfolgt die Wärmeübertragung über eher kleinflächige Strahlungswände aus Schamotte-Hohlelementen oder Plattenmaterialien. Die Heizungsluft zirkuliert mittels Schwerkraft oder Ventilator in einem Rohr-, Kanal- oder Schachtsystem. Als Wärmeerzeugung dienen modifizierte Kachelöfen oder zentrale Heizeinsätze im Kellergeschoss. Hypokausten-Heizungen stellen einen neuen Einsatzbereich für Holzheizungen im Ein- und Mehrfamilienhausbau dar (die weitaus meisten der ausgeführten Anlagen werden mit Holz betrieben).

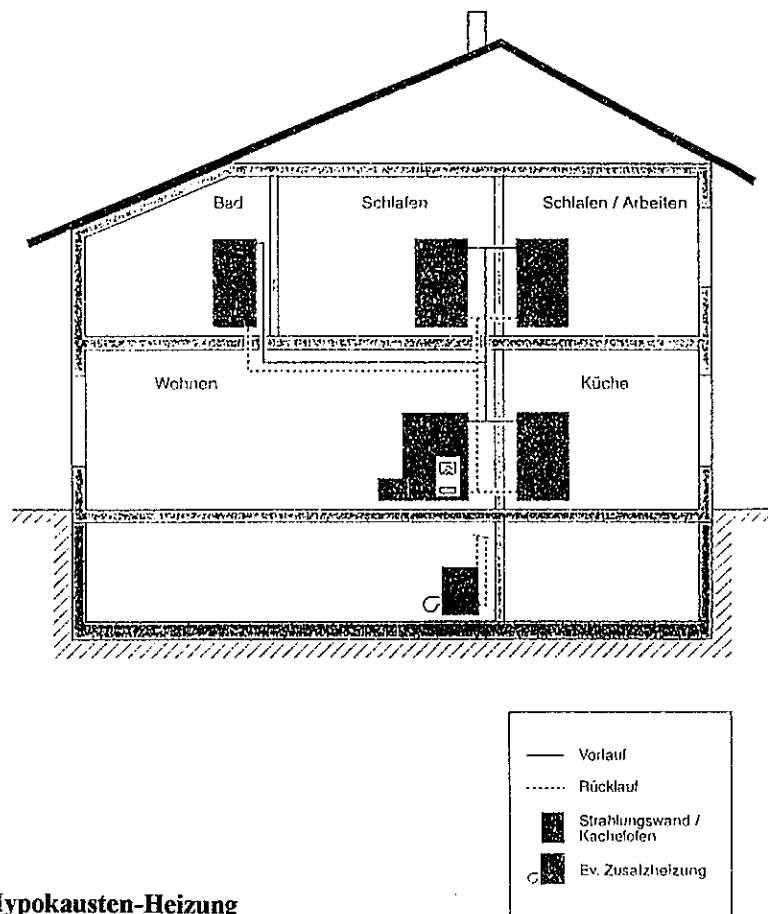


**Bild 1-1:**  
Schema einer Hypokausten-Heizung  
mit Wärmeerzeugung im Kachelofen

Hypokausten-Heizungen haben sich aus dem Hafner- und Ofenbauergewerbe auf empirische Weise entwickelt. Allgemein zugängliche, theoretisch und praktisch abgesicherte Grundlagenkenntnisse und daraus abgeleitete Dimensionierungs- und Planungskriterien fehlen. Dies erschwert insbesondere die Ausbildungs- und Schulungstätigkeit für Planer und Ausführende und ganz generell die Weiterverbreitung und Optimierung dieses Heizungssystems.

Vor diesem Hintergrund wurde als Ziel des Projektes die Erarbeitung von theoretisch und praktisch abgesicherten Grundlagen für die Planung und Ausführung von holzbetriebenen Hypokausten-Heizungen, im speziellen der Wärmeerzeugung, formuliert. Einzelziele waren die Untersuchung des dynamischen Verhaltens, sowie der thermodynamischen und anwendungsspezifischen Eigenschaften von Systemkomponenten und die Optimierung und systemgerechte Abstimmung der einzelnen Anlagekomponenten.

Für verschiedene repräsentative Heizgeräte und Systemkomponenten wurden folgende Fragestellungen näher untersucht:

1. Welche Dauerheizleistungen erbringen die Wärmeerzeugungsanlagen während der entsprechenden Abbrandzyklen?
2. Wie verteilt sich die Leistungsabgabe über den zeitlichen Verlauf des Füllintervalls?
3. Welche Lufttemperaturen in Abhängigkeit von verschiedenen Volumenströmen können erwartet werden?
4. Wie muss die Anlage konzipiert werden, um eine möglichst konstante Wärmeabgabe zu gewährleisten?

Das vorliegende Projekt stellt eines von mehreren Hypokausten-Projekten mit gleicher genereller Zielsetzung und Projektleitung dar. Es befasst sich schwerpunktmässig mit den holzbetriebenen Wärmeerzeugungsanlagen für Hypokausten-Heizungen. Weitere Hypokaustenprojekte beinhalten eine Standortbestimmung (DIANE-7), die Wirkungsweise, raumklimatische Aspekte und die Wärmeverteilungssysteme (NEFF).

---

## 2. VERSUCHSOBJEKTE

---

### 2.1 Auswahl Versuchsobjekte

Aus Zeit- und Kostengründen musste aus der Vielzahl der für die Warmlufterzeugung verwendeten Heizeinsätze eine Auswahl getroffen werden. Der Auswahl wurden folgende Kriterien zugrundegelegt:

#### a) Emissionen

Die Verbrennungsqualität des Heizeinsatzes musste den neuzeitlichen Anforderungen an die Luftreinhalte-Vorschriften genügen.

#### b) Leistung und Komfort

Die Heizungsluft-Leistung und das Füllvolumen musste für den Einsatz als Alleinheizung im Einfamilienhaus mit einem Wärmebedarf von min. 6 kW bei 2, max. 3 Holzfüllungen pro Tag ausreichend sein. Es mussten Holzscheiter von 50 cm Länge verwendet werden können.

#### c) Repräsentativität

Industriell hergestellte Serienprodukte mussten repräsentativ für andere Produkte ähnlicher Bauart sein.

#### d) Speicherbewirtschaftung

Für die effiziente Bewirtschaftung nachfolgender Wärmetauscherelemente mit Speicherfunktion sollten dort, wo der Heizeinsatz nicht selbst als Speicher wirkt, am Rauchgasstutzen des Heizeinsatzes möglichst hohe Temperaturen realisiert werden können.

Neben technisch funktionellen Aspekten wurde die Aufstellung der Auswahlkriterien nicht zuletzt durch die Erfahrungen bei den Vorerhebungen an Praxisanlagen und bei Labor- Vorversuchen beeinflusst. Massgebend war auch das Bestreben, die Akzeptanz von Holzfeuerungen zu fördern.

Für die definitiven, in diesem Bericht ausgewerteten Versuchsreihen wurden drei Typen von Wärmeerzeugern verwendet: zwei Serienprodukte und ein individuell erstellter Heizeinsatz, der im Verlaufe der Optimierungsmassnahmen für den Betrieb in Hypokausten-Anlagen mit einer spezifischen Leistung konstruiert wurde.

## 2.2 Warmluft-Heizeinsatz

Ein Warmlufteinsatz ist ein Wärmeerzeuger mit einem Stahl- oder Gussmantel und einem ausschamottierten Feuerraum, der im Kachelofenbau eingesetzt wird. Die Feuerraumgeometrie der modernen Heizeinsätze entspricht den Anforderungen an eine gute Verbrennung. Die heute führenden Produkte weisen alle ausgezeichnete Emissionswerte auf. Die Einsätze werden in der Regel mit Stückholz betrieben, und der Abbrand verläuft nach dem Durchbrandprinzip.

Das verwendete Fabrikat war mit einer elektronischen Abbrandsteuerung ausgerüstet. Dabei wird die Verbrennungsluftzuführung in den einzelnen Abbrandphasen gesteuert und nach Abschluss des Abbrandes geschlossen. Diese Art von Wärmeerzeugern wird in der letzten Zeit von Hafnern vermehrt in Hypokausten-Anlagen als Wärmeerzeuger eingesetzt. Die Einsätze werden als Halbfabrikat eingekauft, d.h. die Schamottierung wird vor Ort eingebaut.

| Technische Daten:      |      | Heizeinsatz | Nachheizfläche |
|------------------------|------|-------------|----------------|
| Aussenabmessungen:     |      |             |                |
| Länge                  | [mm] | 900         | 557            |
| Breite                 | [mm] | 450         | 320            |
| Höhe                   | [mm] | 810         | 800            |
| Gewicht total:         |      | [kg]        | 95             |
| Guss                   | [kg] | 185         | 95             |
| Schamotte              | [kg] | 103         |                |
| Keramikfaser-Formteile | [kg] | 11          |                |
| Holzlänge              | [cm] | 50          |                |
| Füllkapazität Hartholz | [kg] | 15          |                |

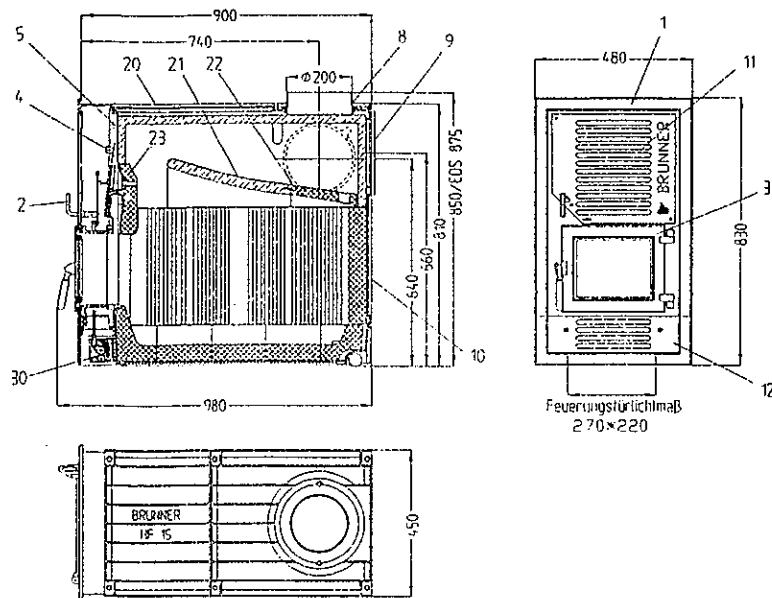


**Bild 2.2-1:**  
**Guss-Heizeinsatz mit Schamottierung**

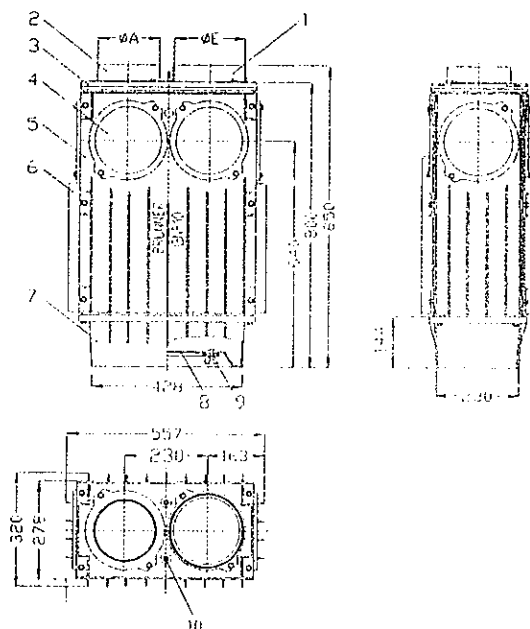


**Bild 2.2-2:**  
**Guss-Nachheizregister**

Üblicherweise werden im Anschluss an den Heizeinsatz eine oder mehrere Nachheizflächen angeordnet, um die im Rauchgas enthaltene Energie besser auszunutzen. Für eine Versuchsreihe wurden zwei Guss-Nachheizregister (siehe Bild 2.2-2) eingesetzt.

Die vom Hersteller angegebenen Leistungswerte beziehen sich auf die bei der Typenprüfung (z.B. DIN-Prüfung) ermittelten Angaben. Diese Leistungsangaben können für die Planung einer Hypokausten-Anlage nicht übernommen werden, da sie kurzfristig auftretende Maximalwerte darstellen.

Der Warmluft-Heizeinsatz wurde in verschiedenen Kombinationen ausgemessen:

- mit zwei Guss-Nachheizregistern
- mit einem massearmen Wärmetauscher.

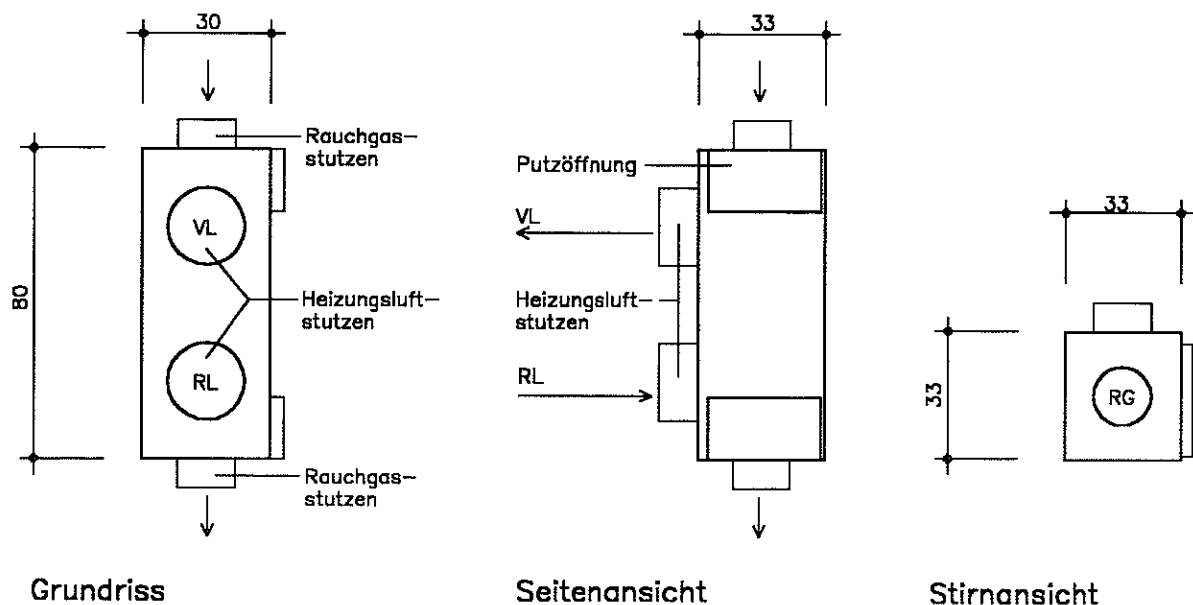


**Bild 2.2-3:**  
**Skizze massearmer Wärmetauscher**

Der massearme Wärmetauscher besteht aus einer Stahlblechkonstruktion mit innenliegenden Rauchgastaschen.

### 2.3 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer

Für eine Hypokausten-Heizung ist ein System mit gutem Speicherverhalten und/oder eine Feuerung mit langem Abbrand von Vorteil. Das hier ausgemessene Fabrikat stellt einen Holzgasbrenner dar mit einem Feuerraum aus vorfabrizierten hochwertigen Schamotte-Elementen und einem grossen Füllvolumen. Die Brennkammer hat einen unteren, hinteren Abbrand und weist für eine Ofenbrennkammer eine lange Brenndauer auf. Das Aggregat benötigt einen Kaminventilator, um eine einwandfreie, emissionsarme Verbrennung zu gewährleisten.

Es wurde ein Modell ohne elektronische Verbrennungsregelung untersucht. Die Verbrennungsluft-Zufuhr erfolgt über eine Voreinstellung für Primär- und Sekundärluft, ansonsten ungeregelt. Der Heizeinsatz wurde in Kombination mit einem massenarmen Wärmetauscher untersucht.

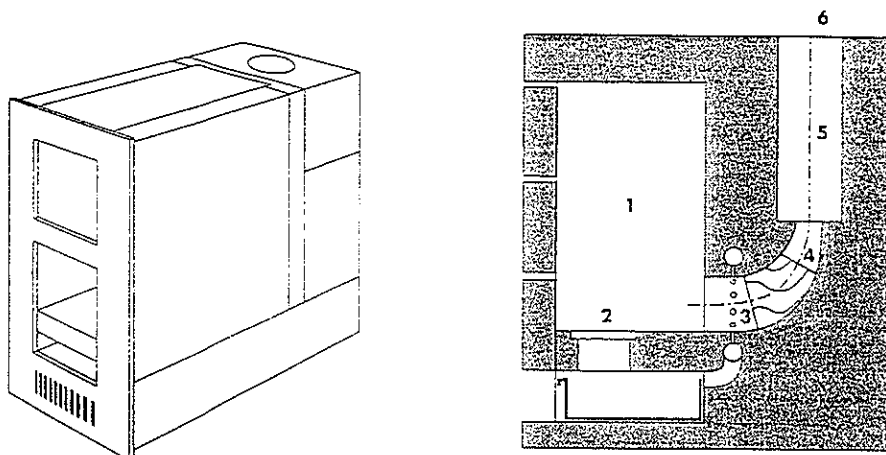


**Bild 2.3-1:**  
**Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer**

a) Ansicht

b) Schemaschnitt

**Legende:** 1 Füllraum  
2 Primärluft  
3 Sekundärluft

4 Mischkammer  
5 Nachbrennkammer  
6 Beginn Wärmenutzung

| Technische Daten:      |             | Heizeinsatz |
|------------------------|-------------|-------------|
| Aussenabmessungen:     | Länge [mm]  | 930         |
|                        | Breite [mm] | 480         |
|                        | Höhe [mm]   | 1360        |
|                        |             |             |
| Gewicht total:         |             | [kg] 650    |
| Holzlänge              |             | [cm] 50     |
| Füllkapazität Hartholz |             | [kg] 35     |

## 2.4 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise

Als dritter charakteristischer Feuerraum wurde ein individuell gemauerter hoher Feuerraum, wie er im Hafnergerwebe verwendet wird, aufgebaut. Die Feuerung war mit einer automatischen Verbrennungsregelung ausgerüstet. Die Dimension des Feuerraumes und der nachgeschalteten Züge wurde mit dem Berechnungsprogramm des Österreichischen Kachelofenverbandes bestimmt. Der Berechnung wurden die Eckdaten 6 kW Wärmeleistung während 12 Stunden vorgegeben, was einer Holzmenge von 22 kg Holz pro Charge entspricht. Beim Feuerraum handelt es sich um einen Biofeuerraum, der sich durch eine schlanke, hohe Form auszeichnet. Der Abbrand erfolgt nach dem Durchbrandprinzip. Dem Feuerraum ist direkt ein keramischer Sturz- und Steigzug mit nachfolgendem keramischen Kehrzug über dem Feuerraum angebaut. Dem kompakten „Keramikkblock“ ist noch eine Stahlnachheizfläche in Form eines Sturz- und Steigzuges nachgeordnet. Diese Wärmeerzeugung wurde als komplette Kombination ausgemessen.

| Technische Daten :     |             | Heizeinsatz |
|------------------------|-------------|-------------|
| Aussenabmessungen:     | Länge [mm]  | 1230        |
|                        | Breite [mm] | 570         |
|                        | Höhe [mm]   | 1400        |
| Gewicht total:         | [kg]        | 950         |
| Holzlänge              | [cm]        | 50          |
| Füllkapazität Hartholz | [kg]        | 22          |

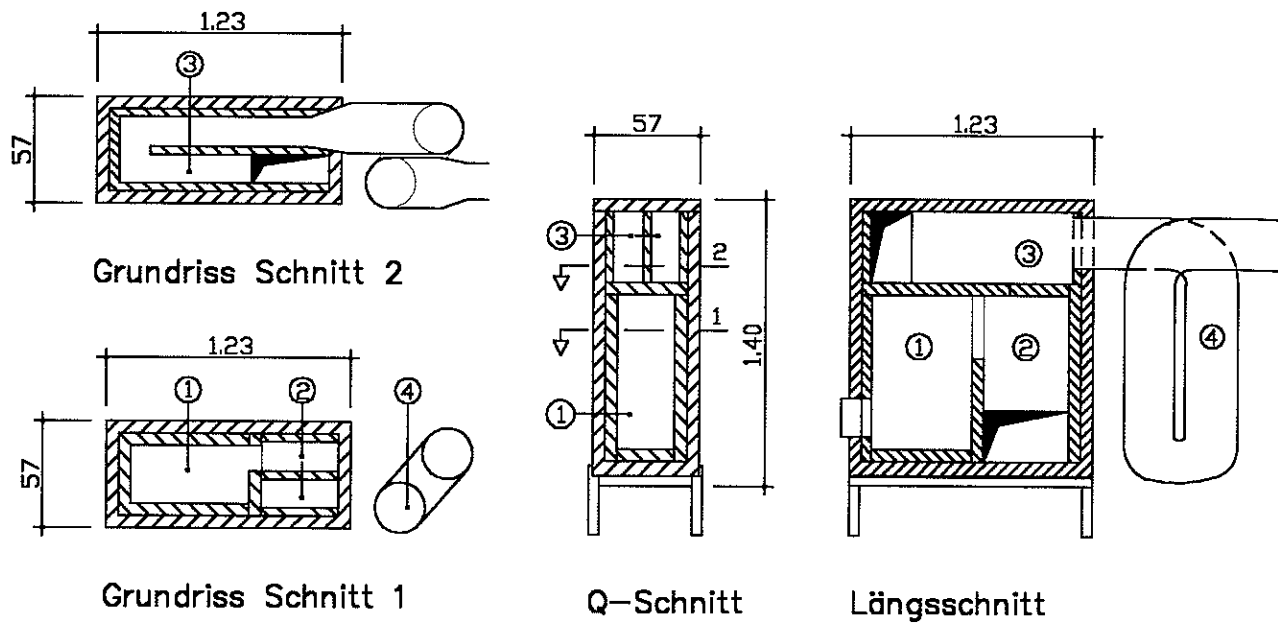


**Bild 2.4-1**  
**Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise**  
**mit integrierten keramischen Zügen**

**Legende:**    1 Brennraum                      3 Liegender Kehrzug  
                   2 Sturz-Steigzug                    4 Stahl-Nachheizfläche

---

### **3.     UNTERSUCHUNGSMETHODEN**

---

Die Untersuchungen wurden an Praxisanlagen und am Laborprüfstand vorgenommen.

#### **a) Praxisanlagen**

An ausgewählten, für holzbetriebene Hypokausten-Heizungen zum Zeitpunkt des Projektbeginns repräsentativen Praxisanlagen wurden Vorerhebungen durchgeführt.

#### **b) Laborprüfstand**

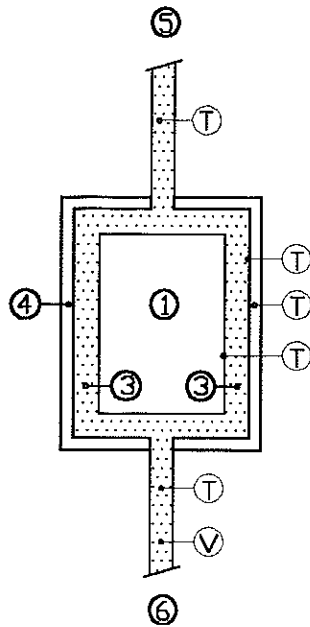
Der Hauptteil der Arbeiten betraf die Untersuchung von verschiedenen gebräuchlichen Bauarten und Komponenten von Wärme erzeugungsanlagen und deren Optimierung für die spezifischen Anforderungen der Hypokausten-Heizung im Labor am Wärmeerzeuger-Prüfstand (WEZ 1).

#### **3.1     Untersuchungen an Praxisanlagen**

Bei den Praxisanlagen handelt es sich um fertig installierte, in Betrieb stehende Hypokausten-Anlagen in Einfamilienhäusern. Die interessierenden Anlagenteile wie Heizungsluft- Rohrleitungen und das Innere der Wärmeerzeuger waren zum Teil schwer zugänglich, und die Durchführung der Messungen musste sich im Rahmen des für die Bewohner Zumutbaren bewegen.

Bisher ausgeführte holzbetriebene Hypokausten-Wärmeerzeugungsanlagen bestehen im allgemeinen aus Heizeinsatz, Nachheizfläche, Konvektionsspalt und Ummantelung. In Bild 2.1-1 ist der Aufbau einer typischen mehrstufigen Anlage mit zwei Nachheizflächen dargestellt. Die Nachheizflächen erfüllen verschiedene Funktionen: Speicher und Schnellerhitzer. Für die einzelnen Komponenten sind verschiedene Bauweisen üblich. Diese unterscheiden sich wesentlich bezüglich der Leistungscharakteristik.

## Querschnitt



## Längsschnitt

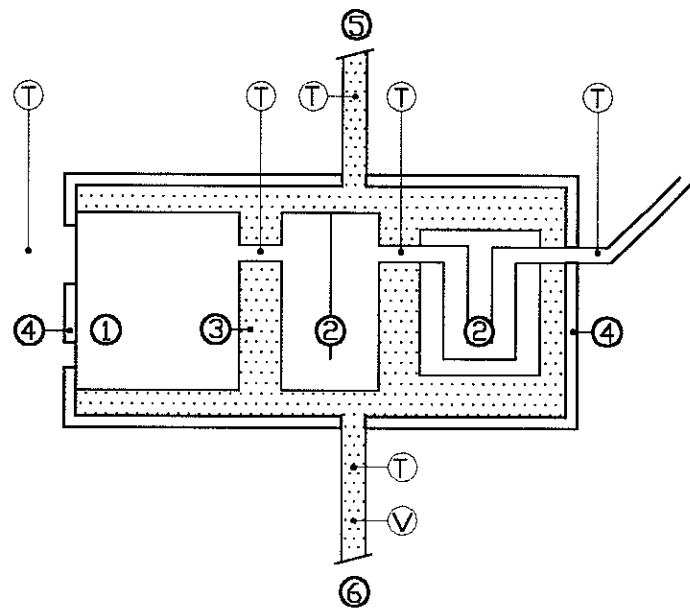


**Bild 3.1-1:**

**Schematische Darstellung holzbetriebene Hypokausten-Wärmeerzeugung  
Aufbau, Anordnung Messgrößen**

|                 |                            |                                |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| <b>Legende:</b> | <b>1 Heizeinsatz</b>       | <b>4 Mantel</b>                |
|                 | <b>2 Nachheizfläche</b>    | <b>5 Heizungsluft-Vorlauf</b>  |
|                 | <b>3 Konvektionsspalt</b>  | <b>6 Heizungsluft-Rücklauf</b> |
|                 | <b>T Temperatur-Messg.</b> | <b>V Volumenstrom-Messg.</b>   |

Ziel der Feldmessungen war es, Kenntnisse über die Betriebsabläufe von Hypokausten-Heizungen unter Praxisbedingungen zu erhalten und Hinweise für den Forschungs-, bzw. Entwicklungsbedarf im Rahmen des Projektes zu gewinnen.

Die objektspezifischen Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen und die beschränkten Möglichkeiten der Messdatenerhebung, insbesondere bei der Volumenstrommessung, liessen bei den Praxisanlagen keine Aussagen über die Heizungsluftleistung zu. Ebenso war die Ermittlung der feuerungstechnischen Daten nicht Ziel der Untersuchungen. Durchgeführt wurden hauptsächlich Temperaturmessungen des Rauchgases, der Heizungsluft, an Oberflächen und in Speichermassen. Die bei den einzelnen Anlagen eingesetzte Messmethodik ist in den Abschnitten 4.1 und 4.2 beschrieben.

## 3.2 Untersuchungen im Labor

### 3.2.1 Versuchseinrichtungen Wärmeerzeugung

Die Versuchseinrichtungen für die Untersuchung der Wärmeerzeugungsanlagen umfassen im wesentlichen den Prüfstand WEZ 1, das Rohrleitungssystem des Heizungsluft-Kreislaufes und die Strahlungswände zur Energievernichtung. Die schematische Darstellung der Versuchseinrichtung ist in Bild 2.2-1 dargestellt.

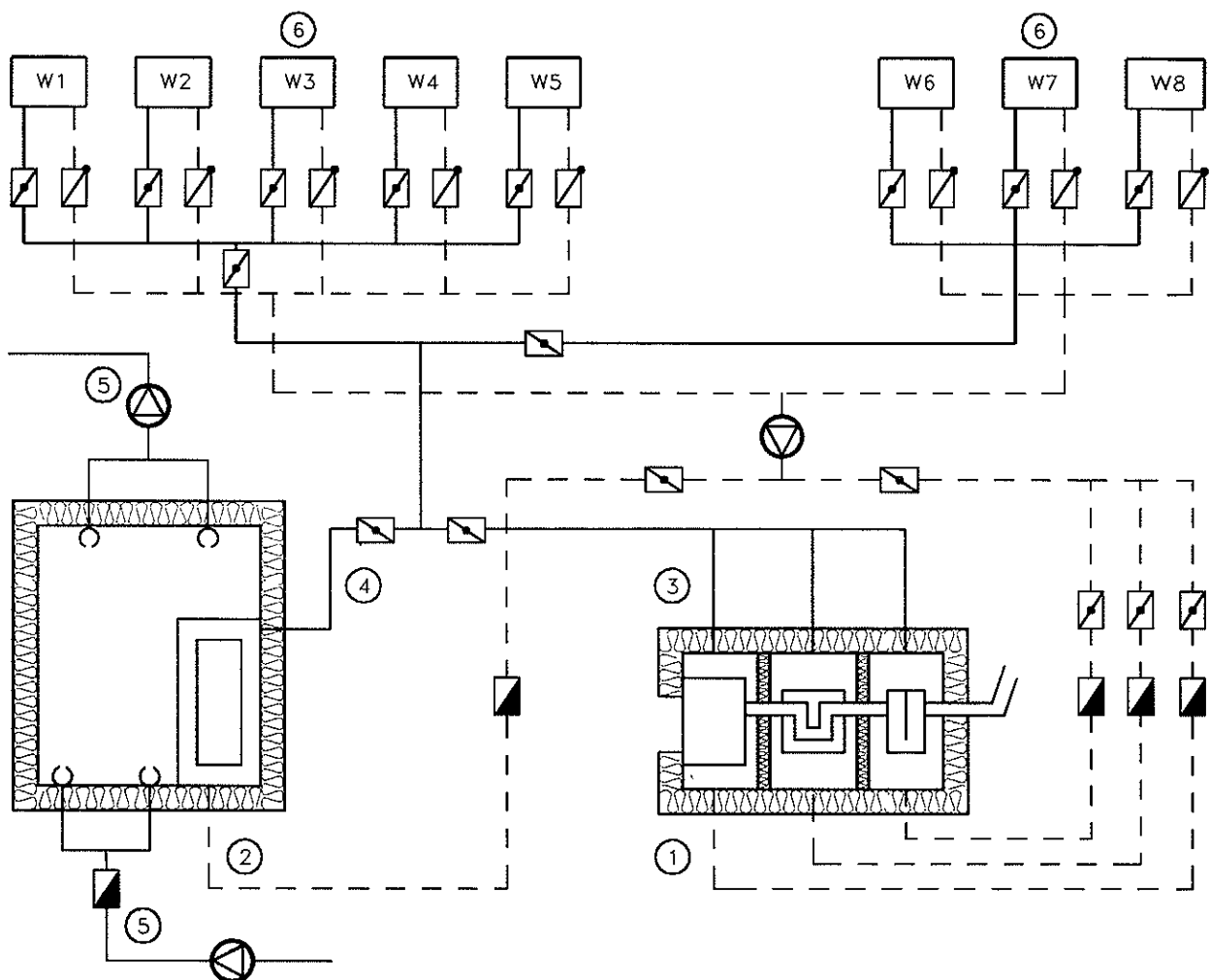


**Bild 3.2-1**  
Schema Versuchseinrichtung Wärmeerzeugung

**Legende:**

|                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1) Prüfstand WEZ 1             | 4) Heizungsluftkreislauf WEZ 2  |
| 2) Prüfstand WEZ 2             | 5) Raumluft-Messkreislauf WEZ 2 |
| 3) Heizungsluftkreislauf WEZ 1 | 6) Strahlungswände              |

Die Versuchseinrichtung dient zur Ermittlung der Warmluftleistung von Heizeinsätzen und Nachheizflächen. Untersucht wurden gebräuchliche, im Handel befindliche Aggregate, sowie optimierte Varianten und Neuentwicklungen, die den Anforderungen für den Einsatz in Hypokausten-Heizungen besonders gerecht werden.

Der Prüfstand WEZ 1 besteht aus einem im Min. 20 cm stark isolierten Kalorimeterraum mit variabler Raumaufteilung. Die Verrohrung ist so angeordnet, dass am Prüfstand bis 3 separate Messkreisläufe, parallel oder in Serie geschaltet, gleichzeitig betrieben werden können. Schemapläne über die bauliche Gestaltung und die Messeinrichtungen sind in den Kapiteln über die einzelnen Versuchsaufbauten enthalten. Die luftdicht erstellten Umschliessungsflächen des Prüfstandes bestehen aus verzinktem Blech mit Steinwolle-Isolation. Mittels Klappen können die einzelnen Kammern mit verschiedenen Volumenströmen betrieben werden.

Das Wärmeverteilungssystem ist so dimensioniert und ausgebildet, dass die bei den Versuchen zu erwartenden Warmluft-Wärmeleistungen unter wirklichkeitsnahen Bedingungen abgeführt werden können. Die acht je 1.2 x 1.6 m grossen Strahlungswände wurden zu Demonstrationszwecken in verschiedenen Bauweisen aus Plattenmaterialien oder Schamotte-Hohlelementen erstellt. Das Rohrleitungssystem wurde mit isolierten Spiralfalz-Rohren ausgeführt.

Um die Leistung des Wärmeerzeugers und der Nachheizflächen zu bestimmen, wurden die entsprechenden Warmluftleistungen ermittelt. Für die jeweiligen Aggregate wurden die Luftvolumenströme sowie die Ein- und Austrittstemperaturen über die ganze Versuchsdauer gemessen. Die Leistung wurde aus den Mittelwerten der Messresultate über die entsprechenden Zeitperioden berechnet. Die Energiebilanz wurde über den Energieinhalt des Holzgewichtes und die gemessene Energiemenge erstellt. Ebenfalls gemessen wurden die Rauchgastemperaturen an den wichtigsten Punkten, wie z.B. an den Rauchgasstutzen von Wärmeerzeuger und Nachheizflächen sowie beim Kamineintritt.

Der Prüfstand WEZ 2 wurde in Anlehnung an den Normenentwurf ISO/TC 116-SC3 für die Prüfung von Ofenfeuerungen als Kalorimeterraum im Rahmen des vorliegenden Projektes bereits erstellt, soll aber in einem Folgeprojekt (siehe 8. Ausblick) zum Einsatz kommen.

In diesem Prüfraum werden Wärmeerzeugungsanlagen im Wohnbereich (Hypokausten-Kachelofen) untersucht. Es wird ermittelt, welcher Anteil der Wärmeleistung an den Aufstellungsraum abgegeben wird und welcher Anteil über das Hypokausten-System für die restlichen Räume zur Verfügung steht. Dafür werden verschiedene Bauweisen des Hypokausten-Kachelofens, insbesondere des Ofenmantels untersucht. Die Zielsetzung beinhaltet kosten- und funktionsgemäss optimierte Konstruktionsdetails und Dimensionierungshinweise für eine bedarfsgemäss richtig aufgeteilte Wärmeabgabe.

Der Raum weist eine Innen-Grundfläche von 2.64 x 3.62 m auf und ist 20 cm stark isoliert. Es sind zwei Mess-Kreisläufe angeschlossen: der Heizungsluftkreislauf in Kombination mit dem Prüfstand WEZ 1 und der Mess-, bzw. Kühlkreislauf für die Wärmeabgabe an den Raum.

### **3.2.2 Varianten Versuchsanordnung und Messmethoden**

Gemäss der Zielsetzung sollten verschiedene gebräuchliche Bauarten und Komponenten von holzbetriebenen Wärmeerzeugungsanlagen auf ihre Eignung für den Einsatz in Hypokausten-Anlagen hin untersucht und gegebenenfalls optimiert werden. Im Verlaufe der Arbeiten zeigte sich, dass der Lösungsweg an die jeweils untersuchten Anlagentypen angepasst werden musste.

Es wurden zwei grundsätzlich verschiedene Versuchsanordnungen und Messprinzipien angewendet:

- a) Untersuchung von kompletten Anlagen mit allen Komponenten, d.h. Heizeinsatz mit Nachheizregistern. Untervarianten paralleler und serieller Betrieb.
- b) Untersuchung des Heizeinsatzes (Wärmeerzeuger ohne Nachheizflächen) allein mit einem massearmem Wärmetauscher zur Bestimmung des Energieinhaltes im Rauchgas, paralleler Betrieb.

| Typen Wärmeerzeugung                                                               | Heizeinsatz mit Nachheizregistern (Komplette Anlage) |         | Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------|
|                                                                                    | Parallel                                             | Seriell | Parallelbetrieb                          |
| Warmluft-Heizeinsatz (Guss) mit zwei Guss-Nachheizflächen                          | +                                                    |         | +                                        |
| Gemauerter Heizeinsatz mit langer Brenndauer                                       |                                                      |         | +                                        |
| Gemauerter Heizeinsatz mit integrierten keramischen Zügen und Stahl-Nachheizfläche | +                                                    | +       |                                          |

**Tabelle 3.2-1:**  
**Übersicht der untersuchten Varianten**

Die Variante mit dem massearmen Wärmetauscher drängte sich auf, da die Entwicklung der Wärmeerzeugung für Hypokausten-Heizungen sich an den Komfort einer Holz-Zentralheizung annähert und die aus der Kachelofen-Warmluftheizung übernommenen Bauweisen der Nachheizflächen für Hypokausten-Ganzhausheizungen an Bedeutung verlieren. Zunehmend werden Wärmeerzeugungsanlagen mit langen Füllintervallen eingesetzt, wobei die Energie über einen längeren Zeitraum auf möglichst hohem Temperaturniveau an das Hypokausten-System abgegeben werden soll. Neben der Untersuchung der Einzelkomponenten ist für die Speicherdimensionierung auch die Kenntnis der im Rauchgas nach dem Heizeinsatz enthaltenen Energie bezüglich Menge, Temperaturniveau und zeitlichem Verlauf zwischen den Füllintervallen wichtig.

Neben den in den folgenden Schema-Skizzen aufgeführten energiebezogenen Messpunkten wurden jeweils noch weitere Temperaturfühler für Oberflächen- und Massentemperaturen angebracht (siehe Darstellungen in Kapitel 5).

### 3.2.3 Versuchs- und Messanordnung Heizeinsatz mit Nachheizregistern

Die Elemente Heizeinsatz bzw. Brennraum und Nachheizflächen wurden in voneinander getrennten, isolierten Kammern installiert und mit den ihrer voraussichtlichen Leistung entsprechenden Volumenströmen beschickt. Im Verlaufe der Messungen wurde festgestellt, dass die Leistungswerte der einzelnen Komponenten nicht eindeutig bestimmt werden konnten. Die Ursache lag in den Quereinflüssen aus Wärmeübertragungen über gemeinsame Rauchrohre und Zwischenwände im hohen Temperaturbereich, die die Resultate über Erwarten stark beeinflussen. Die einzelnen Komponenten werden zwar messtechnisch getrennt erfasst, für die Auswertung ist die Anlage jedoch als kompakte Einheit zu betrachten.

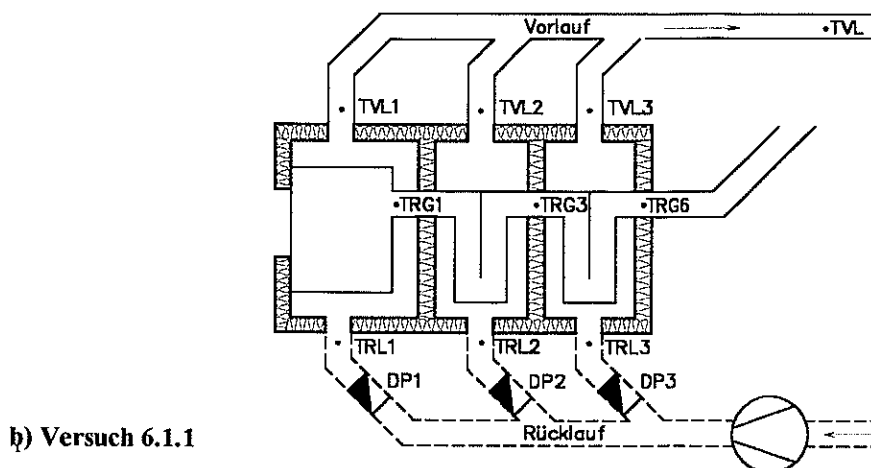
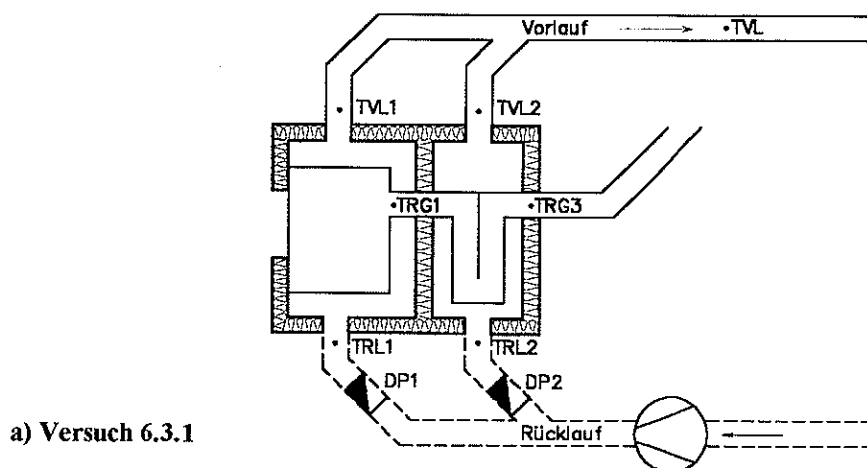


**Bild 3.2-2: Versuchs- und Messanordnung  
Heizeinsatz mit Nachheizregistern und paralleler Luftführung**

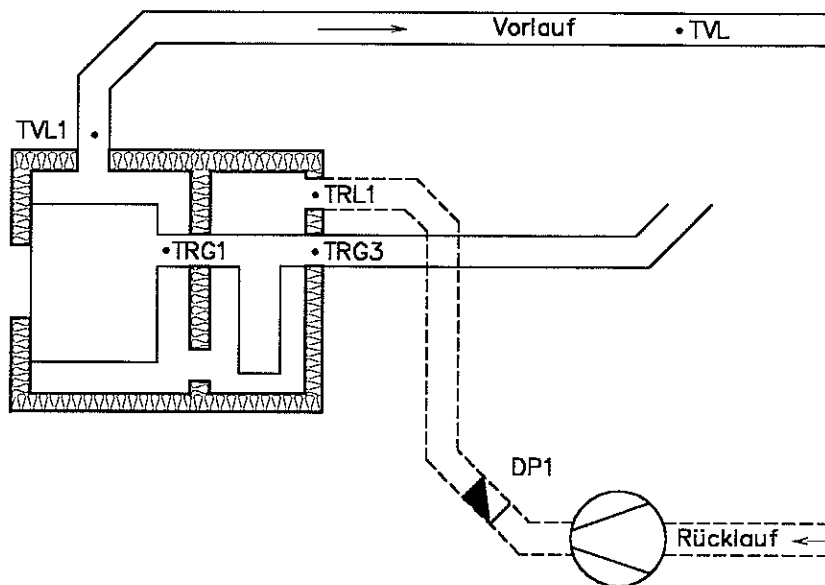


**Bild 3.2-3: Versuchs- und Messanordnung  
Heizeinsatz mit Nachheizregistern und serieller Luftführung**

Instrumentierung der Prüfstände gem. Bild 3.2-2 und 3.2-4:

|             |                          |                                                                                                       |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TVL 1,2,3   | Temperatur Vorlauf [°C]  | 3 Fühler je Messtelle<br>1,2,3 = Nummer der Prüfkammer<br>(Bei seriellem Betrieb nur 1 Prüfkammer)    |
| TRL 1,2,3   | Temperatur Rücklauf [°C] |                                                                                                       |
| DP 1,2,3    | Druckdifferenz [Pa]      | Druckmess-Stutzen am Volumenstrom Messkörper. Aus der Druckdifferenz wird der Volumenstrom errechnet. |
| TRG 1,2, .. | Temperatur Rauchgas [°C] | 1,2, .. Nummer der Messtelle,<br>Anordnung siehe Schemapläne                                          |

### 3.2.4 Versuchs- und Messanordnung Heizeinsatz mit massearmem Rauchgas-Luft-Wärmetauscher

Der Prüfkammer für den Heizeinsatz wurde ein gut isolierter, annähernd masseloser Rauchgas-Luft-Wärmetauscher nachgeschaltet. Zusätzlich wurde ein Rauchgasanalysegerät installiert.

Aus den Messwerten (Lufttemperaturen, Volumenströme, Drücke) wurden die folgenden Größen rechnerisch ermittelt:

- Warmluftleistung des Heizeinsatzes
- Rauchgasmassenstrom
- die für nachgeschaltete Speicher nutzbare Energie

Anhand der gemessenen und rechnerisch ermittelten Werte kann eine Aussage über die Verbrennungsleistung und die Warmluftleistung des Heizeinsatzes gemacht werden. Im weiteren kann festgestellt werden, welche Energieanteile der aufgewendeten Energie vom Heizeinsatz abgegeben werden und wie gross der Energieanteil ist, der noch für nachgeschaltete Wärmetauscher (Feststoff-Speicher) zur Verfügung steht.

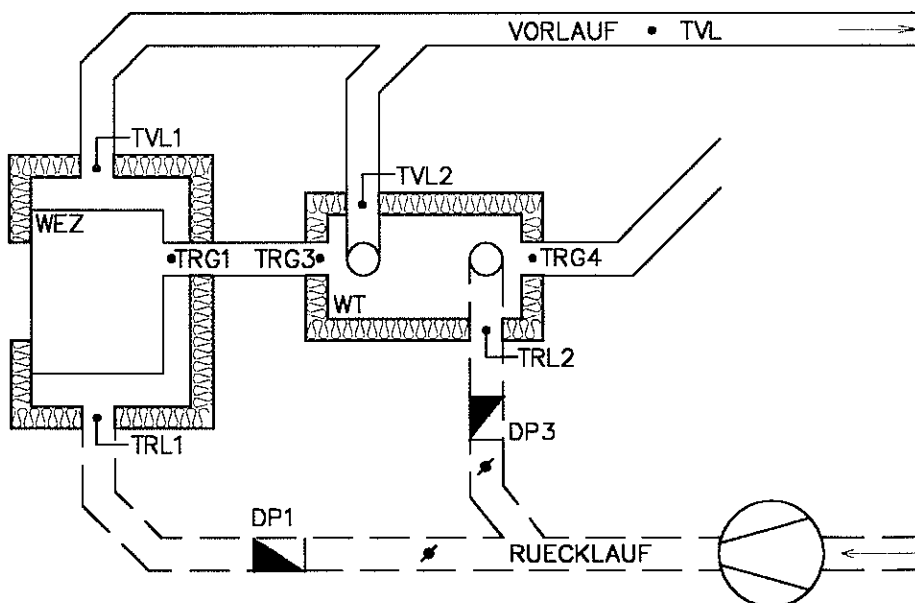


**Bild 3.2-4: Versuchs- und Messanordnung**  
**Heizeinsatz mit massearmem Rauchgas/Luftwärmetauscher, parallele Luftführung**

### 3.3 Messtechnik

Bei der Instrumentierung war vor allem auf ein flexibles Konzept zu achten, weil zu Beginn des Projektes noch nicht alle zu messenden Parameter feststanden. Bei der Temperatur-Messtechnik war die zum Teil hohe thermische, bei Rauchgasfühlern auch chemische Belastung der Messfühler zu beachten. Um jederzeit den Überblick über den Versuchsablauf zu gewährleisten, wurde eine online-Anzeige der Messwerte, teilweise auch des zeitlichen Verlaufs der Messwerte verlangt.

Generell kann gesagt werden, dass die gesamte Versuchsanlage in ihrem Endausbau einen Komplexitätsgrad erreicht hat, der höchste Ansprüche an die Instrumentierung stellte. Neben der eigentlichen Messdaten-Erfassung waren gleichzeitig auch Steuerungs- und Regelungsaufgaben zu erfüllen.

Die Messdatenerfassung erfolgte mit zwei verschiedenen Geräten: Einerseits mit einem PC mit 64-Kanal-Messwert-Erfassungskarte und vorgeschalteten Signalwandlern, andererseits mit einem System bestehend aus einem 80-Kanal-Messstellenumschalter und einem System-Digitalvoltmeter, angesteuert vom PC über GPIB (IEEE)-Bus (siehe Anhang).

Für mobile Messungen wurde zusätzlich ein System-Multimeter mit eingebautem 9-Kanal-Scanner und serieller Übertragung auf einen Notebook-Computer eingesetzt. Dieses Gerät wurde vor allem für Messungen an Praxisanlagen verwendet.

Bei allen Systemen kam die Messdaten-Erfassungssoftware TESTPOINT für Windows zum Einsatz. Die eigentliche Auswertung und Darstellung der Messwerte erfolgte offline unter EXCEL.

Im hier vorgelegten Teilprojekt interessierten, wie bereits erwähnt, hauptsächlich die Warmluftleistung der Prüflinge sowie verschiedene Temperaturverläufe.

Die Warmluftleistung wurde nach der Beziehung

$$P = c_w \cdot \dot{m} \cdot \delta\vartheta$$

|                 |                               |                                                                    |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| bestimmt, wobei | $c_w$                         | die spezifische Wärme der Luft,                                    |
|                 | $\dot{m}$                     | den Massendurchsatz und                                            |
|                 | $\delta\vartheta = T_a - T_e$ | die Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt darstellen. |

Messtechnisch zu bestimmen waren dabei die Grössen  $\dot{m}$ ,  $T_a$  und  $T_e$ .

Der Massendurchsatz wurde abgeleitet aus dem Wirkdruck an einem Zweikammer-Messkörper unter Verrechnung mit der temperatur- und luftdruckabhängigen Luftdichte. Die Temperaturen wurden mit Thermoelementen gemessen.

Probleme bereitete insbesondere die Kompressibilität und damit Schwingfähigkeit der bewegten Luftmassen, was zu starken zeitlichen Schwankungen der Durchflusssignale führte und eine hard- und softwaremässige Glättung erforderte.

Zusätzlich wurden die Rauchgastemperaturen gemessen, um den Abbrandverlauf zu beschreiben. Durch die Erfassung verschiedener Oberflächentemperaturen konnte das thermische Verhalten des Prüflings näher charakterisiert werden.

Der Energieinhalt des verbrannten Holzes wurde durch vorgängiges Abwägen und Ermitteln der Holzfeuchtigkeit bestimmt. Um die Reproduzierbarkeit zu verbessern, wurden teilweise standardisierte Pellets aus gepressten Holzspänen verwendet.

Die Instrumentierung des Prüfstandes WEZ 1 wurde der jeweiligen Versuchssystematik, bzw. den verschiedenen Geräten u. Gerätekombinationen angepasst und ist dort dargestellt.

### 3.4 Verwendete Formeln

|                                                                    |                                                                                                             | Einheit           | Formel |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------|
| <b>Dichte</b>                                                      |                                                                                                             |                   |        |
| $\rho_{\text{Luft / RG}}$                                          | $= \rho_o * 273 / (273 + t)$                                                                                | $[\text{kg/m}^3]$ | [1]    |
| <b>Spez. Wärme</b>                                                 |                                                                                                             |                   |        |
| $c_{\text{Luft / RG}}$                                             | $= c_o * 273 / (273 + t)$                                                                                   | $[\text{kg/m}^3]$ | [2]    |
| <b>Leistung Wärmeerzeuger</b>                                      |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_1$                                                              | $= \rho_{L1} * V_1 * c_{\text{Luft}} * (T_{\text{VL}1} - T_{\text{RL}1})$                                   | [W]               | [3]    |
| <b>Leistung massenloser Wärmetauscher</b>                          |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_2$                                                              | $= \rho_{L2} * V_2 * c_{\text{Luft}} * ((T_{\text{VL}2} + T_{\text{VL}3}) / 2 - T_{\text{RL}2})$            | [W]               | [4]    |
| <b>Leistung Verbindungsstück</b>                                   |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{VLt}}$                                                   | $= m_{\text{rg}} * c_{\text{rg}} * (T_{\text{rg}2} - (T_{\text{rg}3} + T_{\text{rg}5}) / 2)$                | [W]               | [5]    |
| <b>Leistung Rauchgas auf Umgebungstemperatur</b>                   |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{rg}}'$                                                   | $= m_{\text{rg}} * c_{\text{rg}} * ((T_{\text{rg}4} + T_{\text{rg}6}) / 2 - T_{\text{VL}0})$                | [W]               | [6]    |
| <b>Leistung Rauchgas auf Kamineintrittstemperatur 150°C</b>        |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{rg}}$                                                    | $= m_{\text{rg}} * c_{\text{rg}} * ((T_{\text{rg}4} + T_{\text{rg}6}) / 2 - 150)$                           | [W]               | [7]    |
| <b>Rauchgasmassenstrom</b>                                         |                                                                                                             |                   |        |
| $m_{\text{rg}}$                                                    | $= Q_2 / c_{\text{rg}} * ((T_{\text{rg}3} + T_{\text{rg}5}) / 2 - ((T_{\text{rg}4} + T_{\text{rg}6}) / 2))$ | $[\text{kg/s}]$   | [8]    |
| <b>Leistung Total auf Umgebungstemperatur (theoretisch)</b>        |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{summ}}'$                                                 | $= Q_1 + Q_{\text{VLt}} + Q_2 + Q_{\text{rg}}'$                                                             | [W]               | [9]    |
| <b>Leistung Total auf Kamineintrittstemperatur 150°C (nutzbar)</b> |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{summ}}$                                                  | $= Q_1 + Q_{\text{VLt}} + Q_2 + Q_{\text{rg}}$                                                              | [W]               | [10]   |
| <b>Theoretische Luftleistung</b>                                   |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{theo}}$                                                  | $= V_1 * c_{\text{Luft}} * \Sigma \Delta T$                                                                 | [W]               | [11]   |
| <b>Energiemenge Total (theoretisch)</b>                            |                                                                                                             |                   |        |
| $Q_{\text{Total}}'$                                                | $= Q_{\text{summ}}' * t_{\text{Abbrand}}$                                                                   | [Wh]              | [12]   |

**Energiemenge Total auf Kamineintrittstemperatur 150°C (nutzbar)**

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{summ}} * t_{\text{Abbrand}} \quad [\text{Wh}] \quad [13]$$

**Energiemenge Holz (Input)**

$$Q_{\text{Holz}} = m_{\text{Holz}} * H_u \quad [\text{Wh}] \quad [14]$$

**Wirkungsgrad auf Kamineintrittstemperatur 150°C (Output)**

$$\eta = Q_{\text{summ}} / Q_{\text{Holz}} * 100 \quad [\%] \quad [15]$$

**Temperaturdifferenz Speicherspreizung Wärmeerzeuger**

$$\Delta T_m = Q_1 / m_{\text{Ofen}} * c_{\text{Ofen}} \quad [\text{K}] \quad [16]$$

**Temperaturdifferenz Luftaus- und Eintritt**

$$\Delta T_1 = T_{\text{VL}1} - T_{\text{RL}1} \quad [\text{K}] \quad [17]$$

$$\Delta T_1 = Q_1 / c_{\text{Luft}} * m_{\text{Luft}1} \quad [\text{K}] \quad [18]$$

$$\Delta T_2 = Q_2 / c_{\text{Luft}} * m_{\text{Luft}1} \quad [\text{K}] \quad [19]$$

$$\Delta T_{\text{VLt}} = Q_{\text{VLt}} / c_{\text{Luft}} * m_{\text{Luft}1} \quad [\text{K}] \quad [20]$$

$$\Delta T_{\text{rg}} = Q_{\text{rg}} / c_{\text{Luft}} * m_{\text{Luft}1} \quad [\text{K}] \quad [21]$$

$$\Sigma \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_{\text{VLt}} + \Delta T_{\text{rg}} \quad [\text{K}] \quad [22]$$

$$\Delta T_{\text{theo}} = Q_{\text{theo}} / c_{\text{Luft}} * m_{\text{Luft}} \quad [\text{K}] \quad [24]$$

**Theoretische mittlere Luftaustrittstemperatur**

$$T_{\text{VL th}} = (T_{\text{RL}1} + T_{\text{RL}2})/2 + \Delta T_{\text{the}} \quad [\text{K}] \quad [25]$$

**Approximative Massenbestimmung Nachheizfläche**

$$\text{Masse NHF} = \text{Masse Heizeinsatz} * (Q_{\text{summ}} - Q_1) / Q_1 \quad [\text{K}] \quad [26]$$

---

## **4. VORERHEBUNGEN AN PRAXISANLAGEN**

---

Im Sinne einer Standortbestimmung wurden Vorerhebungen an verschiedenen bestehenden Hypokausten-Anlagen in Einfamilienhäusern mit einem Wärmebedarf von ca. 5 bis 12 kW durchgeführt. Diese lassen sich ganz generell in zwei typische Bauweisen unterteilen: Anlagen mit schwerer Bauweise der Wärmeerzeugung und solche mit leichter Bauweise.

Bei den Messungen vor Ort zeigte sich, dass eine Beurteilung des Wärmeabgabeverhaltens unter Praxisbedingungen wegen der unterschiedlichen objekt- und betriebsspezifischen Randbedingungen erschwert ist. Deswegen und auch wegen der teilweise beschränkten Möglichkeiten der Messdatenerfassung an der fertigen Anlage exakte Vergleiche zwischen verschiedenen Anlagentypen nicht möglich. Die Messresultate sind deshalb als Hinweise auf das systemspezifische Verhalten zu betrachten. In der Folge werden die Messergebnisse je einer ausgewählten typischen Anlage beispielhaft dargestellt.

### **4.1 Anlagentyp 1, schwere Bauweise**

#### **4.1.1 Anlagebeschrieb**

Hypokausten-Anlage zur Beheizung eines neuen Einfamilienhauses, Wärmeerzeugung zentral im Kellergeschoss angeordnet, Heizungsluft-Umwälzung mit Schwerkraft. Der Wärmebedarf des Hauses nach SIA beträgt 9.5 kW. Total 9 beheizte Zimmer im EG und OG. Wärmeverteilung mit Spiralfalzrohren und Strahlungsflächen aus Schamotte-Hohlelementen.

Die Wärmeerzeugung besteht aus einem typisierten, individuell gemauerten Heizeinsatz, Durchbrandprinzip mit integrierten Kehrzügen und zwei Nachheizflächen. Die erste als Schnellerhitzer in Form eines Sturz-Steigzuges aus Stahl, die zweite als keramischer Sturz-Steigzug (Feststoffspeicher). Das Gewicht der Wärmeerzeugung beträgt ohne Aussenmantel ca. 3'500 kg. Die bauliche Ausführung der Wärmeerzeugung ist im Bild 4.1-1 und schematisch im Bild 4.1-2 dargestellt.

Charakteristisch für diese Art Anlagen ist die Ummantelung des gemauerten Heizeinsatzes mit Schamotte-Hohlelementen mit der Funktion des Konvektionsspalt und ein anschliessender Sekundärspeicher aus Kaminsteinen (Schamotte). Die Nachheizflächen werden frei von der Heizungsluft umspült, auch dort ist ausserhalb des Konvektionsspalt des Sekundärspeicher angeordnet. Dieser wird im Bereich des Heizeinsatzes über Wärmeleitung und im Bereich der Nachheizflächen über Wärmestrahlung aufgeheizt.

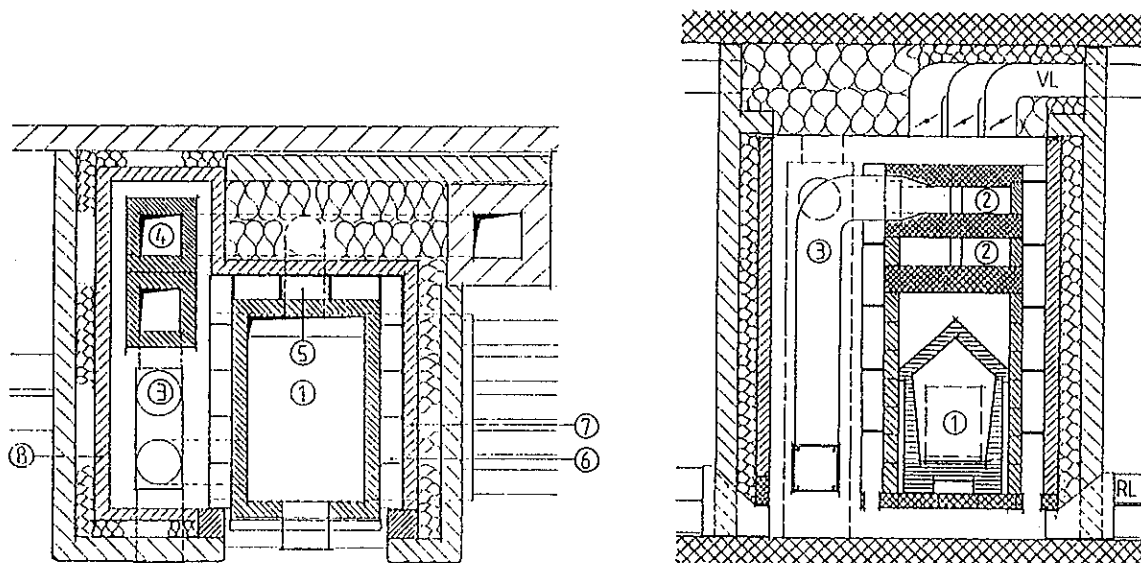


**Bild 4.1-1:**  
Wärmeerzeugung schwere Bauweise,  
Horizontal- und Vertikalschnitt

|                 |          |                               |          |                                           |
|-----------------|----------|-------------------------------|----------|-------------------------------------------|
| <b>Legende:</b> | <b>1</b> | <b>Heizeinsatz, Brennraum</b> | <b>5</b> | <b>Anheiz-Direktzug</b>                   |
|                 | <b>2</b> | <b>Heizeinsatz, Kehrzüge</b>  | <b>6</b> | <b>Konvektionsspalt</b>                   |
|                 | <b>3</b> | <b>Stahl-Nachheizfläche</b>   | <b>7</b> | <b>Sek. Speicher, Bereich Heizeins.</b>   |
|                 | <b>4</b> | <b>keram. Nachheizfläche</b>  | <b>8</b> | <b>Sek. Speicher, Bereich Nachheizfl.</b> |

#### 4.1.2 Versuchsablauf, Messmethode

Die Anlage wurde über einen Zeitraum von 45 Stunden, in deren Verlauf dreimal eingefeuert wurde, ausgemessen. Die Beschickung erfolgte durch die Bewohner mit jeweils 18 kg Hartholz

mit zusätzlichem Nachlegen von 8 kg nach ca. 1 Stunde. Die Frischluftzufuhr wurde nach Beendigung des Abbrandes manuell geschlossen. Die Aussentemperaturen betrugen ca. 0 °C. Die Messdaten wurden über ein System-Multimeter mit eingebautem Scanner und serieller Übertragung auf einen Notebook-Computer fortlaufend erfasst. Die Anordnung der Messfühler ist aus Bild 4.1-2 ersichtlich. Die Heizungsluft-Temperaturen stellen einen angenäherten Mittelwert über die verschiedenen Wärmetauscher-Elemente dar. Von den insgesamt 9 Rohranschlüssen wurde ein möglichst zentral gelegener ausgewählt. Die Vorlauf- und Rücklaftemperaturen wurden am gleichen Heizstrang gemessen. Die gute Zugänglichkeit der Anlage erlaubte auch die Plazierung von Temperaturfühlern im Feststoff- und im Sekundärspeicher. Die Ermittlung des Heizungsluft-Volumenstromes und damit der Leistung war aus baulichen Gründen nicht möglich. Für eine Abschätzung der für die Luftumwälzung relevanten Zeitdauer wurde in dem für die Temperaturmessung herangezogenen Rücklaufrohr auch die Luftgeschwindigkeit gemessen.

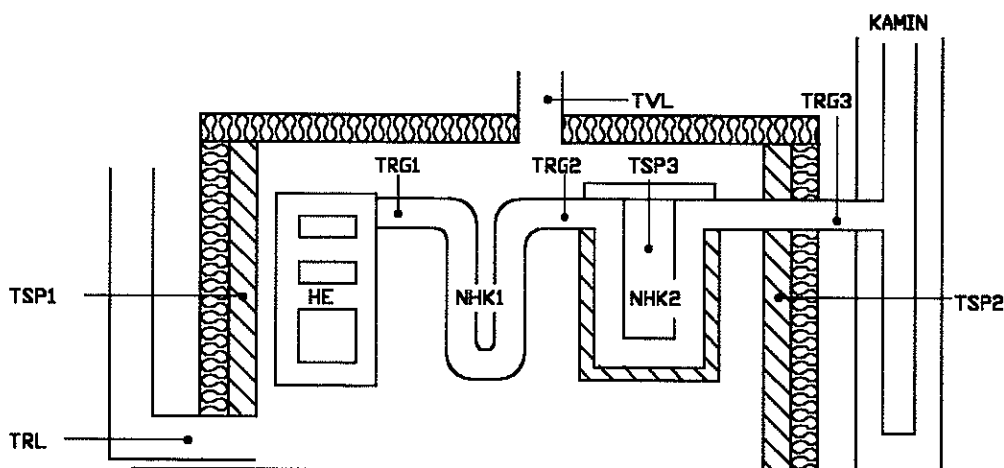


**Bild 4.1-2:**  
**Wärmeerzeugung schwere Bauweise**  
**Schematische Darstellung, Messpunkte**

|                 |             |                                    |             |                                                                |
|-----------------|-------------|------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Legende:</b> | <b>HE</b>   | <b>Heizeinsatz</b>                 | <b>TSP1</b> | <b>Massentemp. Sekundärspeicher im Bereich Heizeinsatz</b>     |
|                 | <b>NHK1</b> | <b>Stahl-Nachheizfläche</b>        | <b>TSP2</b> | <b>Massentemp. Sekundärspeicher im Bereich Nachheizflächen</b> |
|                 | <b>NHK2</b> | <b>keramische Nachheizfläche</b>   | <b>TSP3</b> | <b>Massentemp. im keramischen Sturz-Steigzug</b>               |
|                 | <b>TVL</b>  | <b>Temp. Heizungsluft Vorlauf</b>  |             |                                                                |
|                 | <b>TRL</b>  | <b>Temp. Heizungsluft Rücklauf</b> |             |                                                                |
|                 | <b>TRG</b>  | <b>Temp. Rauchgas</b>              |             |                                                                |

### 4.1.3 Auswertung

Für die Auswertung und Darstellung der Messresultate wurde eine typische Periode ausgewählt.

#### Diagramm 4.1-1, Heizungsluft-Temperaturen

Bei der Interpretation der Temperaturkurven ist zu beachten, dass ein nennenswerter Wärmetransport zur Strahlungsfläche nur in den ersten 7 Stunden nach dem Einfeuern erfolgte, da anschliessend kein wesentlicher Heizungsluft-Massenstrom mehr messbar war. Die danach gemessenen Temperaturen dürften zum grössten Teil aus der konvektiven Erwärmung durch die Umgebung stammen.

Ein wesentliches Merkmal dieser Anlage stellen die trotz Schwerkraftbetrieb (kleiner Heizungsluft-Massenstrom) relativ niedrigen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen und die kleine Temperaturspreizung dar. Dies ist auf die träge Reaktion und das niedrige Temperaturniveau der indirekt erwärmten, bzw. am Ende des Rauchgaszuges angeordneten Speichermassen (siehe Diagramm 4.1-3) zurückzuführen. Erschwerend kam hier noch die schlechte Isolation der Heizungsluft-Leitungen im Kellergeschoss hinzu.

#### Diagramm 4.1-2, Rauchgastemperaturen

Der Abbrand dauert mit zweitem Nachlegen ca. 2 Stunden. Das Schliessen der Verbrennungsluft-Zufuhr ist deutlich zu erkennen und erfolgte zeitgerecht. Die Kamin-Eintrittstemperaturen (TRG3) liegen in den Spitzen über 250 °C. Die Rauchgastemperatur am Eingang in den Feststoffspeicher beträgt während des Abbrandes i.M. ca. 300 °C. Deutlich erkennbar ist der gegenüber der Stahl-Nachheizfläche geringere Temperaturabbau im Feststoff-Speicher.

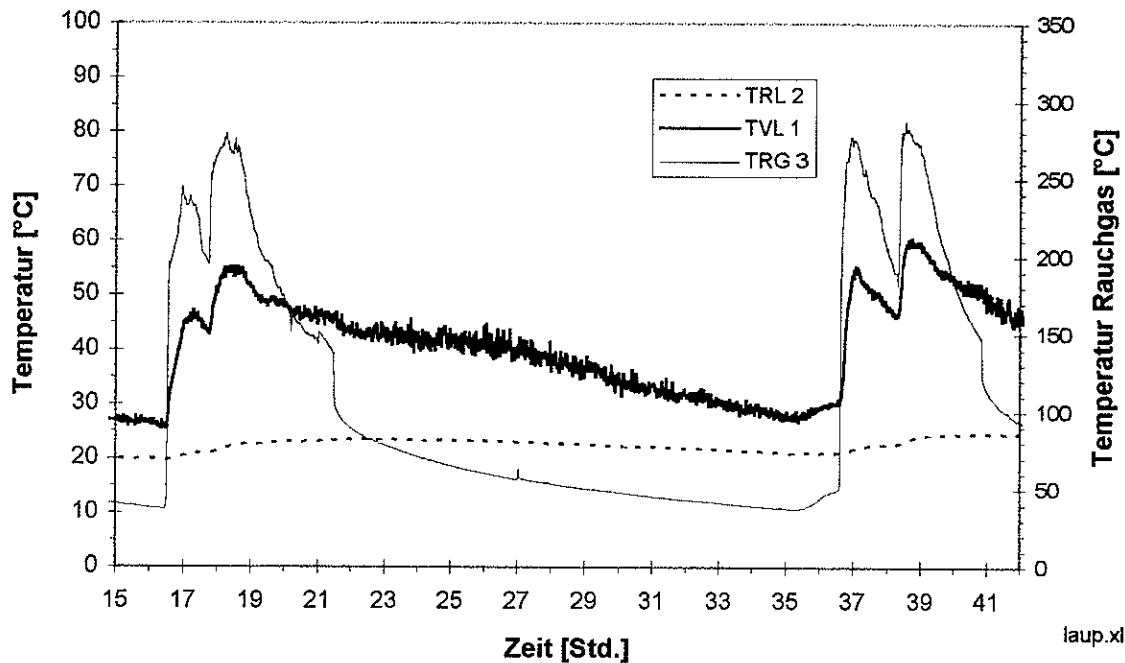


**Diagramm 4.1-1: Hypokausten-Praxisanlage schwere Bauweise  
Heizungsluft-Temperaturen**

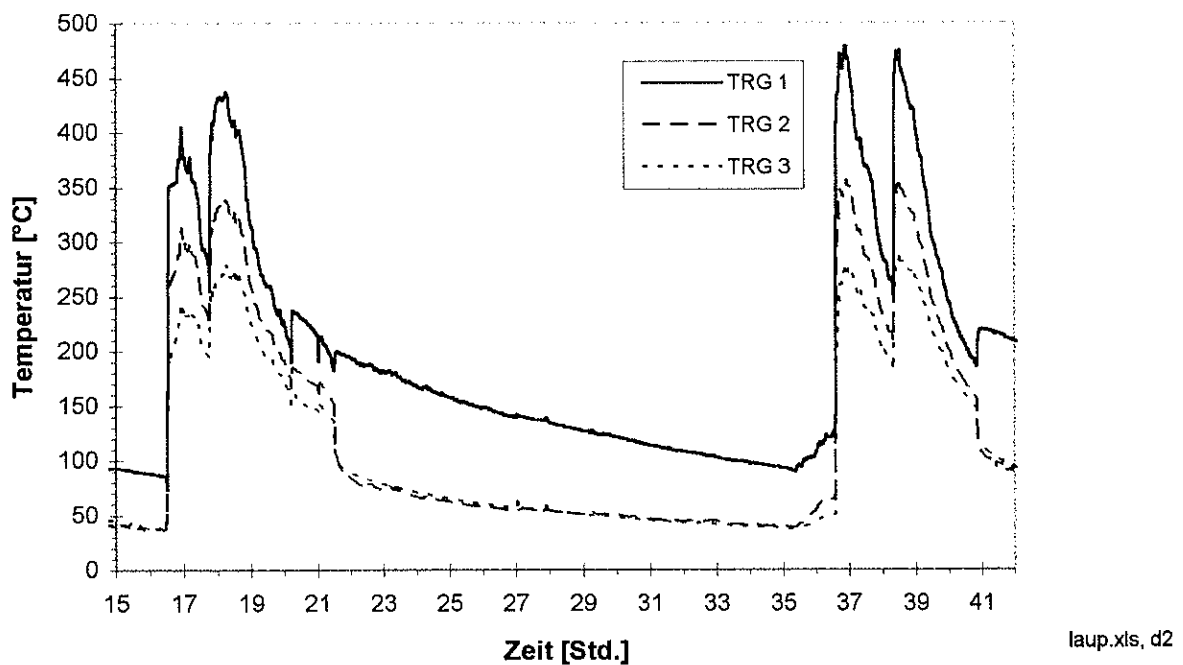


**Diagramm 4.1-2: Hypokausten-Praxisanlage schwere Bauweise  
Rauchgastemperaturen**

#### Diagramm 4.1-3, Speichertemperaturen

Die Speichertemperaturen TSP1 und TSP2 weisen ein sehr niedriges Temperaturniveau von max. 80 °C auf. TSP1 im Bereich des Heizeinsatzes wird über Wärmeleitung durch die den Konvektionsspalt bildenden Schamotte-Hohlelemente erwärmt. Diese Speichertemperatur weist einen stark verzögerten Verlauf auf. TSP2 gegenüber den Nachschaltheizflächen wird durch deren Wärmestrahlung erwärmt und reagiert demzufolge schneller.

Der Feststoffspeicher in Form eines keramischen Sturz-Steigzuges erreicht max. ca. 140 °C mit einer Temperaturspreizung von ca. 100 °C. Die Temperaturkurve verläuft leicht verzögert etwa parallel der Rauchgastemperatur.

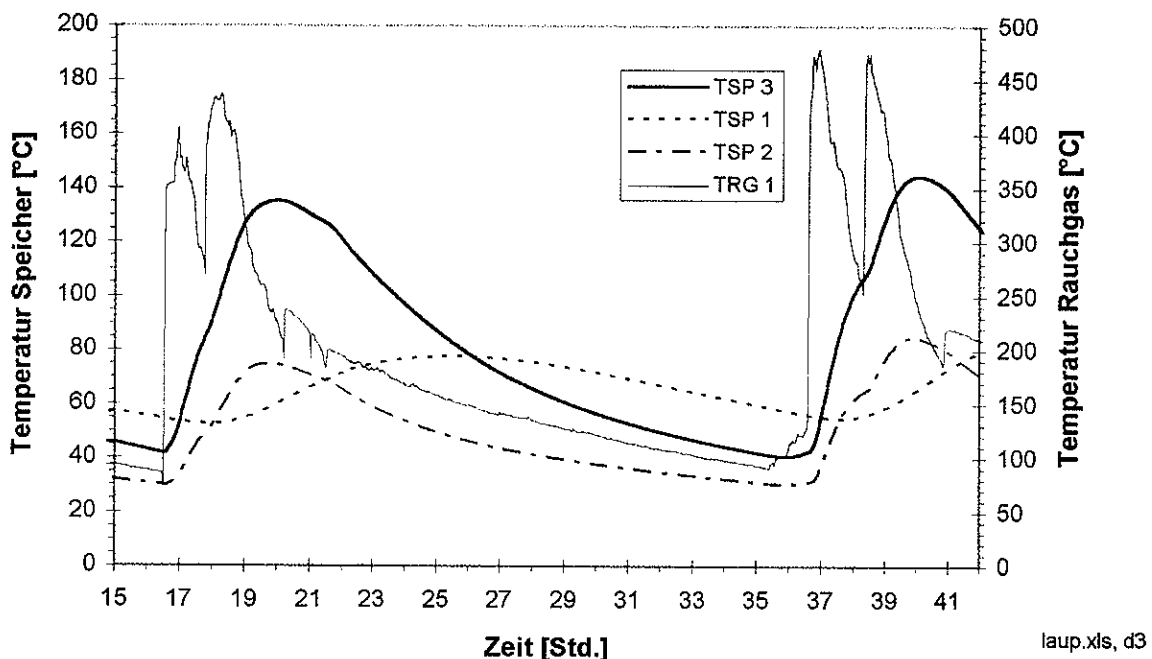


**Diagramm 4.1-3: Hypokausten-Praxisanlage schwere Bauweise  
Speichertemperaturen**

## **4.2 Anlagetyp 2, leichte Bauweise**

### **4.2.1 Anlagebeschrieb**

Hypokausten-Anlage zur Beheizung eines umgebauten älteren Einfamilienhauses, Wärmeerzeugung zentral im Kellergeschoss angeordnet, Heizungsluft-Umwälzung mit Schwerkraft. Der Wärmebedarf des Hauses nach SIA beträgt ca. 12 kW. Total 11 beheizte Zimmer im EG, OG und DG. Wärmeverteilung mit Spiralfalzrohren und Strahlungsflächen aus Schamotte-Hohlelementen.

Die Wärmeerzeugung besteht aus einem typisierten, individuell gefertigten Heizeinsatz. Stahlmantel mit einem Speicherkern aus Schamotte (Sturzbrand) und einer Nachheizfläche aus Rauchrohren in Form eines Sturz-Steig- und untenliegenden Kehrzuges. Die bauliche Ausführung der Wärmeerzeugung ist im Bild 4.2-1 dargestellt.

Das Rauchgas wird nach der unter dem Düsenstein (Sekundärluft-Beimischung) liegenden Ausbrandzone über den Hohlraum zwischen der Brennraum-Ummauerung und dem Stahlmantel zum Rauchgas-Stutzen geführt. Vor dem Eintritt in den Kamin passiert das Rauchgas den von der kühleren Rückluft umspülten Kehrzug. Dies führt zu ausserordentlich hohen Heizungsluft-Temperaturen bei gleichzeitig niedrigen Rauchgastemperaturen.

Ausserhalb des Konvektionsspalt es befindet sich die sehr gut isolierte Ofenhülle mit Blechverkleidung. Das Gewicht der Wärmeerzeugung beträgt ca. 450 kg.

### **4.2.2 Versuchsablauf, Messmethode**

Die Anlage wurde über einen Zeitraum von ca. 47 Stunden mit Füllintervallen von ca. 12 Stunden ausgemessen. Die Beschickung erfolgte durch die Bewohner mit jeweils ca. 40 kg Hartholz. Die Frischluftzufuhr wurde im Verlauf des Abbrandes manuell stark reduziert. Die Aussentemperaturen betrugen ca. - 4 °C.

Die Messdaten wurden über ein System-Multimeter mit eingebautem Scanner und serieller Übertragung auf einen Notebook-Computer fortlaufend erfasst. Die Anordnung der Messfühler ist aus Bild 4.2-1 ersichtlich. Die Heizungsluft-Temperaturen stellen einen angenäherten Mittelwert dar, da für die Messungen ein möglichst zentral gelegener Rohranschluss ausgewählt wurde. Die Vorlauf- und Rücklaftemperaturen wurden am gleichen Heizstrang gemessen. Die Ermittlung des Heizungsluft-Volumenstromes und damit der Leistung war aus baulichen Gründen nicht möglich. Für eine Abschätzung der für die Luftumwälzung relevanten Zeitdauer wurde in dem für die Temperaturmessung herangezogenen Rücklaufrohr auch die Luftgeschwindigkeit gemessen.

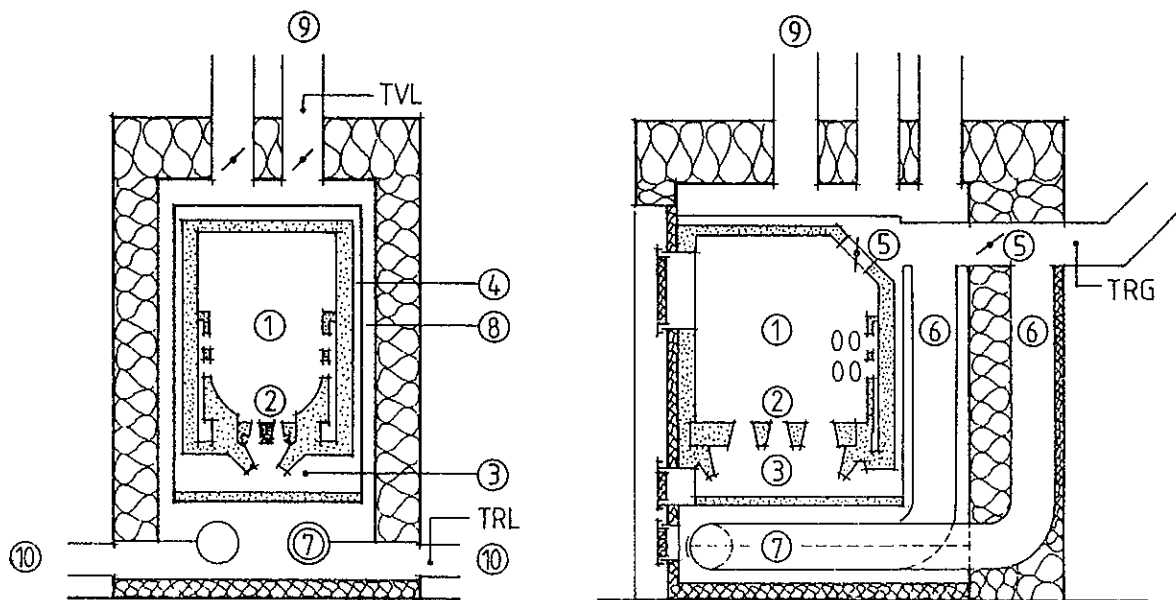


**Bild 4.2-1:**  
**Wärmeerzeugung leichte Bauweise, Quer- und Längsschnitt,**  
**Anordnung Messpunkte**

|                 |            |                                     |            |                                  |
|-----------------|------------|-------------------------------------|------------|----------------------------------|
| <b>Legende:</b> | <b>1</b>   | <b>Brennraum</b>                    | <b>6</b>   | <b>Sturz-Steigzug</b>            |
|                 | <b>2</b>   | <b>Düsenstein</b>                   | <b>7</b>   | <b>Kehrzug</b>                   |
|                 | <b>3</b>   | <b>Ausbrandzone,<br/>Aschenraum</b> | <b>8</b>   | <b>Konvektionsspalt</b>          |
|                 | <b>4</b>   | <b>Rauchgasführung seitl.</b>       | <b>9</b>   | <b>Heizungsluft-Vorlauf</b>      |
|                 | <b>5</b>   | <b>Anheizklappen</b>                | <b>10</b>  | <b>Heizungsluft-Rücklauf</b>     |
|                 | <b>TVL</b> | <b>Temp. Heizungsluft Vorl.</b>     | <b>TRL</b> | <b>Temp. Heizungsluft Rückl.</b> |
|                 | <b>TRG</b> | <b>Temp. Tauchgas</b>               |            |                                  |

### 4.2.3 Auswertung

Für die Auswertung und Darstellung der Messresultate wurde eine typische Periode ausgewählt.

#### Diagramm 4.1-1, Heizungsluft- und Rauchgas-Temperaturen

Bei der Interpretation der Temperaturkurven ist zu beachten, dass ein nennenswerter Wärmetransport zur Strahlungsfläche nur in den ersten 8 Stunden nach dem Einfeuern erfolgte, da anschliessend kein wesentlicher Heizungsluft-Massenstrom mehr messbar war. Die danach gemessenen Temperaturen dürften zum grössten Teil aus der konvektiven Erwärmung durch die Umgebung stammen.

Ein wesentliches Merkmal dieser Anlage stellen die relativ hohen Vorlauftemperaturen von bis zu 180 °C und die grosse Temperaturspreizung von bis zu 100 °C dar. Dies ist auf das hohe Temperaturniveau der direkt durch das Rauchgas erwärmten, massearmen Wärmetauscherflächen und den infolge Schwerkraftbetrieb relativ kleinen Heizungsluft-Massenstrom zurückzuführen.

Es handelt sich um einen Sturzbrand mit manueller Steuerung der Verbrennungsluftzufuhr und einer langen Brenndauer von ca. 6 Stunden. Die Kamin-Eintrittstemperaturen (TRG) liegen während des Abbrandes im Mittel um 170 °C mit Spitzen von 220 °C.

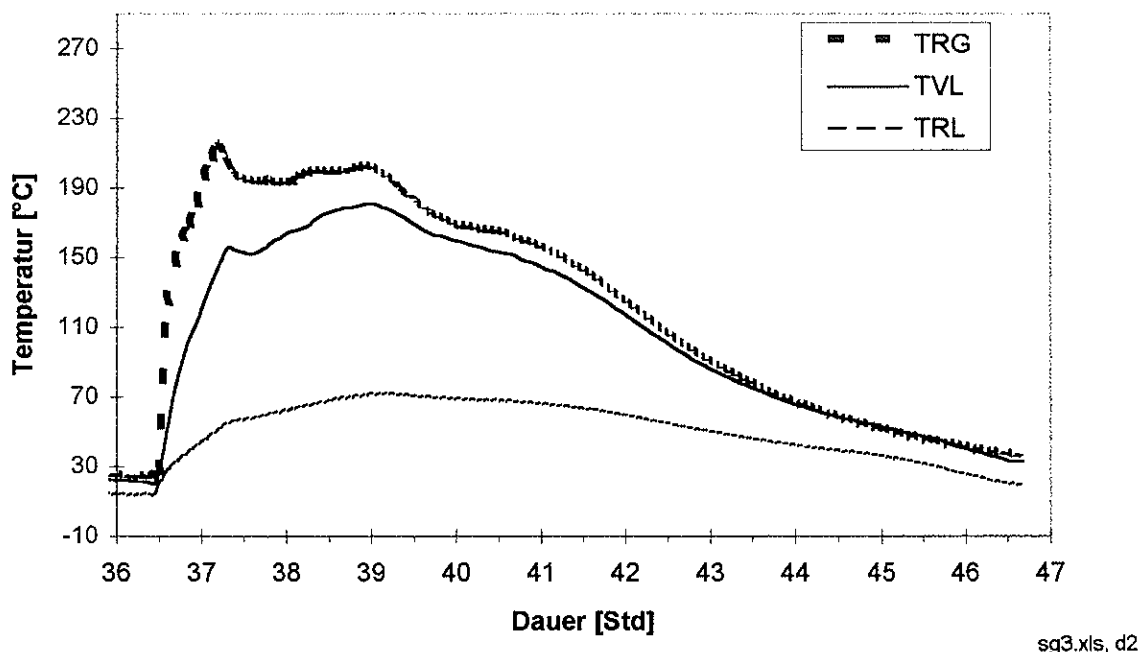


**Diagramm 4.2-1: Hypokausten-Praxisanlage leichte Bauweise  
Heizungsluft-Temperaturen**

### 4.3 Diskussion der Ergebnisse, Schlussfolgerungen

Die beiden untersuchten Anlagentypen weisen sehr unterschiedliche, annähernd diametral entgegengesetzte Eigenschaften auf.

Der Anlagentyp 1, schwere Bauweise, erfordert regelmässige Füllintervalle, um die Anlage auf einer, den Bedürfnissen entsprechenden Betriebstemperatur zu halten. Die niedrigen Heizungsluft-Temperaturen resultieren neben den Einflüssen aus dem Speicherverhalten auch aus den ungünstigen Bedingungen für die Wärmeübertragung im Ofenraum. In den relativ gross dimensionierten Räumen für die Luftführung kann sich die Heizungsluft auf dem Weg des geringsten Widerstandes bewegen. Zudem weist der Konvektionsspalt um den Heizeinsatz (wärmster Bauteil), aus Schamotte-Hohlelementen erstellt, die höchsten Strömungswiderstände auf.

Bei diesem Anlagentyp werden relativ gross dimensionierte Strahlungsflächen mit entsprechend geringer spezifischer Wärmeleistung eingesetzt. Einen Vorteil dieser Bauweise bildet die daraus resultierende besonders milde Strahlungswärme. Mit den Erkenntnissen aus diesem Projekt lässt sich mit geringen baulichen Anpassungen eine optimierte Variante verwirklichen, da der Heizeinsatz grundsätzlich über ähnliche Eigenschaften wie der unter 2.4 beschriebene und im Labor untersuchte aufweist.

Der Anlagentyp 2, leichte Bauweise, ist ganz auf eine effiziente Heizungslufterzeugung für Hypokausten-Anlagen hin konstruiert worden. Er stellt die Spezialanfertigung eines im Handel erhältlichen Guss-Heizeinsatzes mit wesentlich vergrössertem Füllraum dar. Durch den stark verzögerten Abbrand genügt die im Heizeinsatz und in den Strahlungsflächen enthaltene Speichermasse, um ein Füllintervall von 12 Stunden auch bei relativ grossen Leistungen einhalten zu können. Andererseits eignet sich die Anlage auch für eine schnell wirksame, sporadische Heizung während der Übergangsperioden.

Leider erfordert die Problematik des unregelmässigen Sturzbrandes eine besonders sorgfältige Bedienung. Mit den neuen, im Rahmen des Projektes geprüften Aggregaten (z.B. das unter 2.3 beschriebene) ist nun ein guter Ersatz für den oberen Leistungsbereich gefunden worden.

Die beschriebenen Praxisanlagen bestätigen die aus den Laboruntersuchungen gewonnenen Bedingungen für energieeffiziente Hypokausten-Wärmeerzeugungsanlagen.

---

## **5. VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG IM LABOR**

---

### **5.1 Vorversuche**

Neben den im vorliegenden Bericht enthaltenen Untersuchungen wurde noch eine Vielzahl von weiteren Versuchen durchgeführt. Diese betrafen Vorversuche bis zur befriedigenden Funktion des Prüfstandes und auch Versuche mit anderen Wärmeerzeugern und Komponenten.

Der ursprünglich erstellte Prüfstand in Modulbauweise, der für die verschiedenen Prüfobjekte anpassbar war, erwies sich als problematisch bezüglich der Luftdichtigkeit und der thermischen Quereinflüsse. Es zeigte sich, dass für verlässliche Messungen die einzelnen Geräte mit individuell angepassten Umhüllungen und Abdichtungen versehen werden mussten.

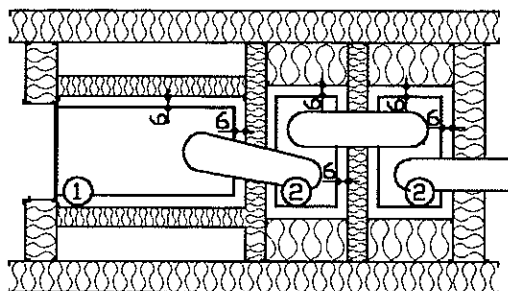
Für die Auswertung wurden nur Geräte berücksichtigt, die den Auswahlkriterien gemäss 2.1 entsprachen. Andere Prüflinge erfüllten diese entweder vom Füllkomfort, von der Leistung oder von den Rauchgaswerten her nicht.

### **5.2 Warmluft-Heizeinsatz**

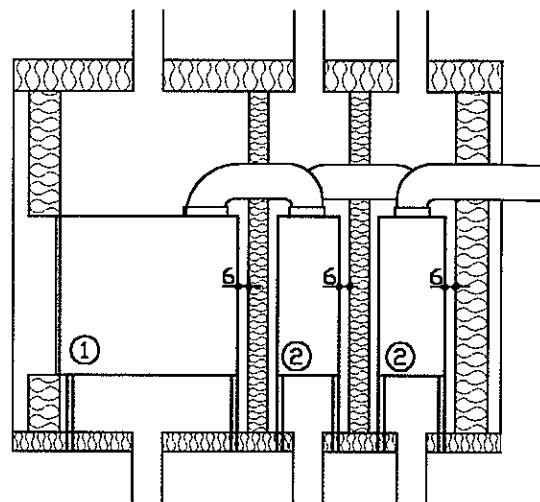
Mit dem Warmlufteinsatz wurden die meisten Versuche gefahren: ein Teil der Vorversuche, die verschiedenen Kombinationen, verschiedene Nachlegeintervalle, verschiedene Luftvolumenströme. Total ungefähr 43 Versuche à mindestens 4 - 6 Abbrände. Nachfolgende Versuchsaufbauten wurden im WEZ1 ausgemessen:

#### **5.2.1 Heizeinsatz mit Nachheizregistern**

Dieser Versuchsaufbau entspricht einer gängigen Kombination von Heizeinsatz und Nachheizregistern im Bau von Warmluft-Kachelöfen.



Grundriss



Längsschnitt

**Bild 5.2-1:**  
**Warmluft-Heizeinsatz mit 2 Guss-Nachheizregistern**  
**Legende:** 1) Heizeinsatz  
 2) Nachheizregister

### 5.2.2 Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher

In dieser Anordnung wurde das Verhalten der Anlage bei unterschiedlichen Volumenströmen gemessen. Die Anlage wurde bei einer Ventilator Drehzahl von 40, 60 und 80 Hz jeweils nachdem sie auf Betriebszustand war, 6mal, im Nachlegeintervall 6/6/12 h, befeuert. Es wurden die Mittelwerte über 6 und 12 Stunden gebildet.

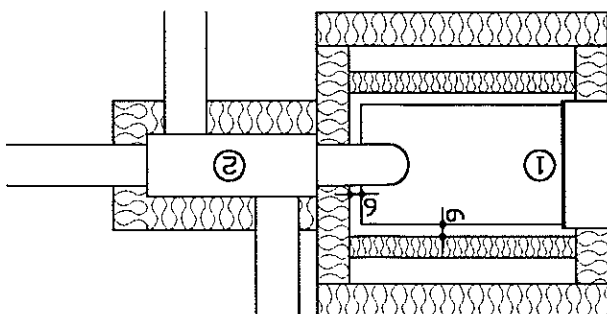
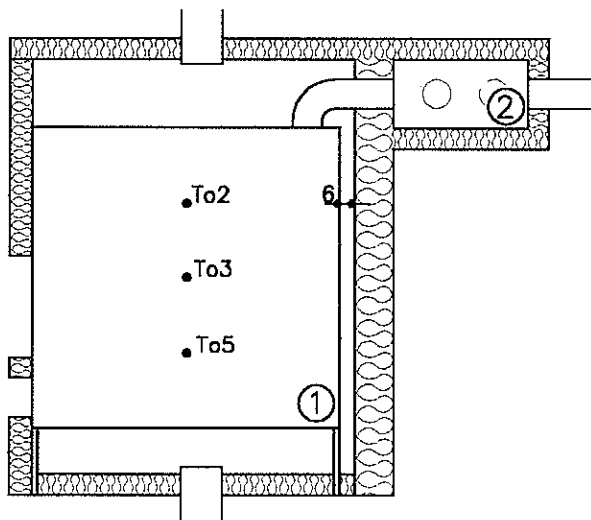


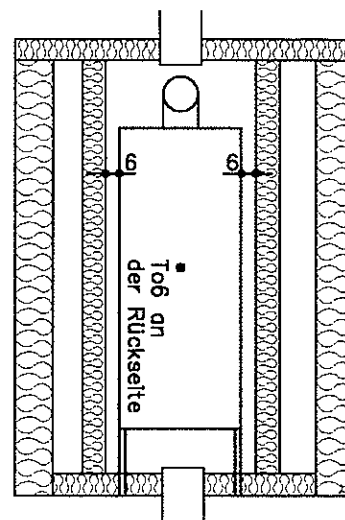
**Bild 5.2-2:**  
**Warmluft-Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher**  
**Legende:** 1) Heizeinsatz  
 2) massearmer Wärmetauscher

### 5.3 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer

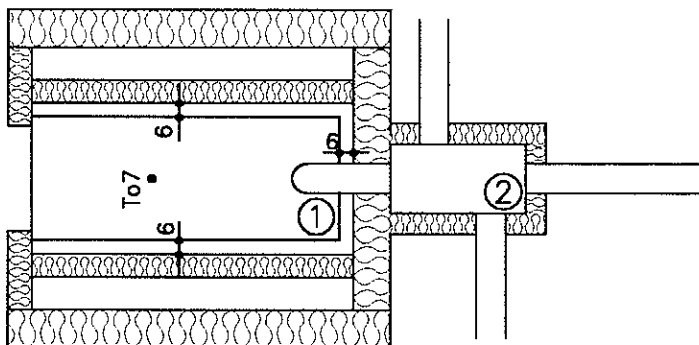
Mit diesem Heizeinsatz wurden zwei Versuchsreihen mit insgesamt 10 Abbränden gefahren. Brennholzfüllung jeweils 35 kg. Füllintervalle 12 Std., je ein Mal 24 Stunden. Für die Auswertung wurden 5 repräsentative Abbrände herangezogen.



Längsschnitt



Querschnitt



Grundriss

**Bild 5.3-1:**

**Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer**

**Legende:**

1) Heizeinsatz

2) massearmer Wärmetauscher

#### 5.4 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise

Die Versuche im Parallel- und Serienbetrieb wurden über jeweils 72 Stunden mit einem Füllintervall 12 Stunden und einer Füllmenge von 20 kg Spänebriketts, das entspricht etwa 22 kg Hartholz, gefahren. Für die Auswertung wurden 4 repräsentative Abbrände herangezogen.

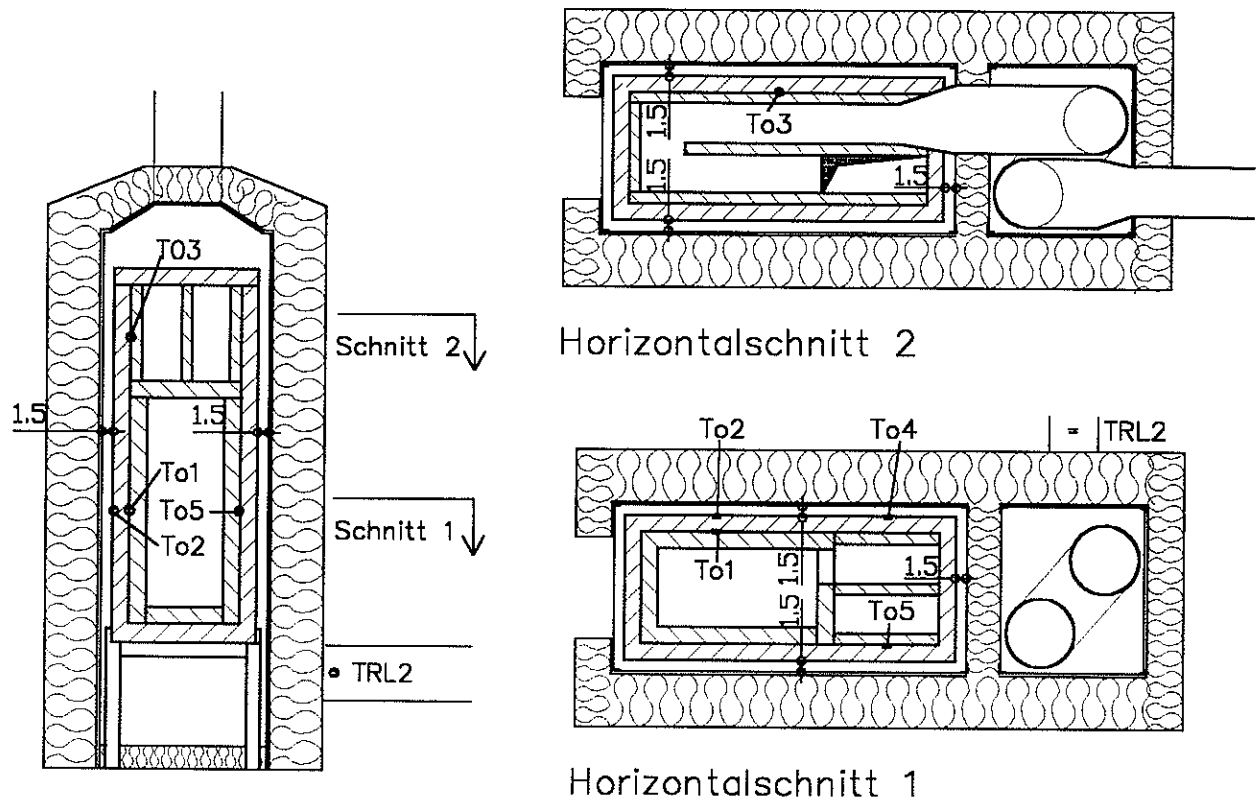


**Bild 5.4-1:**  
Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise  
Querschnitt, Horizontalschnitte

#### 5.4.1 Paralleler Betrieb

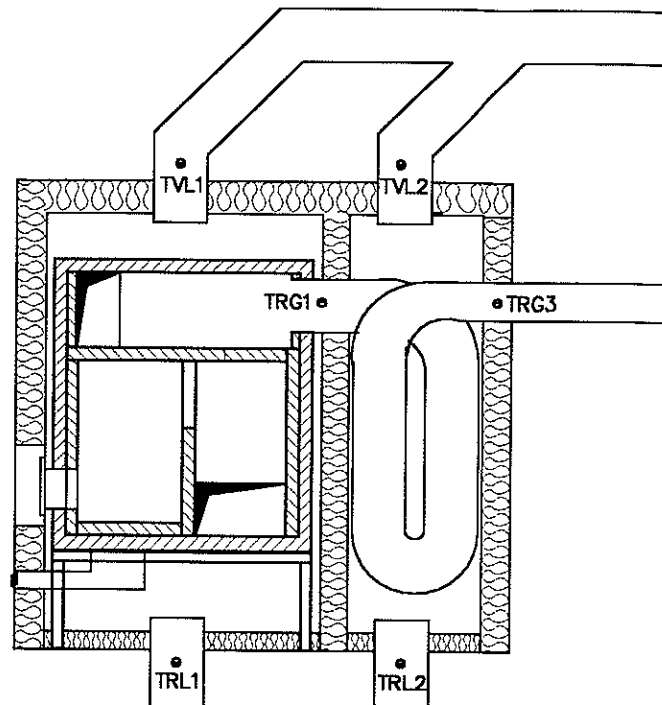


**Bild 5.4-2:**  
**Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise**  
**Längsschnitt Paralleler Betrieb**

#### 5.4.2 Serieller Betrieb

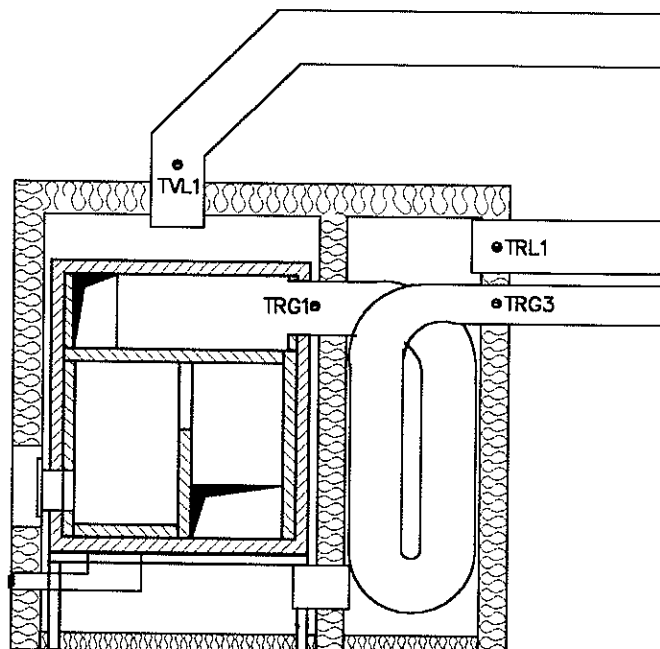


**Bild 5.4-3:**  
**Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise**  
**Längsschnitt Serieller Betrieb**

## **5.5 Versuchssystematik**

### **5.5.1 Versuchsablauf**

Die Wärmeerzeuger wurden mit den von den Herstellern vorgegebenen Holzmengen bestückt. Die Versuche liefen immer nach dem gleichen Prinzip ab. Die erste Charge wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt. Sie diente dazu, die Anlage aufzuheizen und auf Betriebstemperatur zu bringen. Um den Einfluß der Aussentemperatur auf den Unterdruck im Kamin auf ein Minimum zu reduzieren, wurden die Versuche mit einem Kaminventilator durchgeführt. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wurden die Versuche jeweils über mehrere Tage durchgeführt. Detailliert ausgewertet wurden dann in der Regel nur zwei bis drei, ausgewählte, charakteristische für das Wärmeabgabeverhalten typische Chargen pro Versuch.

### **5.5.2 Abbrandzyklen**

Gemäss der Zielsetzung wurden die Warmluft-Leistungen der Wärmeerzeuger unter praxisgerechten Bedingungen ermittelt. Für Hypokausten-Heizungen als Alleinheizung wurden die Beschickungsintervalle je nach Füllmenge und im Sinne eines zeitgemässen Bedienungskomforts auf normalerweise 2, höchstens jedoch 3 Füllungen pro Tag festgelegt.

### **5.5.3 Brennstoff**

Versuche, die mit dem Brennstoff Holz durchgeführt werden, sind einer gewissen Zufälligkeit unterworfen und müssen darum entsprechend oft wiederholt werden, um repräsentative, nachvollziehbare Resultate zu erhalten.

Anfänglich wurde Buchenholz, 2 Jahre gelagert, in 50 cm langen Spaltenabschitten verwendet. Obschon auf eine möglichst gleiche Holzqualität geachtet wurde, beeinflusste die Qualität und Feuchte des Holzes die Messungen. Um diese Einflüsse zu eliminieren, wurde ein Teil der Versuche mit Holzbriketts gefahren, die einheitliche Werte bezügl. Feuchtigkeit und Brennwert aufwiesen.

| Typen Wärmeerzeugung                                                                      | Hartholz-Füllgewicht      | Füllintervalle in 24 Std.                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Warmluft-Heizeinsatz (Guss) mit zwei Guss-Nachheizflächen</b>                          | <b>15 kg</b>              | <b>2 x 6 Stunden (Tagesbetrieb) und 1 x 12 Stunden (Nachtbetrieb)</b> |
| <b>Gemauerter Heizeinsatz mit langer Brenndauer</b>                                       | <b>35 kg</b>              | <b>2 x 12 Stunden</b>                                                 |
| <b>Gemauerter Heizeinsatz mit integrierten keramischen Zügen und Stahl-Nachheizfläche</b> | <b>22 kg<sup>*)</sup></b> | <b>2 x 12 Stunden, Variante mit 3 x 8 Stunden</b>                     |

**Tabelle 5.5-1:  
Übersicht Füllintervalle**

<sup>\*)</sup> Durchgeführt wurden die Versuche mit der bezogen auf den Energieinhalt in etwa  
lenten Menge von 20 kg Spänebrikets

---

## 6. VERSUCHSRESULTATE

---

Bei der Auswertung der Versuche wird immer nach dem gleichen Schema vorgegangen. Nach einer Übersicht über den Gesamtversuch werden die Ergebnisse anhand einer repräsentativen Periode diskutiert. Der Auswertungsbereich lässt sich über die x-Achse (Dauer in Stunden des Gesamtversuches) identifizieren. Zur besseren Lesbarkeit wurde die Anzahl der Messwertverläufe auf die für Auswahl und Dimensionierung der Wärmeerzeuger relevanten Werte beschränkt. Ziel der Untersuchungen war es, Grundlagen für die Planung und Ausführung zu erarbeiten. Darstellungen und Interpretationen von Querbeziehungen und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Messwerten mussten daher nicht zuletzt wegen der Anzahl der Versuche in den Hintergrund treten.

Hinweis: Bei der Interpretation der absoluten Werte von Temperaturen und Leistungen ist immer die gegenseitige Wechselwirkung mit den im Versuch herrschenden Randbedingungen zu beachten. Beispiel: Die Heizungsluft-Vorlauftemperaturen sind direkt abhängig von Volumenstrom und Rücklauftemperatur.

Zur Erleichterung der Interpretation wird den Abschnitten über die einzelnen Versuchsreihen die Schemaskizze der Versuchs- und Messanordnung aus Kapitel 3 nochmals vorangestellt.

## 6.1 Warmluft-Heizeinsatz

### 6.1.1 Heizeinsatz mit Nachheizregistern und paralleler Luftführung

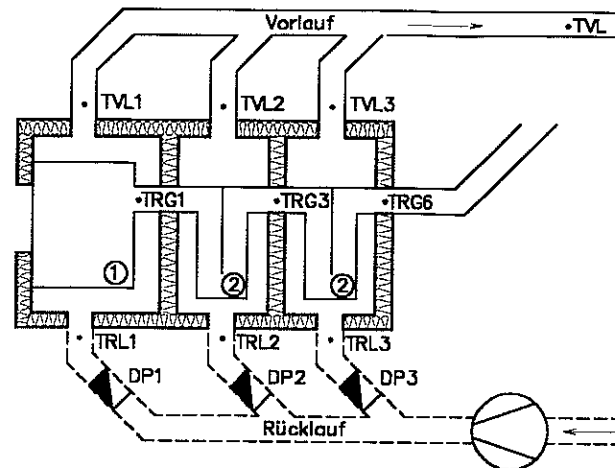


**Bild 6.1-1 Versuchs- und Messanordnung**

Heizeinsatz mit Nachheizregistern und paralleler Luftführung

Legende:

- 1) Warmluft-Heizeinsatz
- 2) Nachheizregister

(Versuchsaufbau siehe Bild 5.2-1)

| Kennwerte Versuch 6.1.1     | Einh.               | Heiz-einsatz | Nachheiz-fläche 1 | Nachheiz-fläche 2 | Total |
|-----------------------------|---------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------|
| Gewicht                     | [kg]                | 299          | 95                | 95                | 489   |
| Holz-Füllgewicht (Hartholz) | [kg]                | 15           |                   |                   |       |
| Heizintervall               | [Std.]              | 6 / 6 / 12   |                   |                   |       |
| Heizungsluft-Volumenstrom   | [m <sup>3</sup> /h] | 190          | 165               | 125               | 480   |
| mittl. TRL (über 24 Std.)   | [°C]                | 33           | 33                | 33                | 33    |
| mittl. TVL (über 24 Std.)   | [°C]                | 88           | 67                | 48                | 68    |
| mittl. Q (über 24 Std.)     | [kW]                | 3.2          | 1.8               | 0.5               | 5.5   |

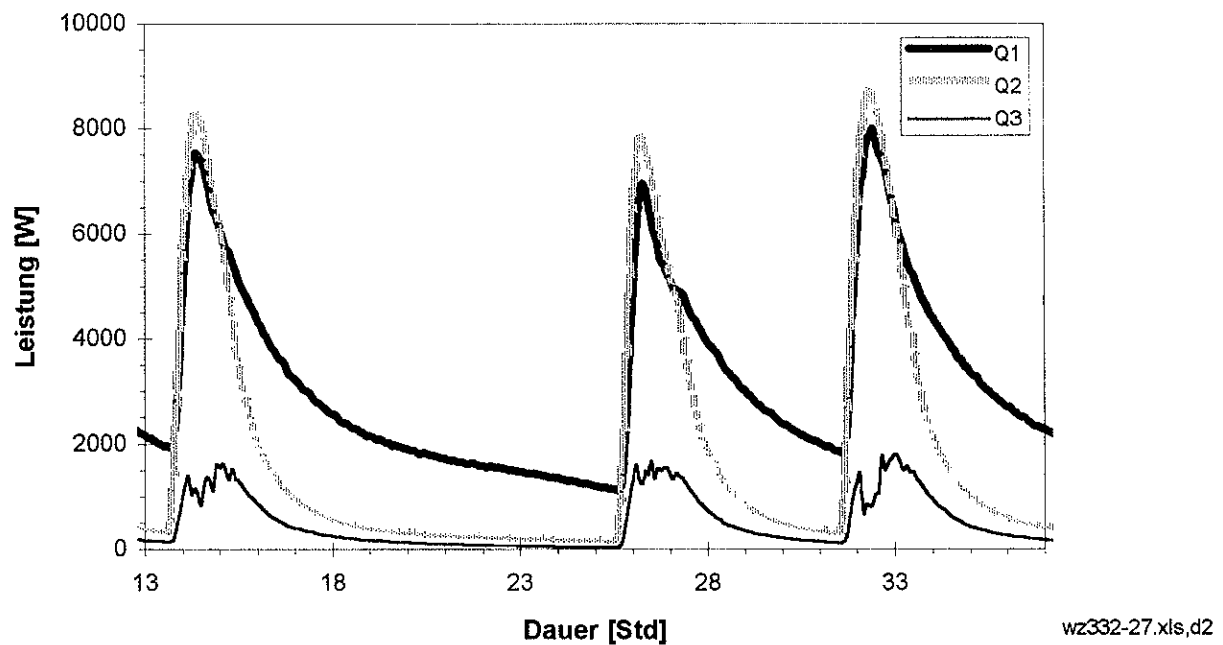
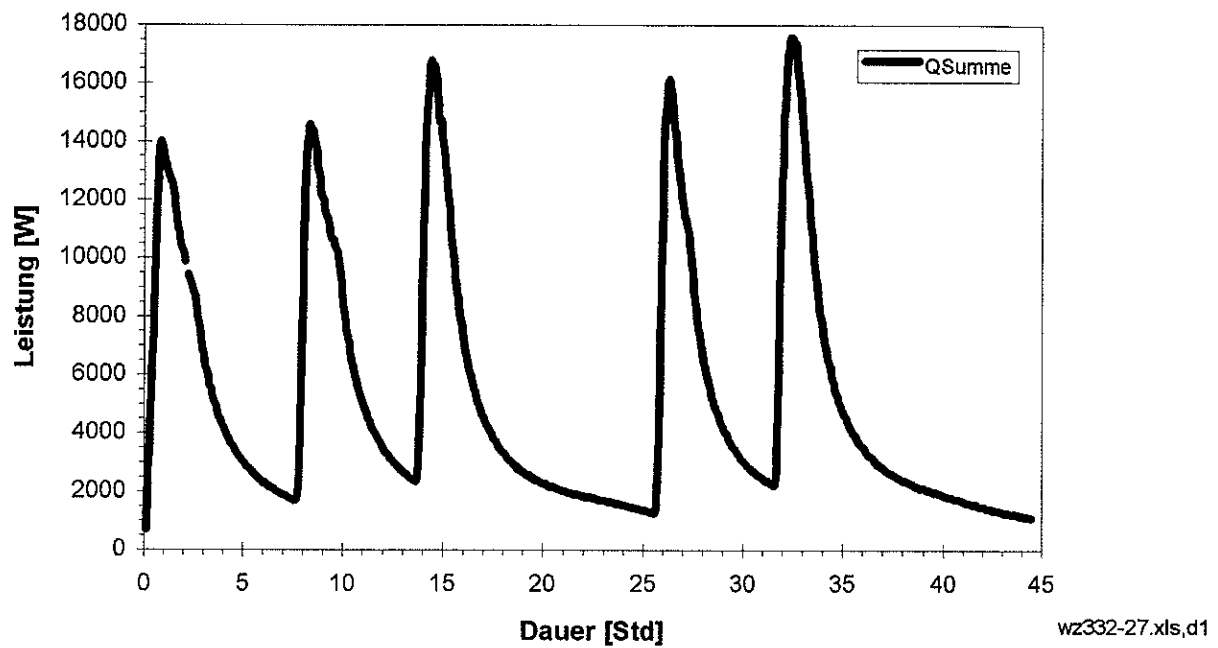
#### Diagramm 6.1-1 Leistung Übersicht Gesamtversuch

Die Übersicht zeigt den charakteristischen Verlauf der Gesamtleistung über die Abbrände mit 6 und 12 Stunden Heizintervall. In der Anheizphase, bzw. nach dem 12 Stunden-Intervall bewegt sich die Leistung auf einem leicht niedrigeren Niveau. Dies gilt auch, wie in der Folge dargestellt, für die Heizungslufttemperaturen. Für die Auswertung, bzw. Interpretation wurde die Periode von 13 bis 37 Stunden herangezogen.

#### Diagramm 6.1-2 Leistung ausgewählte Periode

Die Kurve Q1 (Leistung Warmlufteinsatz) steigt nach dem Nachlegen stark an und erreicht jeweils Werte um 7.5 kW. Die Abkühlkurve verläuft flacher und weist nach 6 Stunden noch eine Leistung von 2.5 kW auf. Das erste Guss-Nachheizregister mit der Leistung Q2 erreicht Leistungswerte analog von Q1. Die Abkühlkurve verläuft jedoch steiler, da das Register eine geringere Masse als der Heizeinsatz aufweist. Das zweite Guss-Nachheizregister wird mit einer niedrigen Rauchgastemperatur bestrichen und weist somit auch eine entsprechend geringe Leistung Q3 auf.

Die Wärmeleistung der gesamten Anlage setzt sich aus der Leistung des Heizeinsatzes (Q1), des ersten Nachheizregisters (Q2) und des zweiten Nachheizregisters (Q3) zusammen. Die Anlage erbringt während der Abbrandzeit von ca. 1,5 h eine Gesamtleistung zwischen 15 und 17 kW, die danach rapid auf ca. 2 - 4 kW absinkt. Diese Anlagencharakteristik ist auf die geringe Masse der Nachheizflächen und des Heizeinsatzes zurückzuführen.



#### Diagramm 6.1-3 Lufttemperaturen ausgewählte Periode

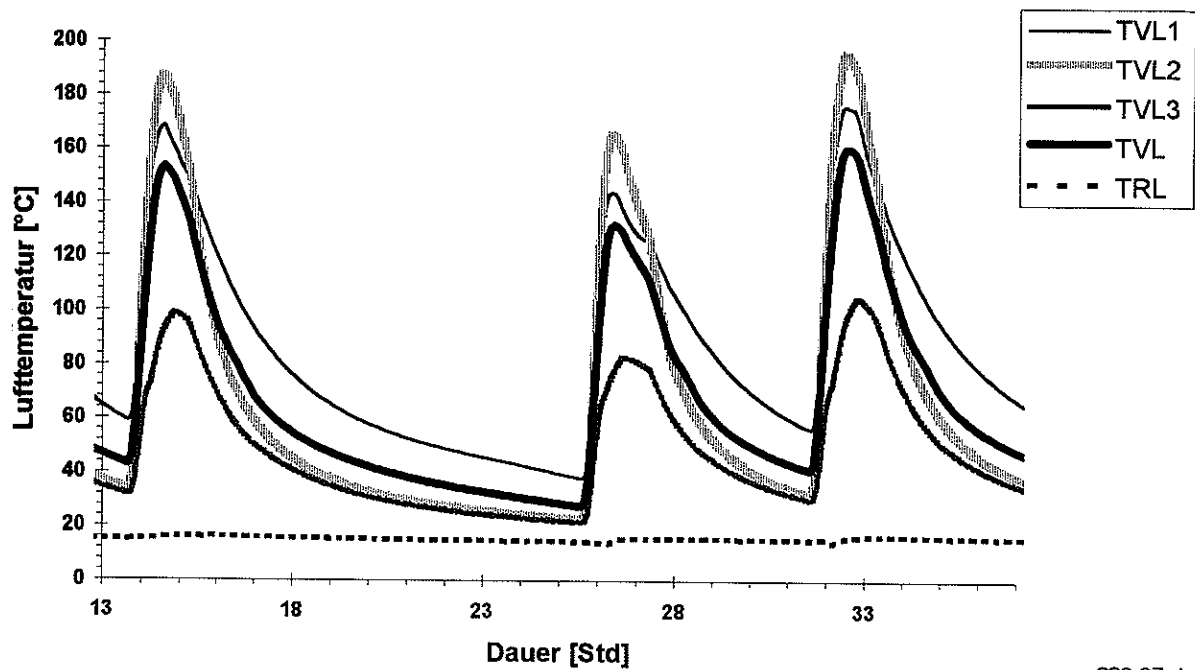
Die Heizungsluft-Temperaturen verlaufen analog zu den Leistungskurven. Die Luftvorlauf-Temperaturen (TVL1 und TVL2) über den Heizeinsatz und die Nachheizfläche weisen den gleichen Verlauf auf: während des Abbrandes hohe Lufttemperaturen bis zu 180 °C, die dann schnell absinken. Beim Heizeinsatz ist eine minimale Speicherwirkung feststellbar.

#### Diagramm 6.1-4 Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode

Der Heizeinsatz war mit einer elektronischen Abbrandsteuerung ausgerüstet. Diese schliesst die Verbrennungsluftzufuhr nach Abschluss des Abbrandes. Der Verlauf der Rauchgastemperaturen nach diesem Zeitpunkt ist deshalb als Auskühlvorgang mit innerer Zirkulation zu interpretieren, da kein Massenstrom mehr vorhanden ist.

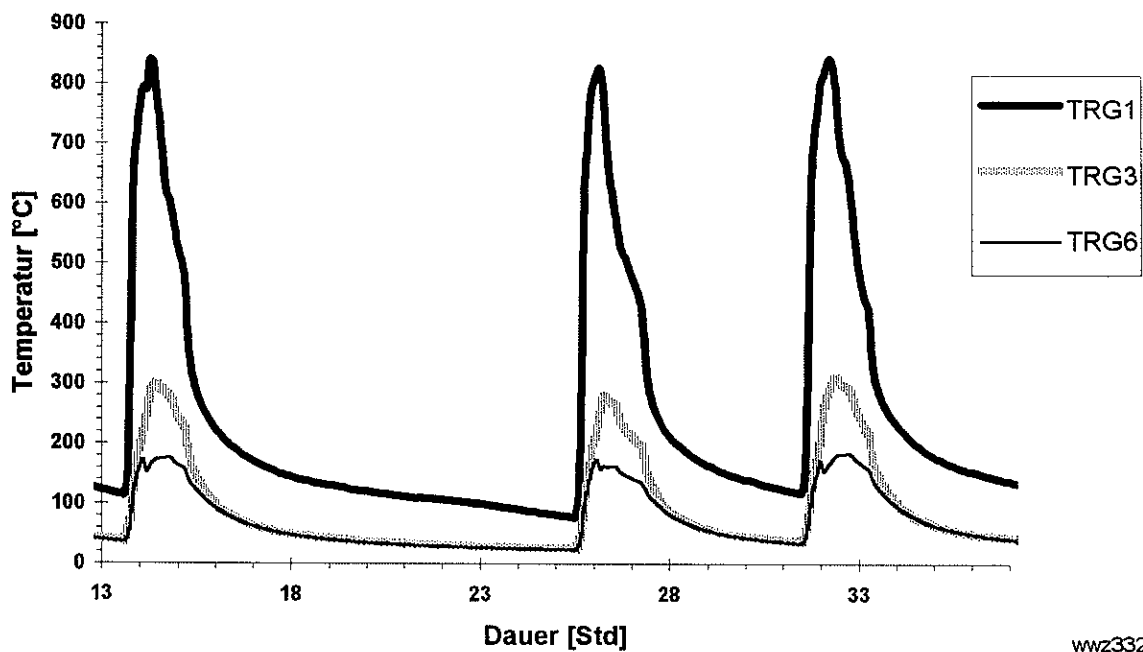
Die Rauchgase werden in den beiden Nachheizflächen auf ein recht tiefes Niveau abgekühlt, was einen guten Anlagewirkungsgrad ergibt. Eine zusätzliche Ausnutzung könnte noch mit einer Anordnung des Rauchrohraustrittes aus der Heizkammer im kühleren Heizungsluft-Rücklaufbereich erreicht werden.

Für einen besseren Leistungsausgleich über das Füllintervall sollte die in den Rauchgasen bis zum Temperaturniveau TRG3 enthaltene Energie in einem Massenspeicher „zwischengelagert“ und später kontinuierlich abgegeben werden.



wz332-27.xls,d3a

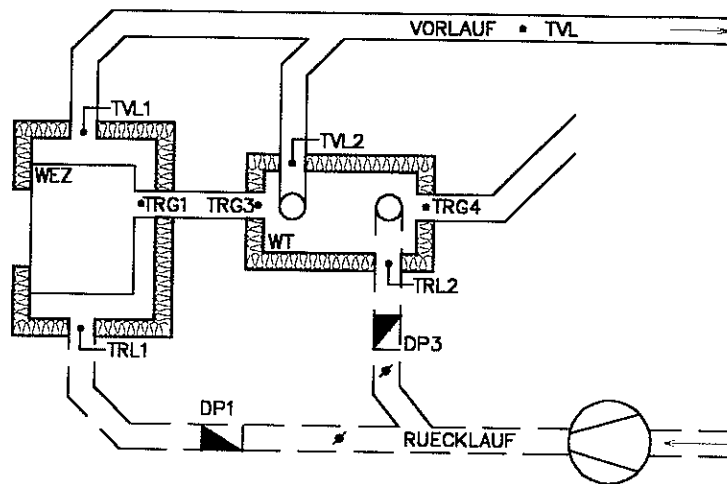
**Diagramm 6.1-3: Warmluft-Heizeinsatz mit Nachheizregistern**  
**Heizungsluftluft-Temperatur ausgewählte Periode**



wwz332-27.xls,d4

**Diagramm 6.1-4: Warmluft-Heizeinsatz mit Nachheizregister**  
**Rauchgastemperatur ausgewählte Periode**

### 6.1.2 Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher



Längsschnitt

**Bild 6.1-2:**  
**Versuchs- und Messanordnung Heizeinsatz**  
**mit massearmem Rauchgas/Luftwärmetauscher, parallele Luftführung**  
(Versuchsaufbau siehe Bild 5.2-2)

#### Kombination Heizeinsatz - massearmer Wärmetauscher

In dieser Versuchsreihe wurden Untersuchungen über die Leistungsabgabe des Heizeinsatzes bei verschiedenen Volumenströmen durchgeführt. Die Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse ist in Kapitel 7.1 enthalten.

Hier werden die Resultate beispielhaft anhand der Versuchsreihe mit dem Volumenstrom (Heizeinsatz) von ca.  $160 \text{ m}^3/\text{Std.}$  beschrieben. In der Tabelle 7.1-1 werden die Mittelwerte über die verschiedenen Abbrände dargestellt und weitere Auswertungen vorgenommen.

Die Diagramme enthalten die gemessenen Werte mit den noch hohen Rauchgas-Temperaturen beim Kamineintritt nach dem massearmen Wärmetauscher. In der Tabelle sind die Werte auf ein nutzbares Rauchgas-Temperaturniveau von  $150 \text{ °C}$  umgerechnet.

| <b>Kennwerte Versuch 6.1.2</b> | <b>Einh.</b>        | <b>Heiz-<br/>einsatz</b> | <b>massearm.<br/>Wärmet.</b> |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|
| Gewicht                        | [kg]                | 299                      | 38                           |
| Holz-Füllgewicht (Hartholz)    | [kg]                | 15                       |                              |
| Heizintervall                  | [Std.]              | 6 / 6 / 12               |                              |
| Heizungsluft-Volumenstrom      | [m <sup>3</sup> /h] | 162                      | 78                           |
| mittl. TRL (über 24 Std.)      | [°C]                | 24                       | 27                           |
| mittl. TVL (über 24 Std.)      | [°C]                | 70                       | 69                           |
| mittl. Q (über 24 Std.)        | [kW]                | 2.5                      | 1.8                          |
| QVLT*                          | [kW]                | 0.9                      |                              |
| Qrg*                           | [kW]                | 2.7                      |                              |

QVLT\* und Qrg\* sind rechnerisch ermittelte Werte

#### Diagramm 6.1-5 Leistung Übersicht Gesamtversuch

Anhand der Übersicht ist ersichtlich, dass im Betriebszustand die Leistungscharakteristik der einzelnen Abbrände fast deckungsgleich verläuft.

#### Diagramm 6.1-6 Leistung Übersicht ausgewählte Periode

Die Kurve Q1 (Leistung Warmlufteinsatz) verläuft beim 6 Stunden-Intervall zwischen 2 und 4 kW. Beim 12 Stunden-Intervall zwischen 1 und 4 kW. Die Kurve Q2 (massearmer Wärmetauscher) zeigt während des Holzabbrandes von ca. 2 Stunden Spitzenwerte von bis zu 11,5 kW auf, die Durchschnittswerte liegen bei 8,0 kW.

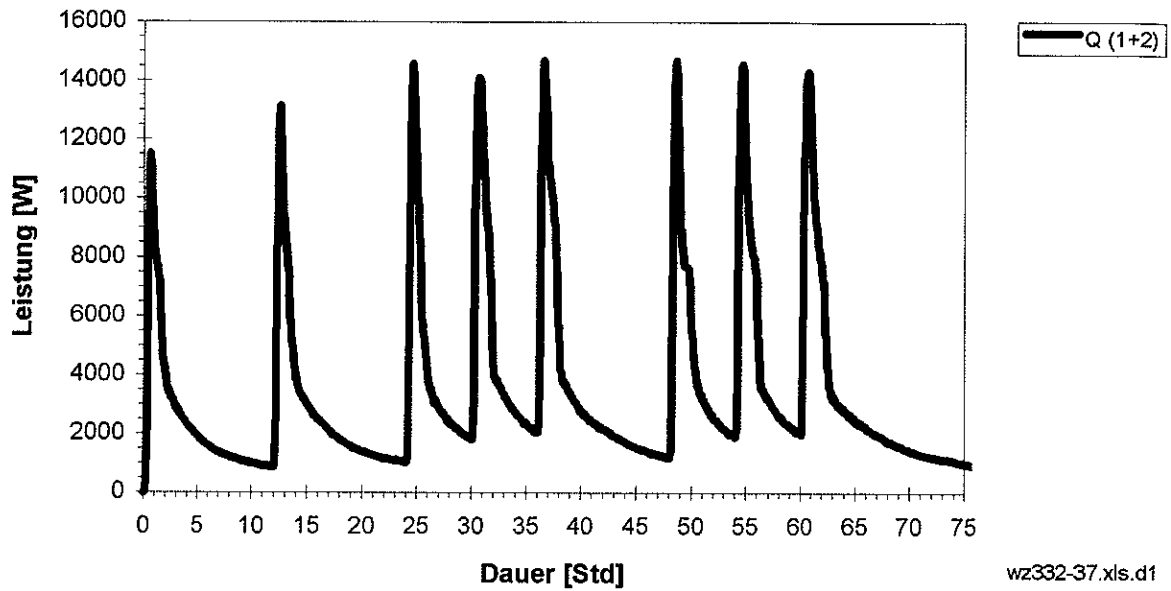


**Diagramm 6.1-5: Warmluft-Heizeinsatz, Heizeinsatz mit massearmen Wärmetauscher  
Leistung Übersicht Gesamtversuch**

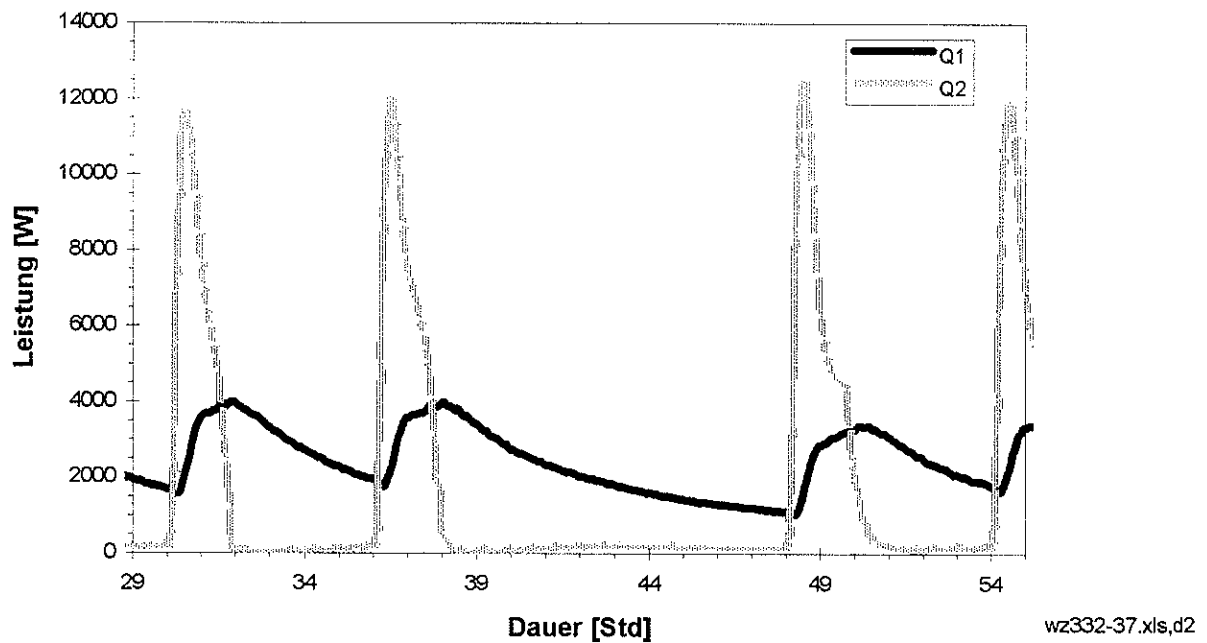


**Diagramm 6.1-6: Warmluft-Heizeinsatz, Heizeinsatz mit massearmen Wärmetauscher  
Leistung ausgewählte Periode**

#### Diagramm 6.1-7 Heizungsluft-Temperaturen ausgewählte Periode

Die Lufttemperaturen verlaufen analog zu den Leistungskurven. Die Luftvorlauf-Temperatur (TVL1) über den Speicherteil mit dem Heizeinsatz weist einen konstanten Vorlauf, mit einer Temperaturspreizung von 60 bis 120 °C innerhalb von 6 Stunden auf. Bei einem mittleren Volumenstrom von 280 m<sup>3</sup>/h erbringt die Anlage bei einer konstanten Rücklauftemperatur von 20 °C eine gerechnete Vorlauftemperatur von 130 °C.

#### Diagramm 6.1-8 Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode

Bei der Interpretation des Rauchgastemperaturverlaufes muss wiederum beachtet werden, dass nach Abschluss des Abbrandes durch die elektronische Abbrandsteuerung die Verbrennungsluftzufuhr geschlossen wird und danach kein Rauchgas-Massenstrom mehr vorhanden ist.

Die in den Rauchgasen enthaltene Energie am Stutzen des Heizeinsatzes kann vom Temperaturniveau TRG1 mittels nachgeschalteter Heizflächen bis auf ca. 150 °C genutzt werden. Die Werte TRG3 und TRG4 sind theoretische, von der Versuchsanordnung abhängige Temperaturen. Für die Praxis sind die Leistungsangaben in der Tabelle 7.1-1 errechnet.

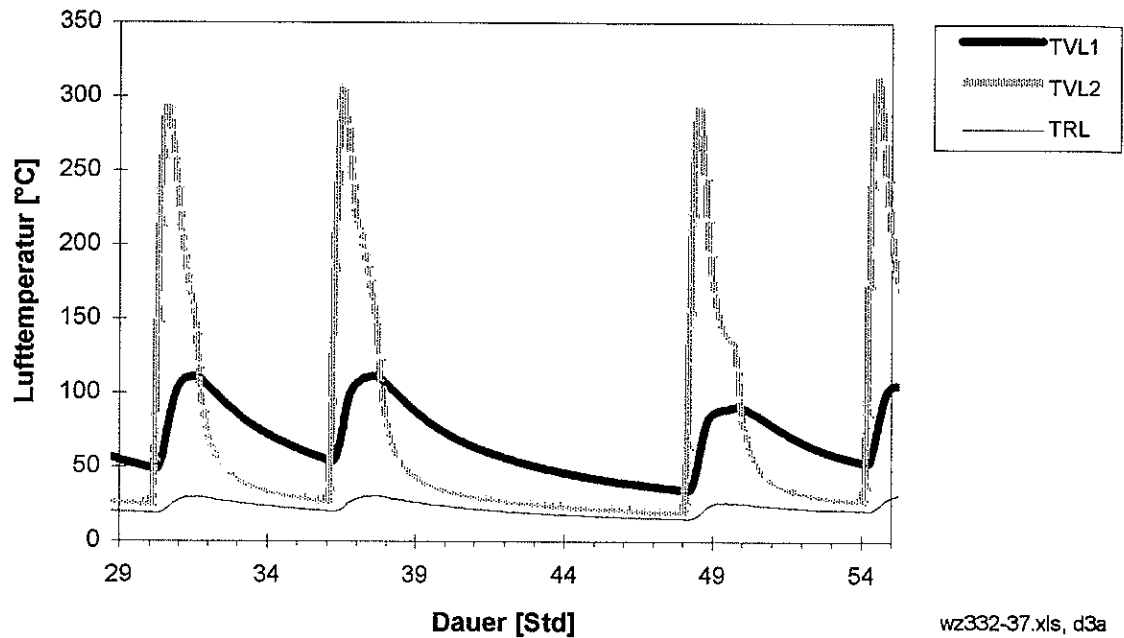


**Diagramm 6.1-7: Warmluft-Heizeinsatz, Heizeinsatz mit massearmen Wärmetauscher**  
**Heizungsluft-Temperatur ausgewählte Periode**

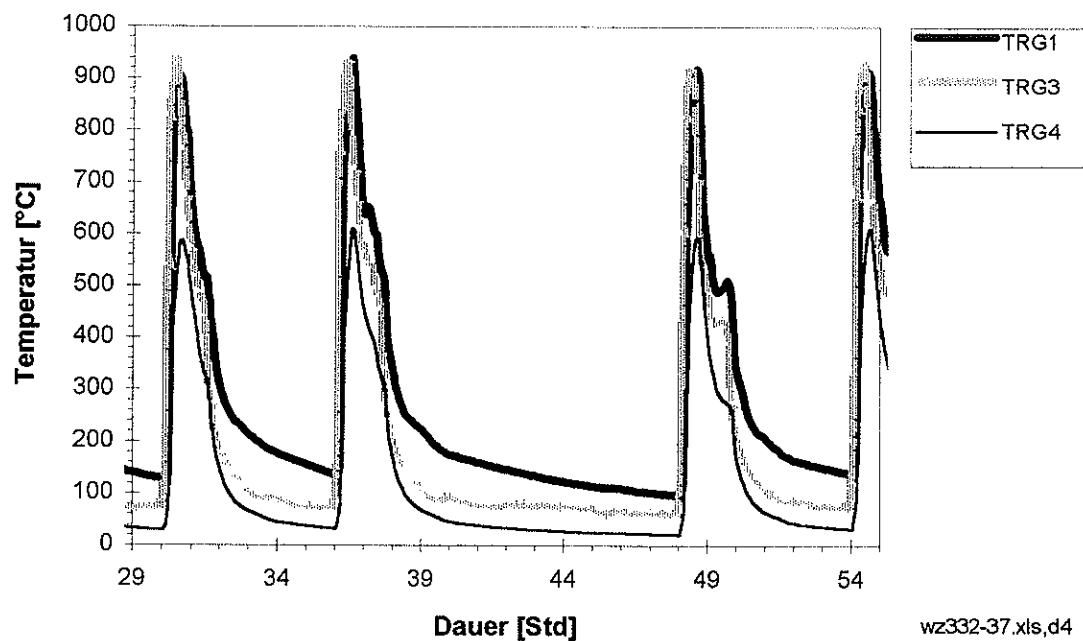


**Diagramm 6.1-8: Warmluft-Heizeinsatz, Heizeinsatz mit massearmen Wärmetauscher**  
**Rauchgastemperatur ausgewählte Periode**

## 6.2 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer

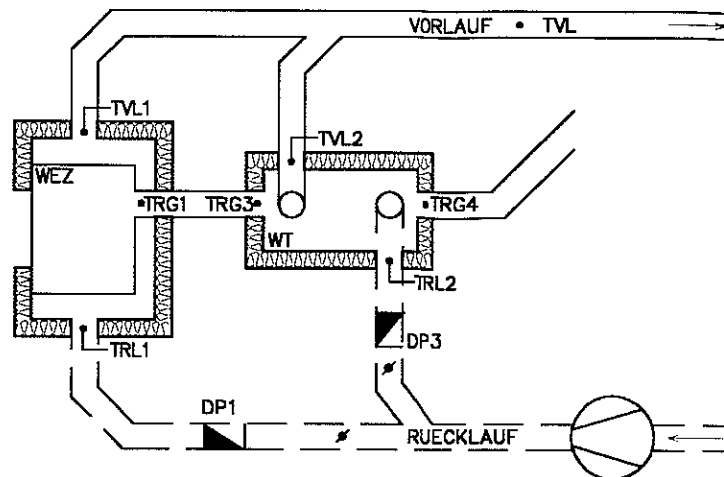


**Bild 6.2-1:**  
Versuchs- und Messandordnung  
Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer  
(Versuchsaufbau siehe Bild 5.3-1)

Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen aufgezeichnet. In der Tabelle 7.2-1 werden die Mittelwerte über die verschiedenen Abbrände dargestellt und weitere Auswertungen durchgeführt.

Die Diagramme enthalten die gemessenen Werte mit den noch hohen Rauchgas-Temperaturen beim Kamineintritt nach dem masselosen Wärmetauscher. In der Tabelle 6.2-1 sind die Werte auf ein nutzbares Rauchgas-Temperaturniveau von 150 °C umgerechnet.

| <b>Kennwerte Versuch 6.2</b> | <b>Einh.</b>        | <b>Heiz-<br/>einsatz</b> | <b>massearm.<br/>Wärmet.</b> |
|------------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|
| Gewicht                      | [kg]                | 650                      | 38                           |
| Holz-Füllgewicht (Hartholz)  | [kg]                | 32                       |                              |
| Heizintervall                | [Std.]              | 12/12                    |                              |
| Heizungsluft-Volumenstrom    | [m <sup>3</sup> /h] | 393                      | 235                          |
| mittl. TRL (über 24 Std.)    | [°C]                | 38                       | 40                           |
| mittl. TVL (über 24 Std.)    | [°C]                | 60                       | 78                           |
| mittl. Q (über 24 Std.)      | [kW]                | 2.6                      | 2.9                          |
| QVLT*                        | [kW]                | 3.2                      |                              |
| Qrg*                         | [kW]                | 3.8                      |                              |

QVLT\* und Qrg\* sind rechnerisch ermittelte Werte.

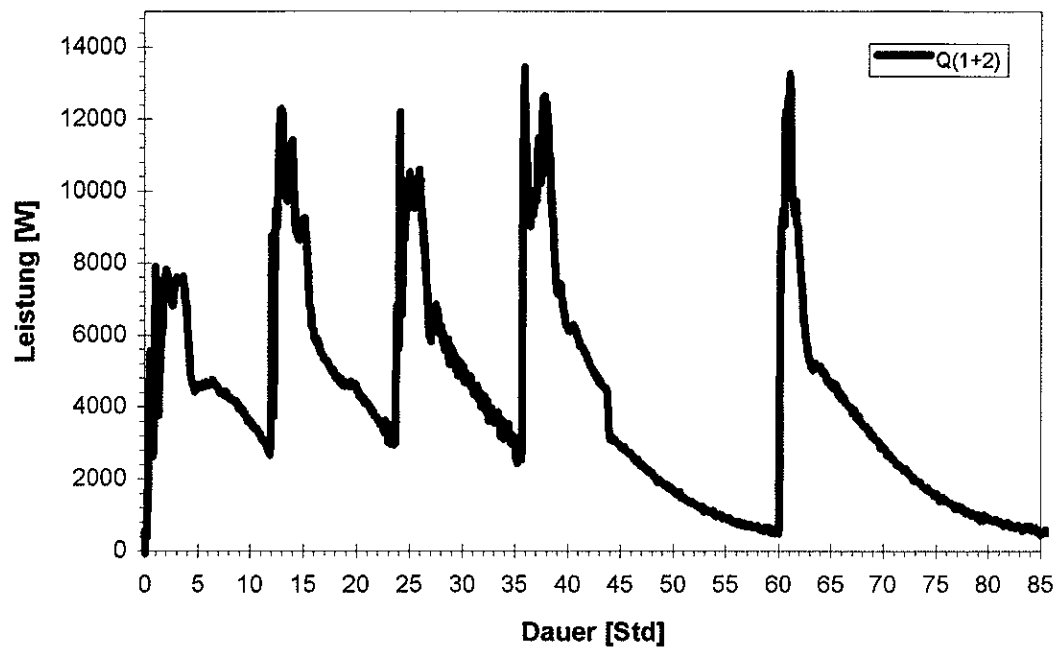
### Diagramm 6.2-1 Leistung Übersicht Gesamtversuch

Die Übersicht über die Versuchsreihe zeigt die Ähnlichkeit der Leistungskurve bei den einzelnen Abbränden. Der Einfluss der Speichermasse des Heizeinsatzes zeigt sich in der leistungsmässig reduzierten Anheizphase, während der ein Teil der Energie zur Aufheizung des Heizeinsatzes auf Betriebstemperatur benötigt wird. Für die Auswertung wurden die Abbrände 3 und 4 ausgewählt, das Heizintervall beträgt 12 Stunden.

### Diagramm 6.2-2 Leistung ausgewählte Periode

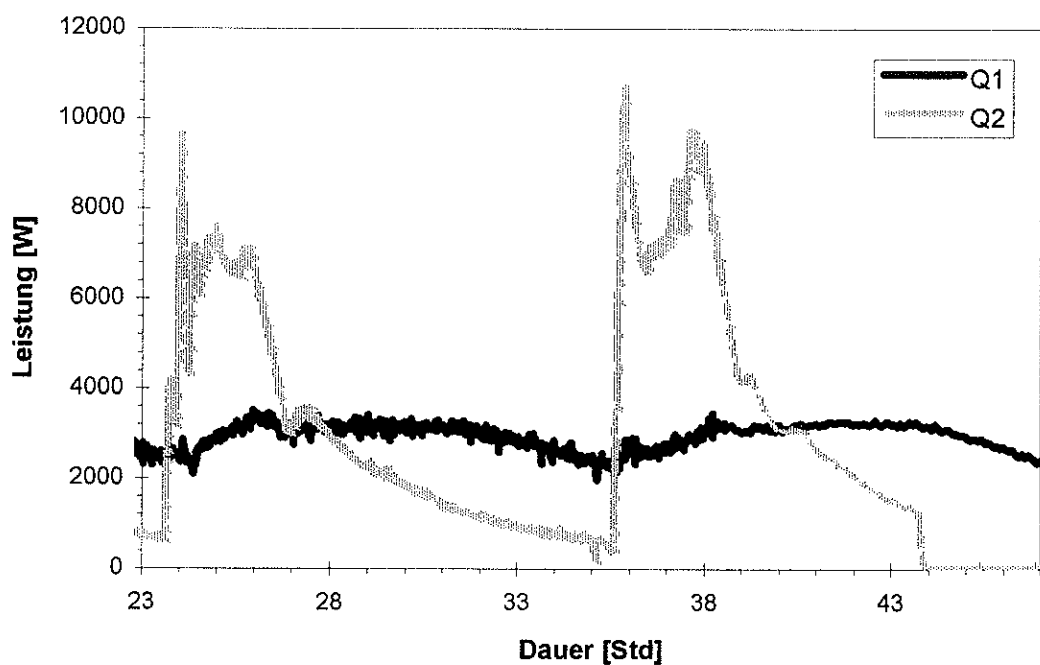
Die Kurve Q1 zeigt die Leistung des Heizeinsatzes aus Schamotte-Fertigelementen mit dem Feuerraum. Die Leistung ist über die Dauer von 12 Stunden relativ konstant und ausgeglichen. Der Leistungsverlauf des masselosen Wärmetauschers (Q2) weist während des Holzabbrandes von ca. 4 Stunden Werte von 6 - 9 kW, bei einem Abbrand sogar Werte von 8 - 10 kW auf.

Die Unstetigkeiten im Kurvenverlauf Q2 sind auf Einflüsse aus der Holzstückelung und dem Verhalten des Holzstapels beim Abbrand zurückzuführen. Diese Unregelmässigkeiten im Verbrennungsablauf wirken sich über die Rauchgastemperatur unmittelbar auf die Leistung im massearmen Wärmetauscher aus. Da die kurzzeitig anfallenden hohen Leistungen in zusätzlicher Speichermasse zwischengespeichert werden müssen, sind die Schwankungen in der Praxis nicht relevant.



chi004a.xls,d1

**Diagramm 6.2-1: Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer**  
**Leistung Übersicht Gesamtversuch**



chi004a.xls,d2

**Diagramm 6.2-2: Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer**  
**Leistung ausgewählte Periode**

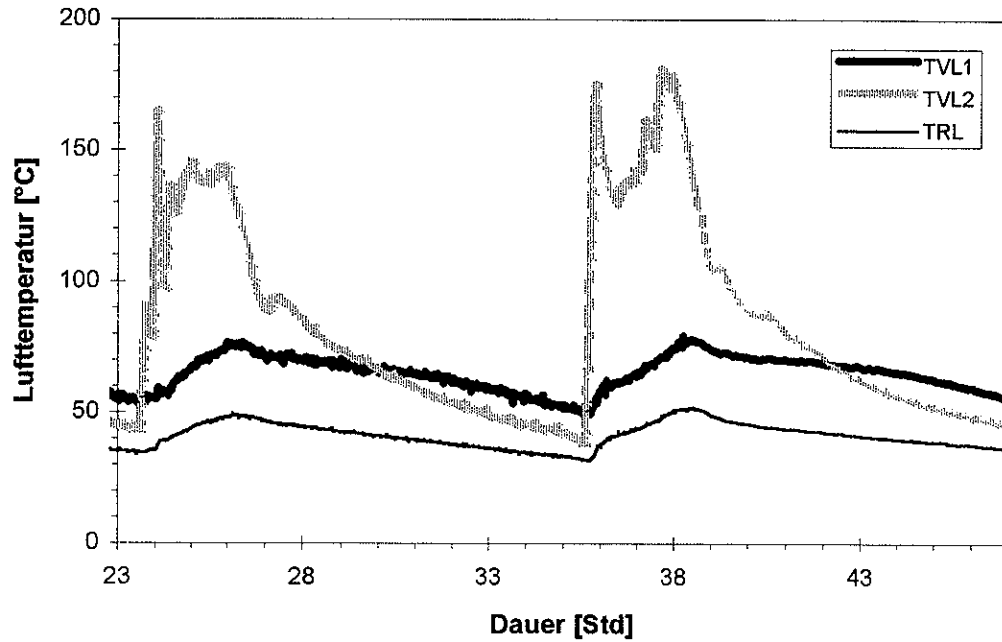
#### Diagramm 6.2-3 Heizungsluft-Temperaturen ausgewählte Periode

Die Lufttemperaturen verlaufen analog zu den Leistungskurven. Die Luftvorlauf-Temperatur (TVL1) über den Speicherteil mit dem Brennraum verläuft relativ konstant. Die Luftvorlauf-Temperatur (TVL2) über den masselosen Wärmetauscher weist während der Abbranddauer sehr hohe Werte auf, die nach dem Abbrand sofort abfallen.

#### Diagramm 6.2-4 Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode

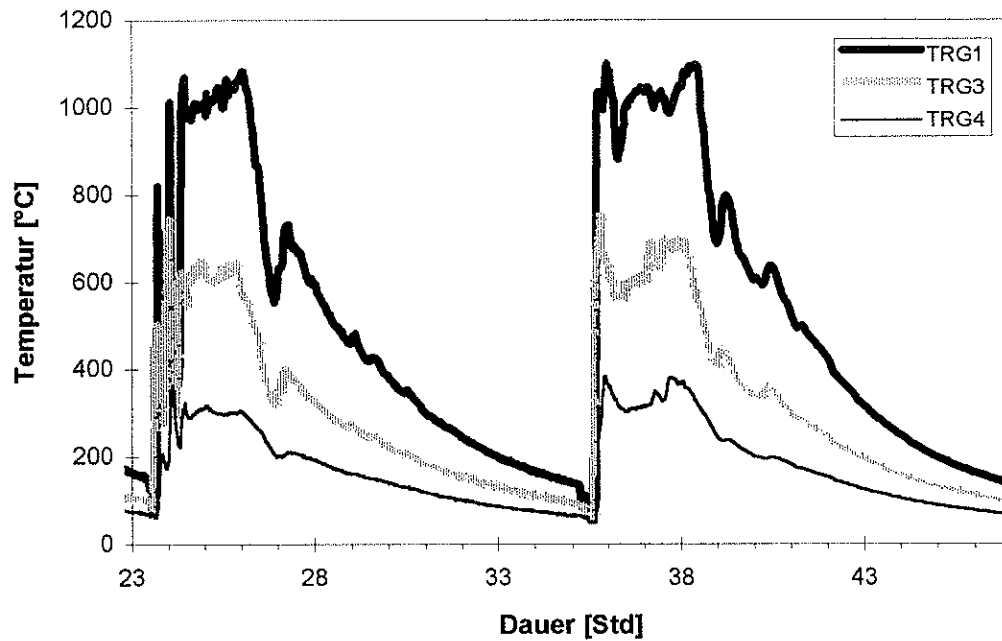
Der geprüfte Heizeinsatz war mit keinem automatischen Verbrennungsluft-Unterbruch nach Beendigung des Abbrandes ausgerüstet. Trotz Abstellens des Ventilators erfolgte nach dem Abbrand noch ein erheblicher Energietransport über die Rauchgasleitung, der nur teilweise über den nachgeschalteten Wärmetauscher genutzt wurde. Für den Einsatz in der Praxis muss zumindest eine automatische Schliessung der Verbrennungsluft-Zufuhr nach dem Abbrand vorgesehen werden.

Das hohe Temperaturniveau des Rauchgases am Stutzen des Heizeinsatzes von über 1000 °C während mehr als 3 Stunden stellt eine gute Voraussetzung für den Einsatz von nachgeschalteten Feststoffspeichern dar.



chi004a.xls,d3

**Diagramm 6.2-3: Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer  
Heizungsluft-Temperatur ausgewählte Periode**



chi004a.xls,d4

**Diagramm 6.2-4: Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer  
Rauchgastemperatur ausgewählte Periode**

### Diagramm 6.2-5 Oberflächentemperaturen

Die Oberflächentemperatur des Heizeinsatzes wurde an 5 Messstellen gemessen (siehe Bild 5.3-1). Im unteren Bereich (TO5), wo die Verbrennung stattfindet, sind die Oberflächentemperaturen am höchsten. Sie erreichen Werte von 180 °C während ca. 5 Stunden. Phasenweise verschoben mit einem je um etwa 20 °C tieferen Temperaturniveau folgen die höher angeordneten Messstellen (TO3 u. TO2). Die Spreizung der Oberflächentemperatur einzelner Messstellen liegt zwischen ca. 100 und 190 °C. Die Oberflächentemperaturen der Messstellen an Decke und Rückseite liegen etwas tiefer.

Die mittlere Oberflächentemperatur des Wärmeerzeugers (Mantelfläche ohne Front und Boden) während 12 Stunden liegt bei ca. 125 °C. Als Referenz ist noch der von den Oberflächentemperaturen abhängige Verlauf der Heizungsluft-Vorlauftemperatur dargestellt.

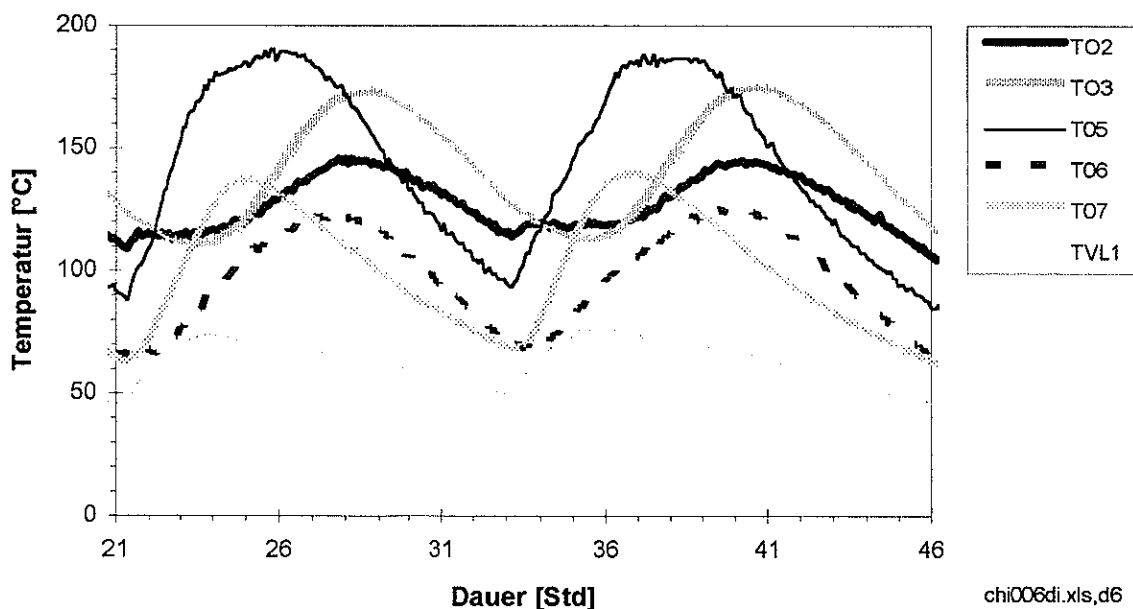


**Diagramm 6.2-5: Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer  
Oberflächentemperaturen**

## 6.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise

### 6.3.1 Paralleler Betrieb, 12 Std. Heizintervall

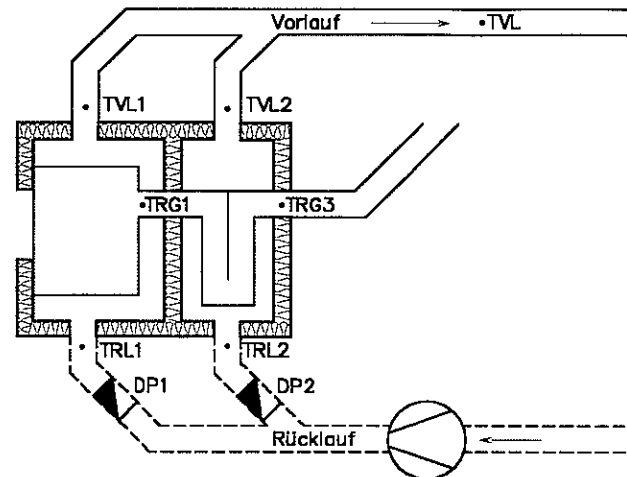


**Bild 6.3-1**

**Versuchs- und Messanordnung**

**Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, parallele Luftführung**  
(Versuchsaufbau siehe Bilder 6.4-1 und 5.4-2)

Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen aufgezeichnet. In der Tabelle 7.3-1 wurden die Mittelwerte über die verschiedenen Abbrände dargestellt und weitere Auswertungen durchgeführt.

Der Versuchsaufbau entspricht der Ausführung als komplette Praxisanlage: Brennraum und nachgeschaltete keramische Züge als Feststoffspeicher, anschliessend noch eine Stahl-Nachheizfläche als Schnellerhitzer, Rauchgas-Naturzug. Es handelt sich um eine auf die Anforderungen von Hypokausten-Heizungen hin optimierte Konstruktion.

Der Heizeinsatz war mit einer elektronischen Regelung inkl. Lambda-Sonde ausgerüstet. Nach dem Abbrand erfolgte eine automatische Schliessung der Verbrennungsluft-Zufuhr.

| <b>Kennwerte Versuch 6.3.1</b>   | <b>Einh.</b>        | <b>Heiz-<br/>einsatz</b> | <b>Nachheiz-<br/>fläche</b> | <b>Total</b> |
|----------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|
| Gewicht                          | [kg]                | 950                      | 50                          | 1000         |
| Holz-Füllgewicht (Spänebriketts) | [kg]                | 20                       |                             |              |
| Heizintervall                    | [Std.]              | 12 / 12                  |                             |              |
| Heizungsluft-Volumenstrom        | [m <sup>3</sup> /h] | 250                      | 245                         | 495          |
| mittl. TRL (über 24 Std.)        | [°C]                | 42                       | 42                          | 42           |
| mittl. TVL (über 24 Std.)        | [°C]                | 98                       | 59                          | 79           |
| mittl. Q (über 24 Std.)          | [kW]                | 4.4                      | 1.3                         | 5.7          |

#### Diagramm 6.3-1 Leistung Übersicht Gesamtversuch

Anhand der Übersicht ist der nach der Anheizphase gleichbleibend ähnliche Verlauf der Leistungskurve bei den einzelnen Abbränden ersichtlich. Der Einfluss der grossen Speichermasse zeigt sich in der leistungsmässig stark reduzierten Anheizphase, während der ein Teil der Energie zur Aufheizung des Speichers auf Betriebstemperatur benötigt wird. Für die Auswertung wurden die Abbrände 3 und 4 ausgewählt, das Heizintervall beträgt 12 Stunden.

#### Diagramm 6.3-2 Leistung ausgewählte Periode

Die Kurve Q1 zeigt die Leistung des Speicherteils mit Feuerraum und keramischen Nachheizflächen. Sie bewegt sich über die Dauer von 12 Stunden in einem Leistungsband von 3 - 5.7 kW.

Der Leistungsverlauf der Stahl-Nachheizfläche folgt dem Abbrand (Abbranddauer einer Charge ca. 1.5 Stunden) mit einer Leistungsspitze von 5.5 kW.

Die Summenkurve Q der beiden Leistungen Q1 und Q2 bleibt während ca. 5 Stunden im Bereich zwischen 6.5 und 7 kW, mit einer Spitze von 8 kW während des Abbrandes, und fällt dann bis auf ca. 4 kW. Die momentane Spitze ist, im Vergleich zu anderen Aggregaten, klein, sollte aber noch zwischengespeichert werden. Aus diesem Grunde wurde eine weitere Versuchsreihe mit serieller Luftführung durchgeführt.

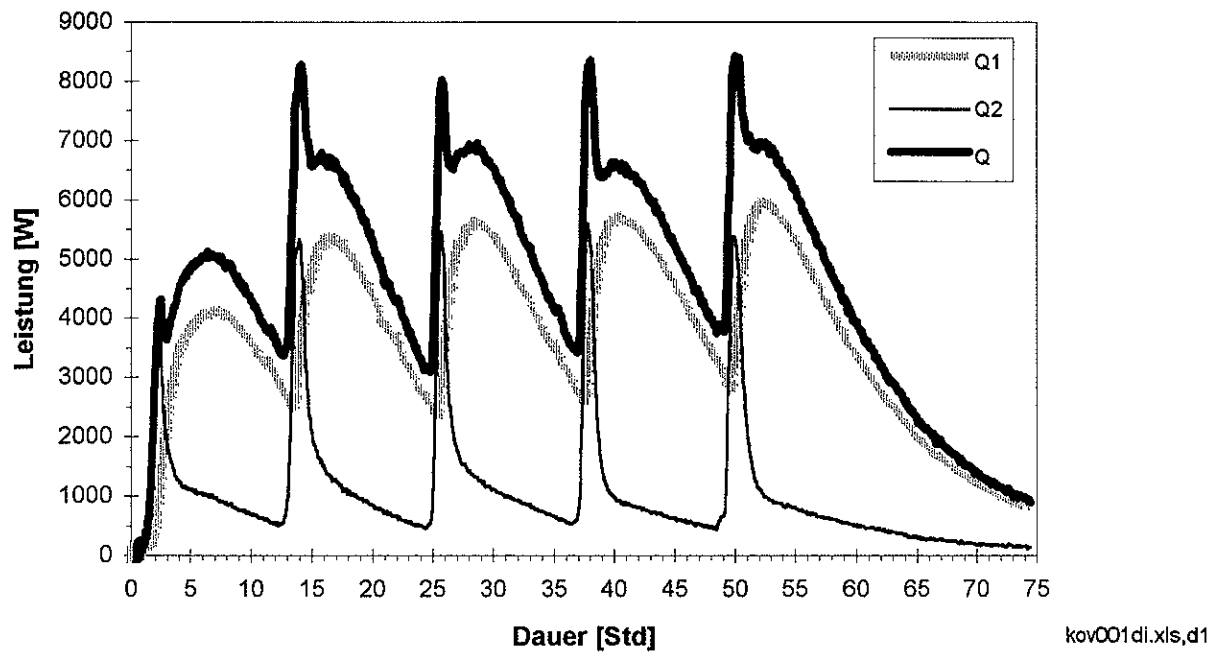


**Diagramm 6.3-1: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb**  
**Leistung Übersicht Gesamtversuch**

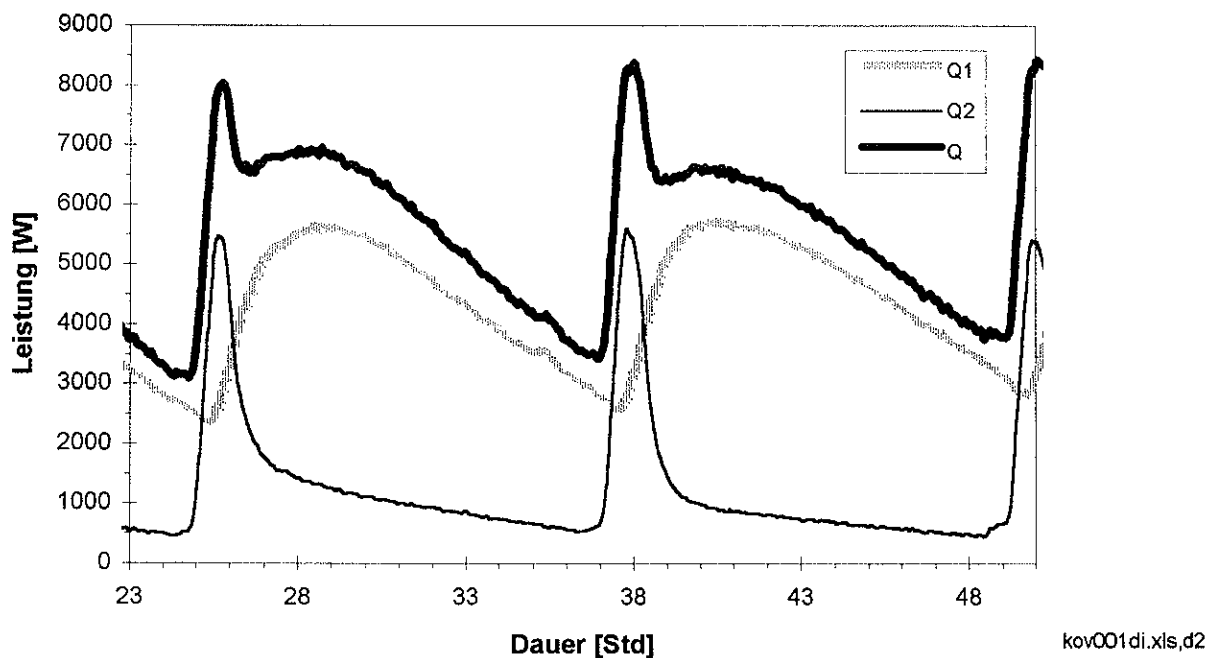


**Diagramm 6.3-2: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb**  
**Leistung ausgewählte Peiode**

#### Diagramm 6.3-3 Heizungslufttemperaturen ausgewählte Periode

Die Temperaturen verlaufen analog zu den Leistungskurven. Die Luftvorlauf-Temperatur über dem Speicherteil, mit Feuerraum und keramischen Nachheizflächen (TVL1) bewegt sich zwischen 70 und 120 °C. Die Werte der Luftvorlauf-Temperatur über die Stahl-Nachheizfläche weisen eine Spitze von ca. 110 °C während des Abbrandes auf und bleiben dann relativ konstant zwischen 60 und 50 °C.

Die mittlere Vorlauftemperatur  $T_{v1}$  zeigt einen ausgewogenen, relativ konstanten Verlauf auf. Bei einem Heizungsluft-Volumenstrom von 500 m<sup>3</sup>/h und einer mittleren Rücklauftemperatur von 40 °C beträgt ihr Mittelwert über 12 Stunden ca. 80 °C. Die Stahl-Nachheizfläche trägt zu einer schnellen Erwärmung bei.

#### Diagramm 6.3-4 Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode

Die Rauchgastemperaturen zeigen anhand ihres Verlaufes die Abbrandzeit von ca 1.5 Stunden pro Charge auf. Nach dem Abbrand wird die Verbrennungsluft-Zuführung über die Regelung automatisch geschlossen. Die Verluste über die Rauchgase sind nach dem Abschliessen vernachlässigbar. Aus dem Verlauf der Rauchgastemperatur TRG1 beim Austritt aus dem keramischen Speicher ist ersichtlich, dass der Speicher kontinuierlich Wärme abgibt.

Die Rauchgastemperatur beim Austritt aus der Stahlnachheizfläche TRG3 bewegt sich nach dem Abbrand auf annähernd gleichem Niveau, der keramische Speicher wird somit nicht zusätzlich über die Rauchgaswege entladen. Während des Abbrandes beträgt TRG3 durchschnittlich 280 °C. Diese Rauchgastemperatur kann durch eine angepasste Dimensionierung der Nachheizfläche noch besser genutzt werden.

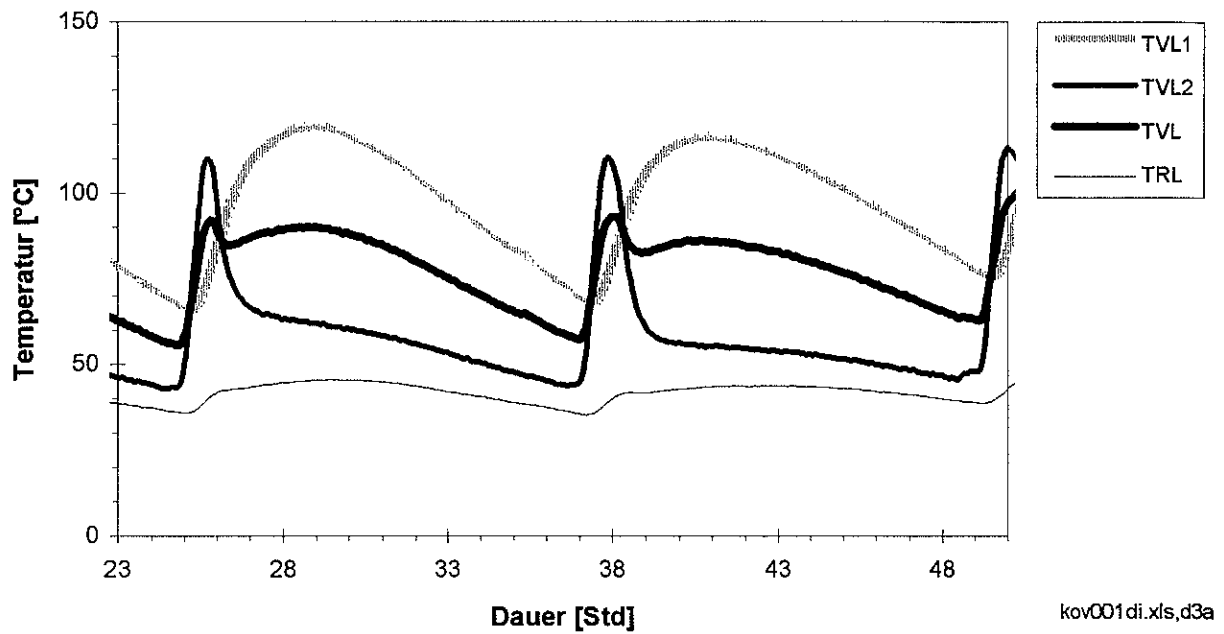


**Diagramm 6.3-3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb  
Heizungsluft-Temperaturen ausgewählte Periode**

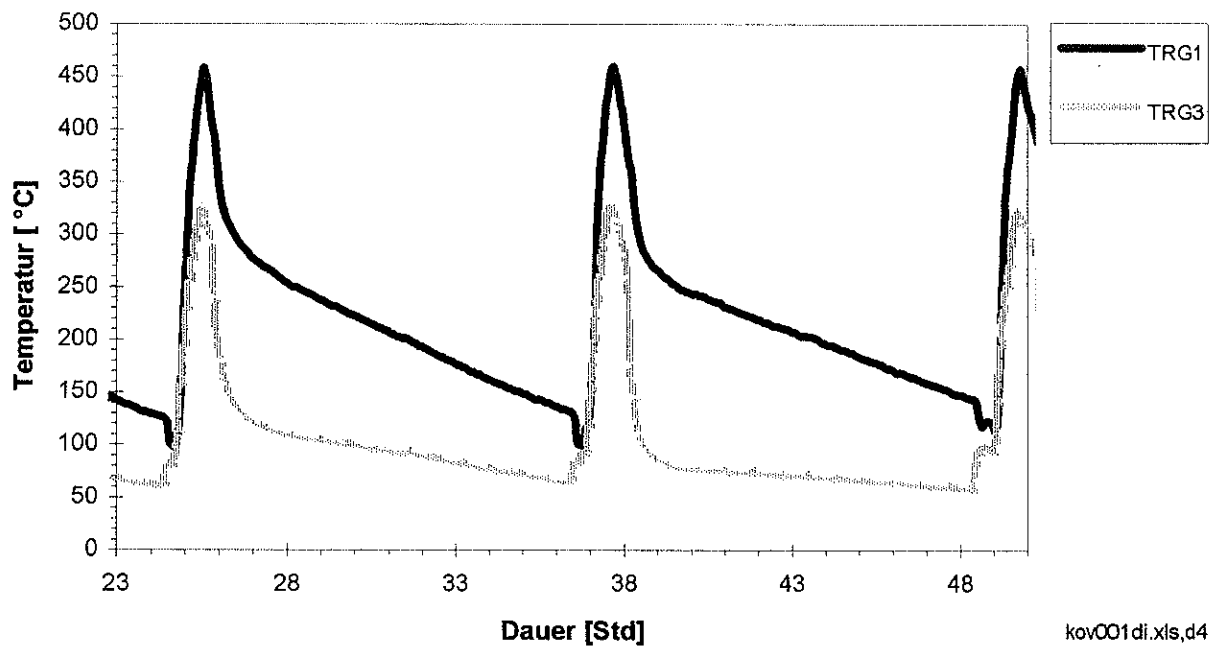


**Diagramm 6.3-4: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb  
Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode**

#### Diagramm 6.3-5 Oberflächentemperaturen ausgewählte Periode

Die Oberflächentemperatur des Heizeinsatzes wurde an 2 Stellen (TO2 und TO4) gemessen (siehe Bild 5.4-1). Ein über die Heizfläche gewichteter rechnerischer Mittelwert (TOM) weist eine Spreizung von 80 bis 200 °C auf, mit einem Durchschnitt von 150 °C über das 12-Stunden-Heizintervall.

#### Diagramm 6.3-6 Massentemperaturen ausgewählte Periode

An drei verschiedenen Stellen in der Mitte der Speicherwand wurde die Massentemperatur gemessen (siehe Bild 5.4-1). Aus diesen drei Messwerten wurde ein gewichteter rechnerischer Mittelwert (TMM) gebildet. Der Speicher erwärmt sich pro Charge im Mittel von ca. 100 auf 250 °C, was eine Temperaturspreizung von 150 °C ergibt.

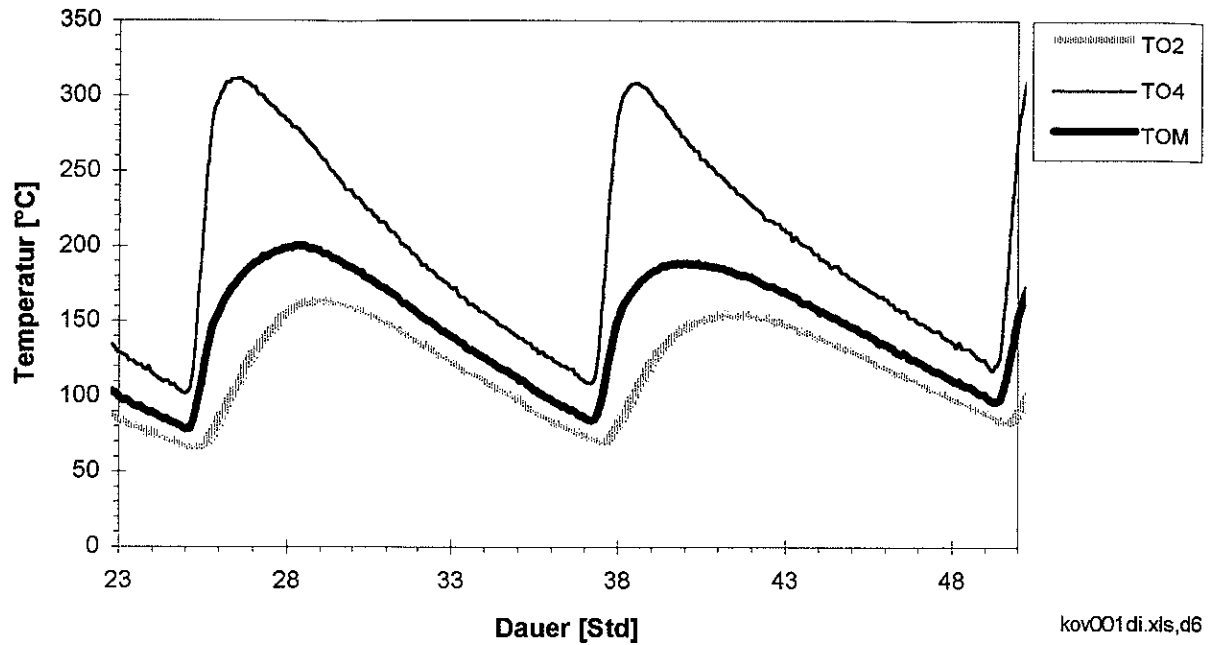


**Diagramm 6.3-5: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb  
Oberflächentemperatur ausgewählte Periode**

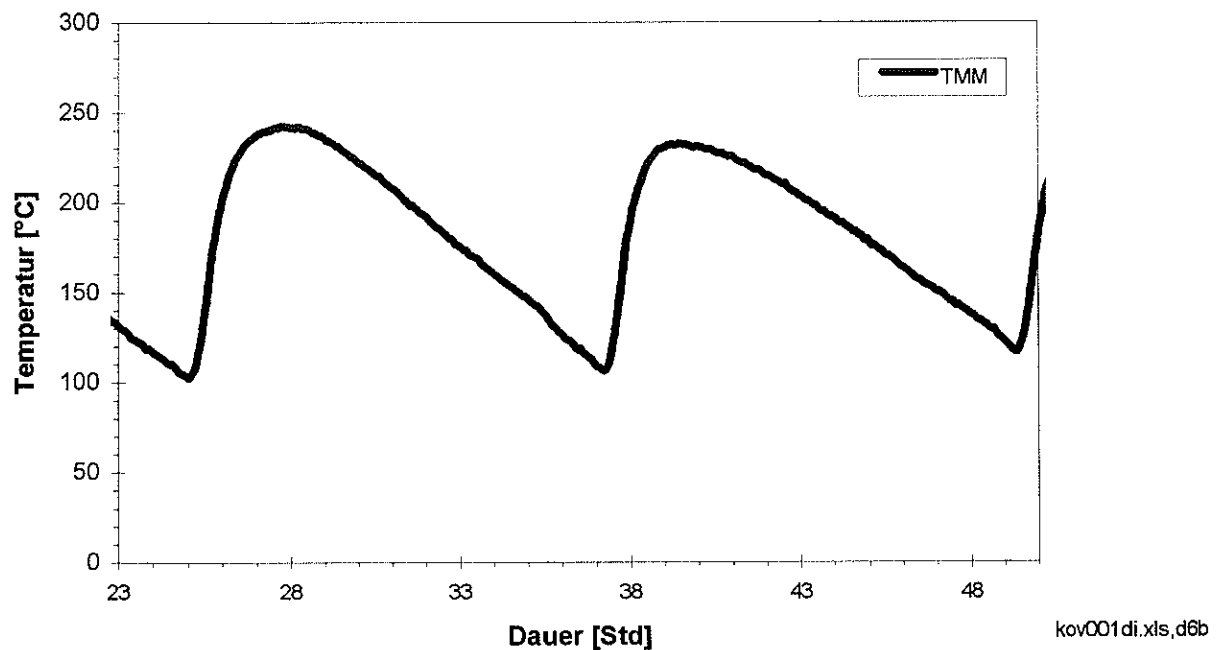


**Diagramm 6.3-6: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb  
Gemittelte Massentemperatur ausgewählte Periode**

### **6.3.2 Paralleler Betrieb, 8 Std. Heizintervall**

Versuchs- und Messanordnung, bzw. Versuchsaufbau gemäss 6.3.1.

Mit diesem Versuch sollten die Leistungswerte bei dreimaligem Einfeuern pro Tag ermittelt werden. Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen aufgezeichnet.

#### Diagramm 6.3-7, Leistung Übersicht Gesamtversuch

Die Übersicht über die Versuchsreihe zeigt die Ähnlichkeit der Leistungskurven bei den einzelnen Abbränden. Der Beharrungs-Betriebszustand wurde erst nach der 5. Füllung erreicht. Für die Auswertung wurden die Abbrände 5 und 6 ausgewählt, das Heizintervall beträgt 8 Stunden.

#### Diagramm 6.3-8, Leistung ausgewählte Periode

Die Kurve Q1 zeigt die Leistung des Speicherteils mit Feuerraum und keramischen Nachheizflächen. Sie bewegt sich über die Dauer von 8 Stunden auf einem hohen Niveau mit einem Band von 6 - 8 kW. Der Leistungsverlauf der Stahl-Nachheizfläche folgt dem Abbrand (Abbranddauer einer Charge ca. 1.5 Stunden) mit einer Leistungsspitze von 5.7 kW.

Die Summenkurve Q der beiden Leistungen Q1 und Q2 bleibt während ca. 5 Stunden im Bereich zwischen 8 und 9.5 kW, mit einer Spitze von 11.5 kW während des Abbrandes, und fällt dann bis auf ca. 7 kW. Die momentane Spitze ist im Vergleich zu anderen Aggregaten klein, sollte aber noch zwischengespeichert werden. Wegen des kurzen Füllintervalles von 8 Stunden hat die Anlage ein hohes Leistungsniveau. An den wenigen extrem kalten Tagen scheint die Auslegung des Heizsystems auf dreimal Nachfüllen pro Tag zumutbar. So muss der Wärmeerzeuger für den Normalbetrieb nicht überdimensioniert werden.

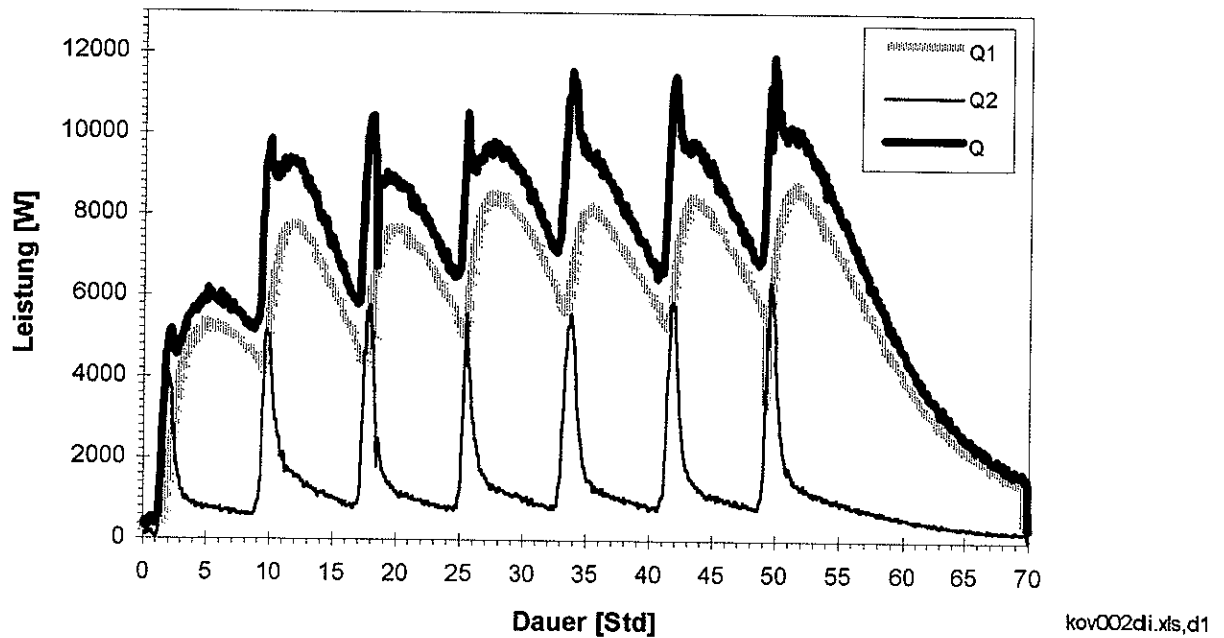


**Diagramm 6.3-7: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb, 8 Stunden Füllintervall**  
**Leistung Übersicht Gesamtversuch**

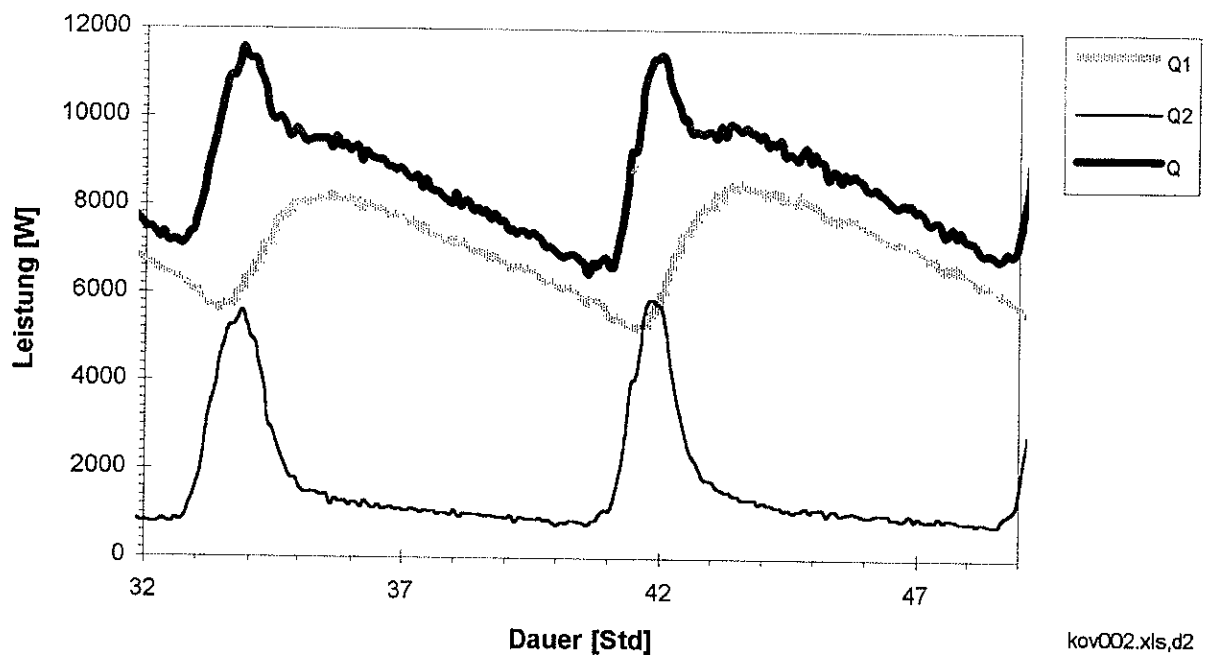


**Diagramm 6.3-8: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb, 8 Stunden Füllintervall**  
**Leistung ausgewählte Periode**

#### Diagramm 6.3-9, Heizungsluft-Temperaturen ausgewählte Periode

Die Lufttemperaturen verlaufen analog zu den Leistungskurven, weisen jedoch gegenüber dem 12-Stunden-Heizintervall ein höheres Niveau und einen konstanten Verlauf mit kleinerer Spreizung auf. Die Luftvorlauf-Temperatur über dem Speicherteil, mit Feuerraum und keramischen Nachheizflächen (TVL1), bewegt sich zwischen 90 und 120 °C. Die Werte der Luftvorlauf-Temperatur über die Stahl-Nachheizfläche weisen eine Spitze von ca. 130 °C während des Abbrandes auf und bleiben dann relativ konstant zwischen 60 und 80 °C.

Die mittlere Vorlauftemperatur Tvl zeigt einen ausgewogenen, relativ konstanten Verlauf auf. Bei einem Heizungsluft-Volumenstrom von 900 m<sup>3</sup>/h und einer mittleren Rücklauftemperatur von 55 °C beträgt ihr Mittelwert über 12 Stunden ca. 100 °C. Die Stahl-Nachheizfläche trägt zu einer schnellen Erwärmung bei.

#### Diagramm 6.3-10, Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode

Die Rauchgastemperaturen zeigen anhand ihres Verlaufes die Abbrandzeit von ca. 1.5 Std. pro Charge auf. Nach dem Abbrand wird die Verbrennungsluft-Zufuhr über die Regelung automatisch geschlossen. Die Verluste über die Rauchgase sind nach dem Abschliessen vernachlässigbar. Aus dem Verlauf der Rauchgastemperatur TRG1 beim Austritt aus dem keramischen Speicher ist ersichtlich, dass der Speicher kontinuierlich Wärme abgibt.

Die Rauchgastemperatur beim Austritt aus der Stahl-Nachheizfläche TRG3 bewegt sich nach dem Abbrand auf dem Niveau der Heizungsluft, der keramische Speicher wird somit nicht zusätzlich über die Rauchgaswege entladen. Während des Abbrandes beträgt TRG3 durchschnittlich ca. 300 °C. Die im Rauchgas enthaltene Energie kann durch eine angepasste Dimensionierung der Nachheizfläche noch besser genutzt werden.

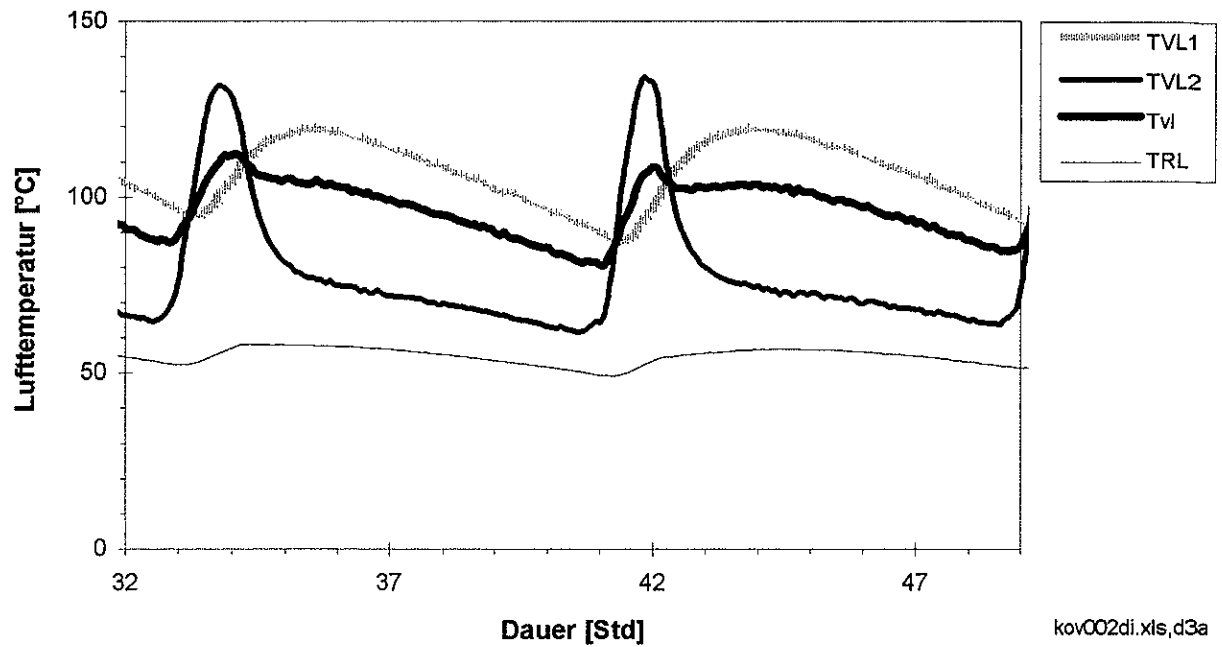


**Diagramm 6.3-9: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb, 8 Stunden Füllintervall  
Lufttemperaturen ausgewählte Periode**

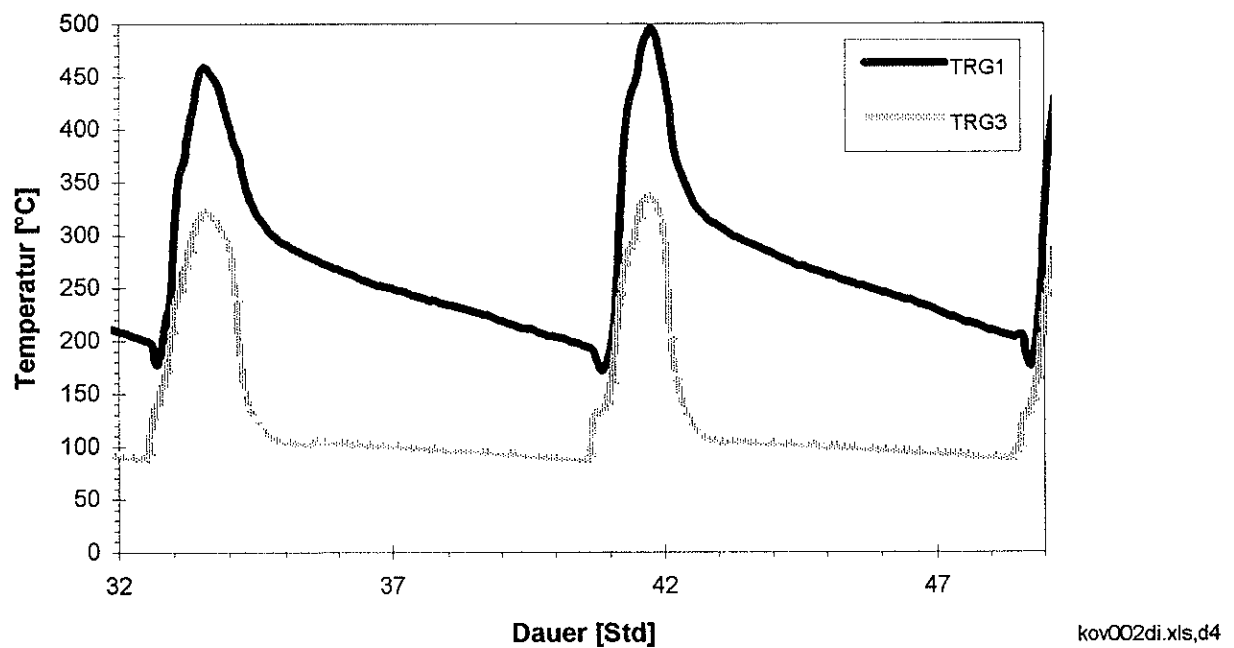


**Diagramm 6.3-10: Kachelofen-Heizeinsatz, paralleler Betrieb, 8 Stunden Heizintervall  
Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode**

**Kennwerte Versuch 6.3.2**

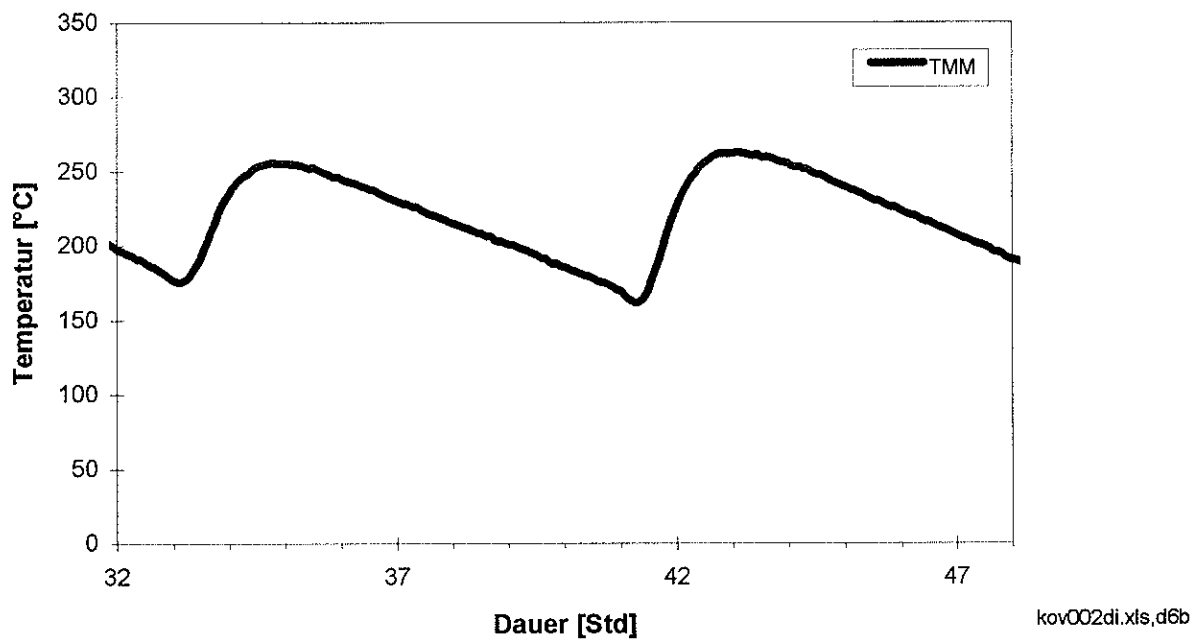
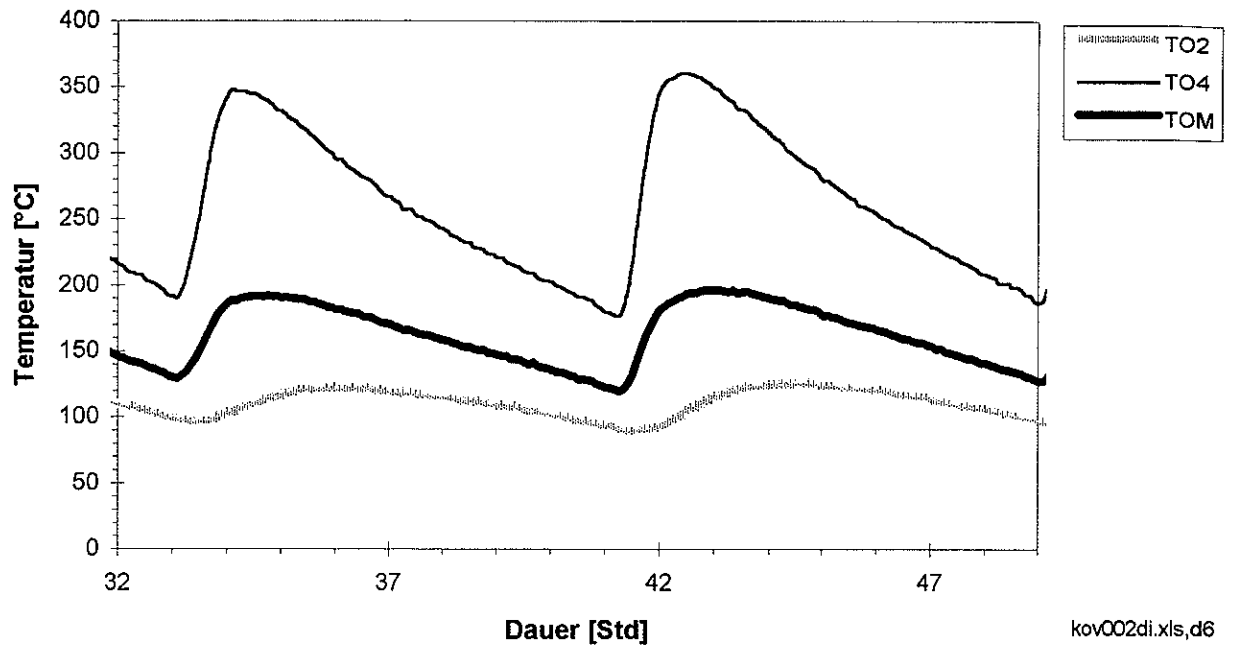
|                                  | Einh.               | Heiz-<br>einsatz | Nachheiz-<br>fläche | Total |
|----------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|-------|
| Gewicht                          | [kg]                | 950              | 50                  | 1000  |
| Holz-Füllgewicht (Spänebriketts) | [kg]                | 20               |                     |       |
| Heizintervall                    | [Std.]              | 8 / 8 / 8        |                     |       |
| Heizungsluft-Volumenstrom        | [m <sup>3</sup> /h] | 450              | 230                 | 680   |
| mittl. TRL (über 24 Std.)        | [°C]                | 55               | 55                  | 55    |
| mittl. TVL (über 24 Std.)        | [°C]                | 108              | 79                  | 98    |
| mittl. Q (über 24 Std.)          | [kW]                | 7.1              | 1.7                 | 8.8   |

Diagramm 6.3-11, Oberflächentemperaturen ausgewählte Periode

Die Oberflächentemperatur des Heizeinsatzes wurde an 2 Stellen (TO2 und TO4) gemessen (siehe Bild 5.4-1). Ein über die Heizfläche gewichteter rechnerischer Mittelwert (TOM) weist eine Spreizung von 130 bis 200 °C auf, mit einem Durchschnitt von 160 °C über das 12-Stunden-Heizintervall. Die Oberflächentemperatur entspricht auch der theoretisch möglichen Obergrenze der Heizungsluft-Vorlauftemperatur.

Diagramm 6.3-12, Massentemperaturen ausgewählte Periode

An drei Stellen in der Mitte der Speicherwand wurde die Massentemperatur gemessen (siehe Bild 5.4-1). Aus diesen drei Messwerten wurde ein gewichteter rechnerischer Mittelwert (TMM) gebildet. Der Speicher erwärmt sich pro Charge im Mittel von ca. 160 auf 260 °C, was eine Temperaturspreizung von ca. 100 °C ergibt. Diese ist, bedingt durch das kürzere Füllintervall, kleiner als beim 12-Stunden-Intervall.



### 6.3.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise

#### Serieller Betrieb, 12 Std. Heizintervall

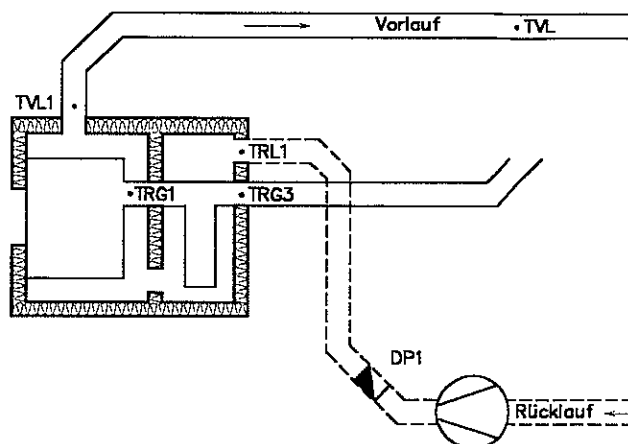


**Bild 6.3-2:**  
**Versuchs- und Messanordnung**  
**Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serielle Luftführung**  
**(Versuchsaufbau siehe Bilder 5.4-1 und 5.4-3)**

Mit dieser Versuchsreihe sollte untersucht werden, ob gegenüber der parallelen Luftführung ein ausgeglichenerer Leistungsverlauf über das Heizintervall zu erreichen ist. Die Heizungsluft wurde im Gegenstromprinzip über Nachschaltheizfläche und Heizeinsatz geführt.

Die Versuchsergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen aufgezeichnet.

| Kennwerte Versuch 6.3.3          | Einh.               | Heiz-einsatz | Nachheiz-fläche | Total |
|----------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|-------|
| Gewicht                          | [kg]                | 950          | 50              | 1000  |
| Holz-Füllgewicht (Spänebriketts) | [kg]                | 20           |                 |       |
| Heizintervall                    | [Std.]              | 12 / 12      |                 |       |
| Heizungsluft-Volumenstrom        | [m <sup>3</sup> /h] | 500          | 500             | 500   |
| mittl. TRL (über 24 Std.)        | [°C]                | 42           |                 | 42    |
| mittl. TVL (über 24 Std.)        | [°C]                | 88           |                 | 88    |
| mittl. Q (über 24 Std.)          | [kW]                |              |                 | 7.1   |

#### Diagramm 6.3-13, Leistung Übersicht Gesamtversuch

Aus der Übersicht ist der gleichbleibend ähnliche Verlauf der Leistungskurve bei den einzelnen Abbränden ersichtlich. Da die Versuchsreihe im noch warmen Zustand des Speicherteiles begann, ist die Anheizkurve nicht so deutlich ausgeprägt. Für die Auswertung wurden die Abbrände 3 und 4 ausgewählt, das Heizintervall beträgt 12 Stunden.

#### Diagramm 6.3-14, Leistung ausgewählte Periode

Die Kurve Q zeigt die Gesamtleistung von Heizeinsatz und Stahl-Nachheizfläche. Sie bewegt sich in einem Leistungsband von 4.3 - 9.4kW und beschreibt die klassische Aufheiz- und Abkühlkurve eines Speichers. Durch die serielle Schaltung weist die Kurve keinen kurzzeitigen grossen Peak auf. Die Kurve ist für eine Holzfeuerung, mit einer Abbrandzeit von 1.5 Stunden und einem Heizintervall von 12 Stunden, recht konstant. Die mittlere Leistung über 12 Stunden beträgt ca. 7 kW.

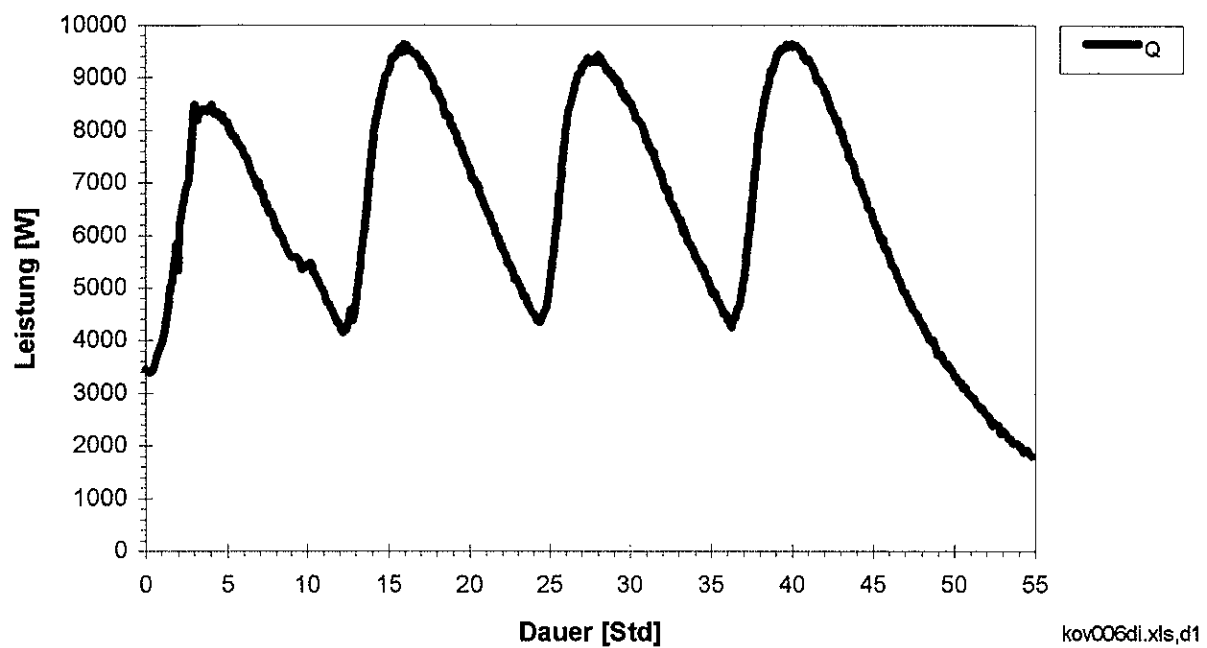


**Diagramm 6.3-13: Kachelofen in Speicherbauweise, serieller Betrieb**  
**Leistung Übersicht Gesamtversuch**

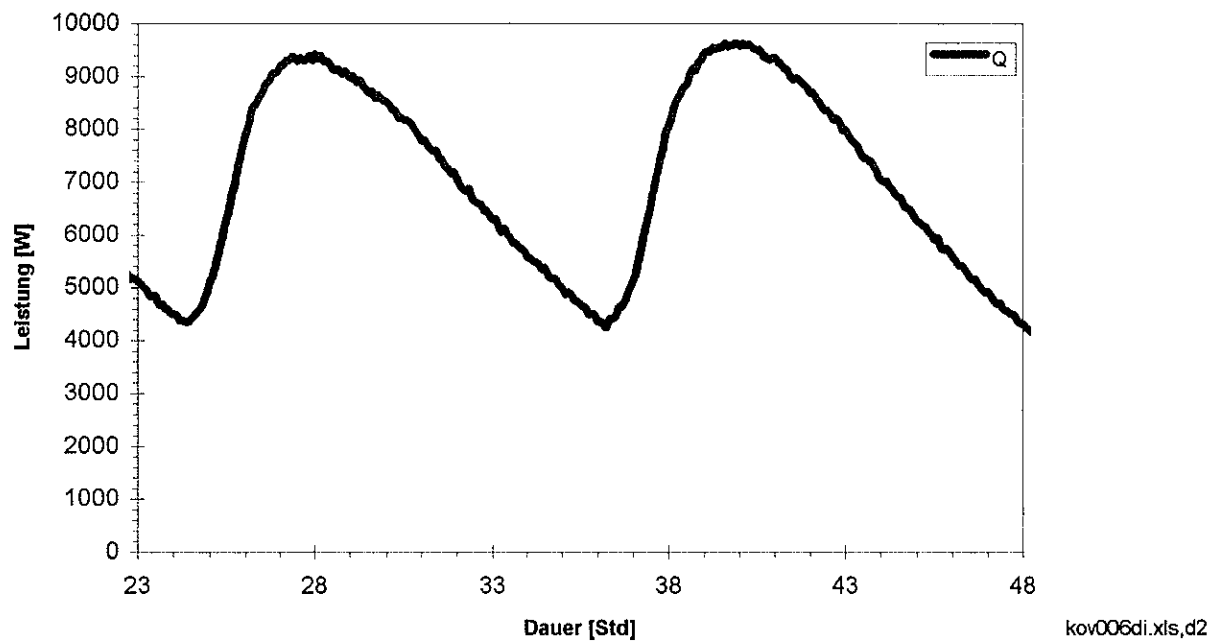


**Diagramm 6.3-14: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serieller Betrieb**  
**Leistung ausgewählte Periode**

#### Diagramm 6.3-15, Heizungsluft-Temperaturen ausgewählte Periode

Die Lufttemperaturen verlaufen analog zu den Leistungskurven. Die Luftvorlauf-Temperatur (TVL1) weist einen ausgewogenen, konstanten Verlauf zwischen 60 und 110 °C auf. Ihr Mittelwert über 12 Stunden beträgt ca. 90 °C bei einem Volumenstrom von 500 m<sup>3</sup>/h und einer mittleren Rücklauftemperatur von ca. 40 °C.

#### Diagramm 6.3-16, Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode

Die Rauchgastemperaturen zeigen anhand ihres Verlaufes die Abbrandzeit von ca. 1.5 Std. pro Charge auf. Nach dem Abbrand wird die Luftzuführung über die Regelung automatisch geschlossen. Die Verluste über die Rauchgase sind nach dem Abschliessen vernachlässigbar. Aus dem Verlauf der Rauchgastemperatur TRG1 beim Austritt aus dem keramischen Speicher ist ersichtlich, dass der Speicher kontinuierlich Wärme abgibt.

Die Rauchgastemperatur beim Austritt aus der Stahl-Nachheizfläche TRG3 bewegt sich nach dem Abbrand auf dem Niveau der Heizungsluft. Während des Abbrandes tritt eine max. Rauchgastemperatur von ca. 170 bis 180 °C auf. Dies ist deutlich niedriger als bei der parallelen Heizungsluftführung. Durch die serielle Luftführung im Gegenstrom werden die Rauchgase tiefer abgekühlt und damit kann der Anlagewirkungsgrad erhöht werden.

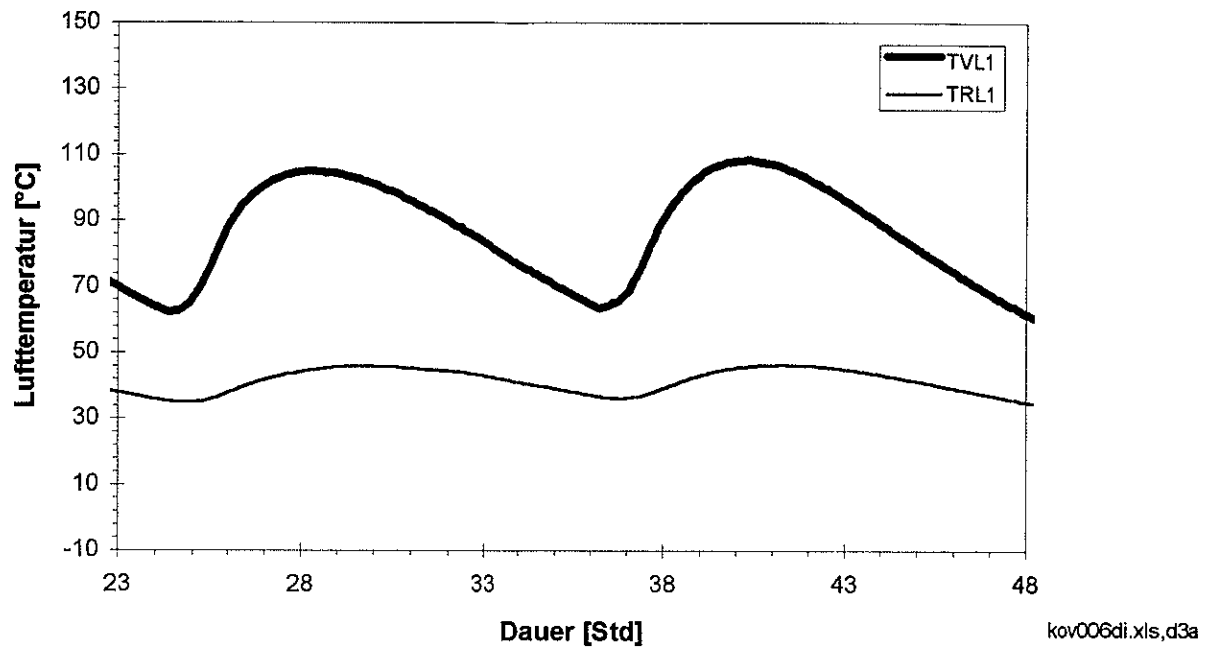


**Diagramm 6.3-15: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serieller Betrieb**  
**Heizungsluft-Temperaturen ausgewählte Periode**

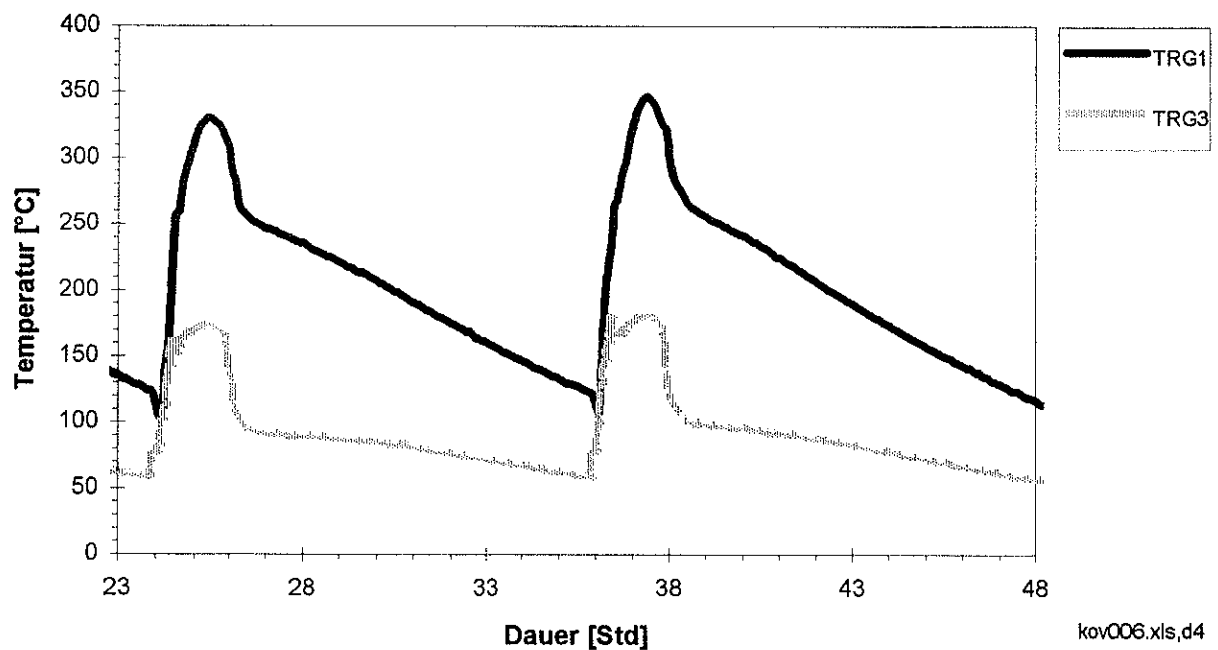


**Diagramm 6.3-16: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serieller Betrieb**  
**Rauchgastemperaturen ausgewählte Periode**

#### Diagramm 6.3-17, Oberflächentemperaturen ausgewählte Periode

Die Oberflächentemperatur des Heizeinsatzes wurde an 2 Stellen gemessen (TO2 und TO4, siehe Bild 5.4-1). Ein über die Heizfläche gewichteter rechnerischer Mittelwert (TOM) liegt mit einer Spreizung von 80 bis 210 °C auf ähnlichem Niveau wie beim parallelen Betrieb, auch der Kurvenverlauf ist praktisch identisch.

Beim seriellen Betrieb erreichen die Messwertspitzen während des Abbrandes gegenüber dem parallelen Betrieb etwas höhere Temperaturen. Dies ist auf die Vorwärmung der Heizungsluft über das Nachheizregister zurückzuführen.

#### Diagramm 6.3-18, Massentemperaturen ausgewählte Periode

An drei Stellen in der Mitte der Speicherwand des Heizeinsatzes wurde die Massentemperatur gemessen (siehe Bild 5.4-1). Aus diesen drei Messwerten wurde ein gewichteter rechnerischer Mittelwert (TMM) gebildet.

Die Massentemperaturen beim seriellen Betrieb verlaufen praktisch identisch wie beim Parallelbetrieb, d.h. der Speicher erwärmt sich pro Charge im Mittel von ca. 100 auf 250 °C, was eine Temperaturspreizung von 150 °C ergibt.

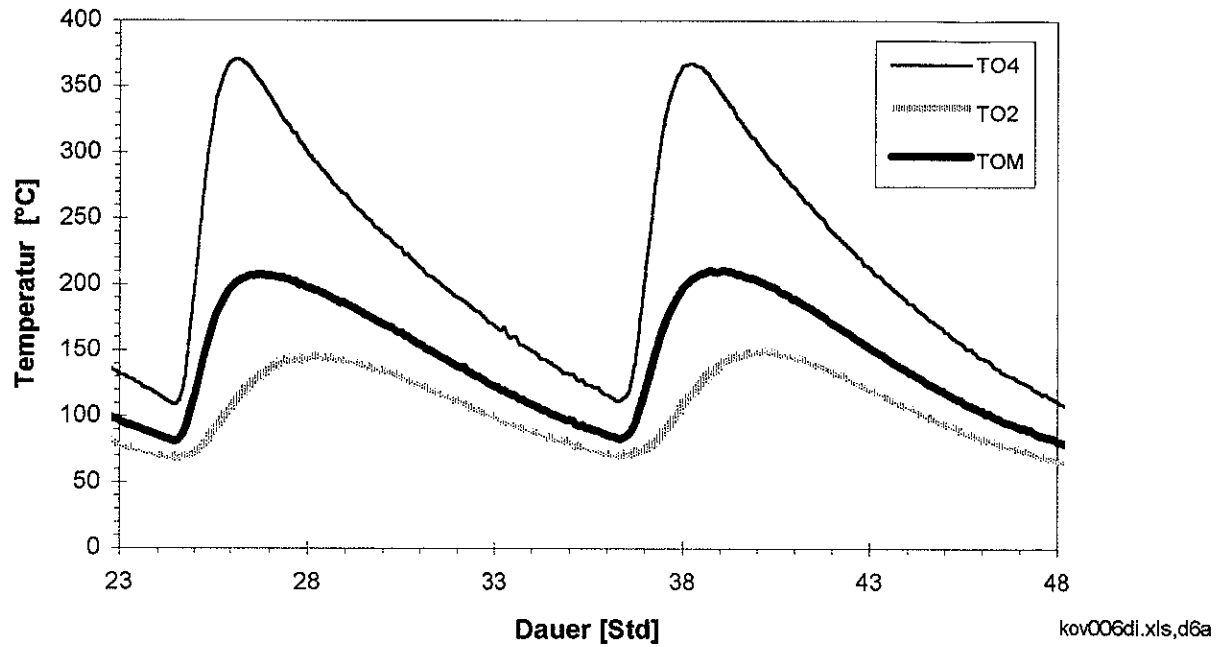


**Diagramm 6.3-17: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serieller Betrieb  
Oberflächentemperatur ausgewählte Periode**

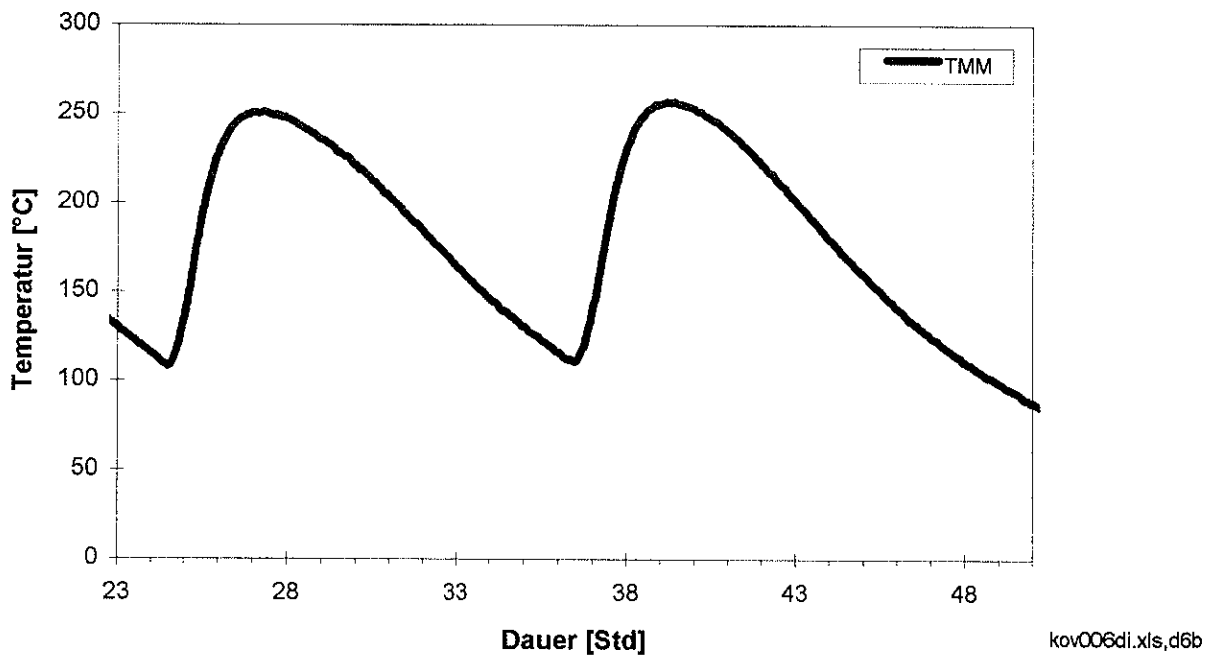


**Diagramm 6.3-18: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serieller Betrieb  
Gemittelte Massentemperatur ausgewählte Periode**

---

## 7. Auswertung, Diskussion

---

Die Auswertung der Versuchsergebnisse liefert Anhaltspunkte für die Dimensionierung der Wärmeerzeugung von Hypokausten-Anlagen. Bei der Interpretation muss beachtet werden, dass sich die Angaben jeweils auf die bei den Versuchen herrschenden baulichen und betrieblichen Randbedingungen beziehen.

### 7.1 Warmluft-Heizeinsatz

Im Sinne der Anforderungen an die Wärmeerzeugung gemäss Kap. 2 wird davon ausgegangen, dass der Warmluft-Heizeinsatz zur Beheizung von Einfamilienhäusern vorteilhaft mit einem keramischen Speicher kombiniert wird. Die Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse beschränkt sich daher schwerpunktmässig auf die Versuchsreihe 6.1.2. In der Tabelle 7.1-1 sind die Mittelwerte der Versuche dargestellt. Sie enthält neben gemessenen Werten auch solche, die daraus rechnerisch abgeleitet wurden.

#### Leistung

Neben  $Q_1$  und  $Q_2$  setzt sich die gesamte Wärmeleistung der Anlage auch noch aus der Leistung des Rauchgas-Verbindungsrohres ( $Q_{vlt}$ ) und der noch nutzbaren Leistung des Rauchgases ( $Q_{rg}$ ) zusammen. Diese, dem Heizeinsatz nachgeschalteten Wärmetauscher, stellen massearme Wärmetauscher dar. Die in kurzer Zeit anfallende grosse Leistung muss für eine spätere kontinuierliche Abgabe mittels einer zusätzlichen Speichermasse zwischengespeichert werden. In der Praxis kann die Leistung des ( $Q_{vlt}$ ) für die Dimensionierung voll berücksichtigt werden. Die Rauchgasleistung mit den bei der Versuchsanordnung noch hohen Rauchgasaustrittstemperaturen ins Kamin wurde auf ein nutzbares mittleres Temperaturniveau von 150 °C umgerechnet.

Die Leistungsangaben gelten unter der Bedingung einer Rauchgas-Ausnutzung bis auf 150 °C!

|                   |       |           | Abbrand Nr. |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
|-------------------|-------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|------------------|
|                   | Einh. | Formel Nr | 24          | 30    | 36    | 48    | 54    | 60    | Mittel über 6 h | Mittel über 12 h | Mittel über 24 h |
| Abbrand-Intervall | h     |           | 6           | 6     | 12    | 6     | 6     | 12    |                 |                  |                  |
| Trg1              | °C    |           | 288         | 312   | 222   | 306   | 327   | 238   | 308             | 230              |                  |
| Trg3              | °C    |           | 218         | 238   | 155   | 234   | 251   | 174   | 235             | 165              |                  |
| Trg4              | °C    |           | 139         | 153   | 95    | 151   | 165   | 106   | 152             | 101              |                  |
|                   |       |           |             |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
| TVL1              | °C    |           | 66          | 80    | 63    | 70    | 80    | 64    | 74              | 64               |                  |
| TVR1              | °C    |           | 22          | 25    | 22    | 23    | 26    | 23    | 24              | 23               |                  |
| TVL2              | °C    |           | 72          | 82    | 54    | 78    | 88    | 59    | 80              | 57               |                  |
| TRL2              | °C    |           | 26          | 30    | 24    | 27    | 31    | 26    | 29              | 25               |                  |
|                   |       |           |             |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
| V1                | m3/h  |           | 162         | 161   | 165   | 161   | 158   | 163   | 161             | 164              | 162              |
| V2                | m3/h  |           | 82          | 53    | 84    | 78    | 61    | 88    | 69              | 86               | 78               |
| Σ V               | m3/h  |           | 244         | 214   | 249   | 239   | 219   | 251   | 230             | 250              | 240              |
|                   |       |           |             |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
| Q1                | W     | 3         | 2401        | 2893  | 2224  | 2532  | 2753  | 2183  | 2645            | 2204             | 2500             |
| Q2                | W     | 4         | 2108        | 2048  | 1159  | 2243  | 2231  | 1369  | 2158            | 1264             | 1860             |
| QVLT              | W     | 5         | 1015        | 989   | 724   | 1174  | 1191  | 739   | 1092            | 731              | 970              |
| Qrg               | W     | 7         | 3149        | 3153  | 1304  | 3495  | 3723  | 1585  | 3380            | 1445             | 2740             |
| QSUMM             | W     | 10        | 8674        | 9083  | 5411  | 9444  | 9897  | 5876  | 9274            | 5643             | 8070             |
| Q Total           | kWh   | 13        | 52.0        | 54.5  | 64.9  | 56.7  | 59.4  | 70.5  | 55.6            | 67.7             |                  |
| Mrg               | kg/s  | 8         | 0.026       | 0.023 | 0.017 | 0.026 | 0.025 | 0.018 | 0.025           | 0.017            |                  |
|                   |       |           |             |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
| ΔT1 (HE)          | °C    | 18        | 48          | 59    | 43    | 51    | 58    | 43    | 54              | 43               | 50               |
| ΔT2 (WT)          | °C    | 19        | 42          | 42    | 22    | 45    | 47    | 27    | 44              | 25               | 38               |
| ΔTvlr             | °C    | 20        | 20          | 20    | 14    | 24    | 25    | 15    | 22              | 14               | 19               |
| ΔTrg              | °C    | 21        | 63          | 65    | 25    | 70    | 78    | 31    | 69              | 28               | 55               |
| Σ ΔT              | °C    | 22        | 173         | 186   | 104   | 190   | 208   | 116   | 189             | 110              | 162              |
|                   |       |           |             |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
| ΔTm               | °C    | 16        | 222         | 268   | 206   | 234   | 255   | 202   | 245             | 204              |                  |
| Masse HE          | kg    |           | 299         | 299   | 299   | 299   | 299   | 299   | 299             | 299              | 299              |
| Masse NHF         | kg    | 26        | 1271        | 1041  | 697   | 1328  | 1262  | 823   | 1219            | 759              | 1065             |
| Masse Total       | kg    |           | 1570        | 1340  | 996   | 1627  | 1561  | 1122  | 1518            | 1058             | 1364             |
|                   |       |           |             |       |       |       |       |       |                 |                  |                  |
| Q theo            | W     | 11        | 7215        | 7558  | 4913  | 7715  | 8014  | 5255  | 7630            | 5086             | 6782             |
| ΔT theo           | °C    | 24        | 114         | 140   | 70    | 127   | 149   | 75    | 132             | 72               | 112              |
| TVL theo          | °C    | 25        | 138         | 168   | 93    | 152   | 177   | 97    | 159             | 96               | 138              |

**Tabelle 7.1-1 Zusammenstellung Versuch 6.1.2 Warmluft-Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher. Mittelwerte über die jeweilige Abbranddauer**

Die Leistungs-Mittelwerte über 6 Stunden sind hohe Werte, die bei der Dimensionierung zur Abdeckung von Bedarfsspitzen beigezogen werden können. Realistische und für die Planung brauchbare Daten sind die Mittelwerte über 24 Stunden mit den Füllintervallen 6 / 6 / 12 Std. und die 12 Stunden-Werte bei 2-maligem Nachlegen pro Tag.

Der Warmlufteinsatz erbringt in Kombination mit einem nachgeschalteten Speicher, bei einem durchgehenden Beschickungsintervall von 6 Stunden, eine durchschnittliche Leistung von ca. 9 kW. Diese kurzen Füllintervalle dürften nur an den wenigen sehr kalten Tagen zumutbar sein und sollten nicht als Basis für die Dimensionierung dienen. Bei einem Füllintervall von 12 Std. liegt die Leistung bei ca. 5.6 kW. Zu Dimensionierungszwecken kann eine maximale Leistung von 8 kW angenommen werden. Diese basiert auf Füllintervallen von 6 / 6 / 12 Stunden, die in einem tagsüber bewohnten Haus noch zumutbar sind. Die Holzmenge beträgt 15 kg Hartholz pro Charge, die Abbrandzeit ca. 1 1/2 Stunden.

Die angegebenen Leistungen werden bei einer Rauchgas-Kamineintrittstemperatur von 150 °C erreicht, was bei den heutigen Kaminkonstruktionen zulässig ist. Voraussetzungen für eine Nutzung der gesamten Leistung sind eine optimale konstruktive Ausbildung der Wärmeerzeugungsanlage und richtig dimensionierte Nachheizflächen.

Bei den Leistungsangaben ist die Wärmeabgabe über die Heizfront des Heizeinsatzes nicht berücksichtigt, da diese je nach Fabrikat sehr verschieden ausfallen kann. Beim untersuchten Modell beträgt sie im Mittel über das Füllintervall ca. 200 W und ist damit annähernd vernachlässigbar.

Kurze Füllintervalle von 6 Stunden über längere Zeit hinweg können bei Aggregaten, die mit einer elektronischen Steuerung versehen sind, zu Problemen führen. Da beim Verfeuern von Hartholz das Glutbett nicht genügend abgebaut wird, kann die zur Erbringung der notwendigen Leistung benötigte Holzmenge nach mehreren Chargen nicht mehr nachgelegt werden.

## **Heizungsluft-Temperaturen**

Bei einer Heizungsluftführung in Serie, d.h. die Luft wird im Gegenstromprinzip durch die einzelnen Wärmetauscher geführt, ergibt sich bei einem Volumenstrom von 160 m<sup>3</sup>/h im 24 h-Intervall ein  $\Delta T$  160 °C, beim 12 h-Intervall eines von 110 °C. Für einen Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h lauten die entsprechenden Werte 110 °C beim 24 h-, resp. 70 °C beim 12h-Intervall.

## **Speichermasse Nachheizfläche**

Die gemessene Temperaturspreizung ( $\Delta T_m$ ) des Warmluft-Heizeinsatzes zwischen Aufheizen und Entladung (Wärmeabgabe) beträgt ca. 200°C.

Tabelle 7.1-1 enthält auch beispielhaft eine Speicherdimensionierung. Diese wurde auf der Basis der gemessenen Temperaturspreizung mit den im Ofenbau üblichen Dimensionierungs-Richtlinien ermittelt. Da diese nicht für die konkreten Bedingungen bei der Wärmeerzeugung für Hypokausten-Anlagen aufgestellt wurden, sind die Angaben als theoretische erste Näherung für die Praxis zu betrachten. Bei den Nachheizflächen ist demzufolge eine Speichermasse von ca. 800 - 1000 kg, bei einer durchschnittlichen Wandstärke von 6 - 8 cm anzustreben.

## **Einfluss verschiedener Volumenströme**

Mit dem Versuchsaufbau 5.2.2 (Warmluft-Heizeinsatz mit massearmem Wärmetauscher) wurde auch beispielhaft der Einfluss eines Betriebes mit verschiedenen Heizungsluft-Volumenströmen untersucht. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen 7.1-1 (Leistung), 7.1-2 (Heizungslufttemperaturen) und in der Tabelle 7.1-2 dargestellt.

Unterschiedliche Luftvolumenströme haben auf die Leistung des Aggregates ( $Q_1$ ) keinen wesentlichen Einfluss. Die Gesamtleistung ( $Q_{\text{sum}}$ ) ist bei grösseren Volumenströmen entsprechend der Veränderung der Wärmeübergangszahl etwas höher. Für die Praxis bedeutet das,

dass es grundsätzlich keine wesentlichen Leistungsunterschiede zwischen einem Betrieb mit Ventilator und mit Schwerkraft gibt. Bei Schwerkraftanlagen muss allenfalls berücksichtigt werden, dass die Luftführung nicht im Gegenstromprinzip erfolgen kann. Im weiteren sehen wir, dass bei kleinen Volumenströmen entsprechend höhere Lufterwärmungen und Vorlaufteremperaturen resultieren, wie man es bei Schwerkraftanlagen antrifft.

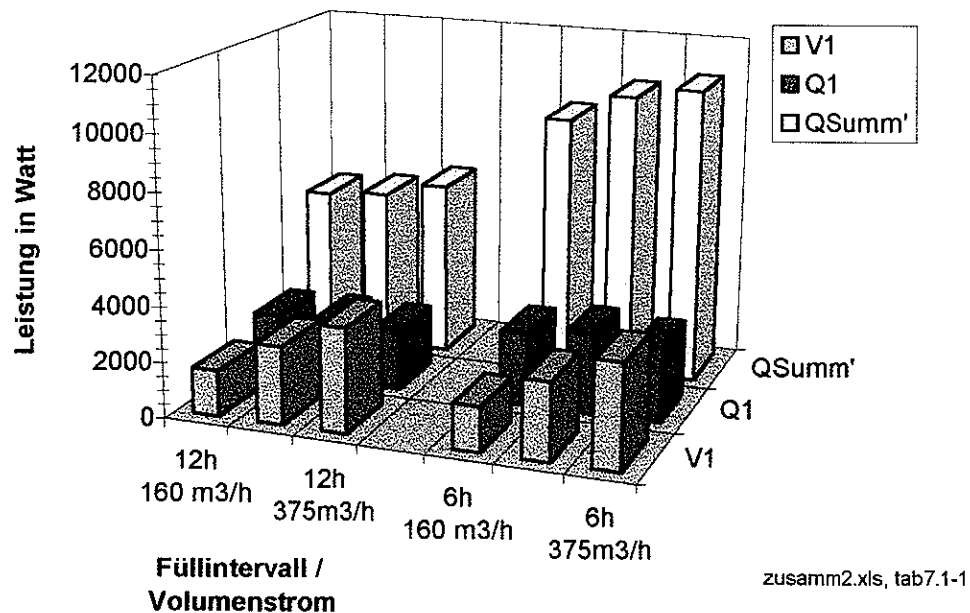


**Diagramm 7.1-1 Vergleich Leistung Warmlufteinsatz bei verschiedenen Volumenströmen und Füllintervallen**

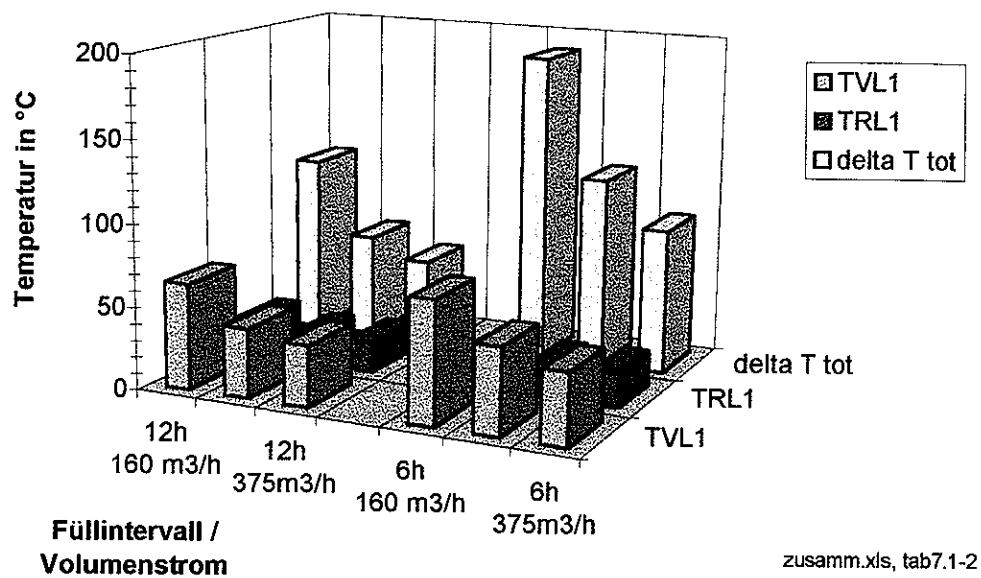


**Diagramm 7.1-2 Vergleich Heizungslufttemperaturen Warmluftheizeinsatz bei verschiedenen Volumenströmen und Füllintervallen**

|                   |       | Warmlufteinsatz |          |          |  | Wamlufteinsatz |          |          |
|-------------------|-------|-----------------|----------|----------|--|----------------|----------|----------|
|                   | Einh. | 160 m3/h        | 280 m3/h | 375 m3/h |  | 160 m3/h       | 280 m3/h | 375 m3/h |
| Abbrand-Intervall | h     | 12 h            | 12 h     | 12 h     |  | 6 h            | 6 h      | 6 h      |
| Trg 1             | °C    | 230             | 213      | 200      |  | 308            | 294      | 281      |
| Trg3              | °C    | 165             | 149      | 153      |  | 235            | 213      | 221      |
| Trg4              | °C    | 101             | 76       | 78       |  | 152            | 121      | 120      |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| TVL1              | °C    | 64              | 42       | 37       |  | 74             | 52       | 43       |
| TRL1              | °C    | 23              | 18       | 19       |  | 24             | 20       | 21       |
| TVL2              | °C    | 57              | 39       | 37       |  | 80             | 56       | 52       |
| TRL2              | °C    | 25              | 20       | 20       |  | 29             | 22       | 23       |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| V1                | m3/h  | 164             | 281      | 375      |  | 161            | 278      | 374      |
| V2                | m3/h  | 86              |          |          |  | 69             |          |          |
| ΣV                | m3/h  | 250             | 281      | 375      |  | 230            | 278      | 374      |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| Q1                | W     | 2204            | 2259     | 2182     |  | 2645           | 2924     | 2746     |
| Q2                | W     | 1264            | 1485     | 1800     |  | 2158           | 2634     | 3157     |
| QVLT              | W     | 731             | 893      | 906      |  | 1092           | 1646     | 1413     |
| Qrg               | W     | 1445            | 1190     | 1458     |  | 3380           | 3075     | 3367     |
| QSumm             | W     | 5644            | 5827     | 6346     |  | 9275           | 10279    | 10683    |
| Q Total'          | kWh   | 67.7            | 69.9     | 76.2     |  | 55.7           | 61.7     | 64.1     |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| delta T1          | °C    | 43              | 25       | 18       |  | 54             | 33       | 23       |
| delta T2          | °C    | 25              | 16       | 15       |  | 44             | 30       | 26       |
| delta Tvlt        | °C    | 14              | 10       | 7        |  | 22             | 19       | 12       |
| delta Trg         | °C    | 28              | 13       | 12       |  | 69             | 35       | 28       |
| Σ deltaT          | °C    | 111             | 64       | 52       |  | 188            | 116      | 88       |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| DeltaTm           | °C    | 204             | 209      | 202      |  | 122            | 135      | 127      |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| Masse HE          | kg    | 299             | 299      | 299      |  | 299            | 299      | 299      |
| Masse NHF         | kg    | 759             | 768      | 928      |  | 1219           | 1223     | 1406     |
| Masse Total       | kg    | 1058            | 1067     | 1227     |  | 1518           | 1522     | 1705     |
|                   |       |                 |          |          |  |                |          |          |
| Qtheo             | W     | 5085            | 5468     | 6010     |  | 7636           | 9050     | 9634     |
| delta T theo      | °C    | 73              | 64       | 52       |  | 132            | 116      | 88       |
| TVL theo          | °C    | 97              | 83       | 71       |  | 158            | 137      | 110      |

**Tabelle 7.1-2 Gegenüberstellung Warmluft-Heizeinsatz bei verschiedenen Volumenströmen und Heizintervallen**

## 7.2 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer

### Leistung

Neben Q1 und Q2 setzt sich die gesamte Wärmeleistung der Anlage auch noch aus der Leistung des Rauchgas-Verbindungsrohres ( $Q_{vlt}$ ) und der noch nutzbaren Leistung des Rauchgases ( $Q_{rg}$ ) zusammen. Die dem Heizeinsatz nachgeschalteten Wärmetauscher stellen massearme Wärmetauscher dar. Die während der Abbranddauer anfallende grosse Leistung muss für eine spätere kontinuierliche Abgabe mittels einer zusätzlichen Speichermasse zwischengespeichert werden. In der Praxis kann die Leistung des ( $Q_{vlt}$ ) für die Dimensionierung voll berücksichtigt werden. Die Rauchgasleistung mit den bei den Versuchen noch hohen kaminseitigen Rauchgasaustrittstemperaturen wurde auf ein nutzbares mittleres Temperaturniveau von 150°C umgerechnet. Da diese Anlage mit einem Ventilator betrieben werden muss, kann problemlos mit diesen niedrigen Rauchgasaustrittstemperaturen gerechnet werden. Mit dem grossen Füllvolumen von 35 kg und einer speziellen Feuerraumkonstruktion erreicht man eine relativ lange Abbranddauer von ca. 4 Stunden und eine grosse durchschnittliche Heizleistung von ca. 12 kW

Mit der Anordnung eines Feststoff-Speichers werden die in den Messergebnissen dargestellten Energiespitzen während der Anheiz- und Abbrandphase reduziert. Das Rauchgas-Verbindungsrohr kann bei entsprechender Ausbildung als Schnellerhitzer während dieser Zeit dienen. Bei den Leistungsangaben ist die Energieabgabe über die Heizfront nicht berücksichtigt. Bei diesem Ofentyp kann dafür mit Wärmeleistung von ca. 500 W im Mittel über das Füllintervall gerechnet werden.

### Heizungsluft-Temperaturen

Bei einer Heizungsluftführung in Serie, d.h. die Luft wird im Gegenstromprinzip durch die einzelnen Wärmetauscher geführt, ergibt sich bei einem Volumenstrom von 393 m<sup>3</sup>/h ein  $\Delta T$  von 106 °C. Mit dem Volumenstrom von 628 m<sup>3</sup>/h resultiert daraus ein rechnerisches  $\Delta T$  von 66 °C.

## **Speichermasse Nachheizfläche**

Die gemessene Temperaturspreizung ( $\Delta T_m$ ) des Heizeinsatzes zwischen Aufheizen und Entladung (Wärmeabgabe) beträgt ca. 200 °C.

Um die grosse Energiemenge abspeichern zu können, muss eine entsprechend grosse Speichermasse erstellt werden. Tabelle 7.2-1 enthält auch beispielhaft eine Speicherdimensionierung. Diese wurde auf der Basis der gemessenen Temperaturspreizung mit den im Ofenbau üblichen Dimensionierungs-Richtlinien ermittelt. Da diese nicht für die konkreten Bedingungen bei der Wärmeerzeugung für Hypokausten-Anlagen aufgestellt wurden, sind die Angaben als erste Näherung für die Praxis zu betrachten. Für die keramische Nachheizfläche (Feststoff-Speicher) ist demzufolge eine Speichermasse von ca. 2100 -2400 kg bei einer durchschnittlichen Wandstärke von 8 cm anzustreben.

|                      |          | Formel<br>Nr | Abbrandstunde / Beginn |          |          |          |          | Mittel<br>über<br>12 h |
|----------------------|----------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
|                      |          |              | 24<br>0                | 30<br>12 | 36<br>24 | 48<br>36 | 54<br>60 |                        |
| Abbrand<br>intervall | h        |              | 12                     | 12       | 12       | 12       | 12       |                        |
| Trg 1                | °C       |              | 479                    | 505      | 473      | 528      | 449      | 487                    |
| Trg3                 | °C       |              | 279                    | 307      | 285      | 317      | 278      | 293                    |
| Trg4                 | °C       |              | 158                    | 175      | 164      | 184      | 171      | 170                    |
|                      |          |              |                        |          |          |          |          |                        |
| TVL1                 | °C       |              | 51                     | 63       | 64       | 65       | 55       | 60                     |
| TRL1                 | °C       |              | 33                     | 40       | 40       | 41       | 38       | 38                     |
| TVL2                 | °C       |              | 68                     | 82       | 78       | 86       | 78       | 78                     |
| TRL2                 | °C       |              | 35                     | 41       | 41       | 43       | 39       | 40                     |
|                      |          |              |                        |          |          |          |          |                        |
| V1                   | m3<br>/h |              | 393                    | 393      | 394      | 394      | 391      | 393                    |
| V2                   | m3<br>/h |              | 236                    | 234      | 235      | 236      | 235      | 235                    |
| ΣV                   | m3<br>/h |              | 629                    | 627      | 629      | 630      | 626      | 628                    |
|                      |          |              |                        |          |          |          |          |                        |
| Q1                   | W        | 3            | 2134                   | 2909     | 2932     | 2950     | 2120     | 2609                   |
| Q2                   | W        | 4            | 2635                   | 3069     | 2746     | 3293     | 2994     | 2947                   |
| QVLT                 | W        | 5            | 2686                   | 3557     | 3163     | 3738     | 3228     | 3274                   |
| Qrg                  | W        | 7            | 3372                   | 3789     | 3629     | 4207     | 4378     | 3875                   |
| QSumm'               | W        | 10           | 10827                  | 13324    | 12470    | 14188    | 12720    | 12705                  |
| Q Total'             | kW<br>h  | 13           | 126                    | 160      | 150      | 170      | 153      | 152                    |
| Mrg                  | kg/<br>s | 8            | 0.0227                 | 0.0242   | 0.0256   | 0.025    | 0.027    | 0.024                  |
|                      |          |              |                        |          |          |          |          |                        |
| ΔT1 (HE)             | °C       | 18           | 17                     | 24       | 25       | 25       | 18       | 22                     |
| ΔT2 (WT)             | °C       | 19           | 21                     | 26       | 23       | 28       | 25       | 25                     |
| ΔTvl                 | °C       | 20           | 22                     | 30       | 26       | 31       | 27       | 27                     |
| ΔTrg'                | °C       | 21           | 27                     | 32       | 30       | 35       | 36       | 32                     |
| Σ ΔT                 | °C       | 22           | 87                     | 112      | 104      | 119      | 105      | 106                    |
|                      |          |              |                        |          |          |          |          |                        |
| ΔTm                  | °C       | 16           | 148                    | 201      | 203      | 204      | 147      | 201                    |
| Masse HE             | kg       |              | 650                    | 650      | 650      | 650      | 650      | 650                    |
| Masse NHF            | kg       | 26           | 2648                   | 2327     | 2114     | 2476     | 3250     | 2563                   |
| Masse Total          | kg       |              | 3298                   | 2977     | 2764     | 3126     | 3900     | 3213                   |
|                      |          |              |                        |          |          |          |          |                        |
| Q theo               | kW       | 11           | 9.7                    | 11.7     | 11.1     | 12.4     | 11.2     | 11.2                   |
| ΔT theo              | °C       | 24           | 55                     | 70       | 65       | 74       | 66       | 66                     |
| TVL theo             | °C       | 25           | 89                     | 111      | 106      | 116      | 105      | 104                    |

**Tabelle 7.2-1 Zusammenstellung Versuch 6.2 Kachelofen-Heizeinsatz mit langer Brenndauer**  
Mittelwerte über die jeweilige Abbranddauer

### **7.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise**

Dieser Versuchsaufbau entspricht einer individuell gefertigten hafnermässigen Bauweise mit einem kompakten Speicherblock aus dem Brennraum und den angebauten keramischen Zügen, sowie einer nachgeschalteten Stahl-Nachheizfläche. Speicherblock und Nachheizfläche wurden in getrennten Kammern angeordnet. Es wurden zwei Arten von Heizungsluft-Führung untersucht: Parallele und serielle Luftführung über die Kammern.

#### **Leistung**

##### **a) Paralleler Betrieb**

Die gesamte Wärmeleistung setzt sich aus den beiden Heizleistungen  $Q_1$  und  $Q_2$  zusammen. Die durchschnittliche Heizleistung bei einer Holzmenge von 22 kg Holz pro Füllung und einem Heizintervall von 12 Stunden beträgt ca. 5.7 kW. Um die Leistung über eine kurze Periode während extrem kalter Tagen zu erhöhen, kann 3 mal täglich in einem Intervall von 8 Stunden gefeuert werden. So erhält man eine Heizleistung von 8 - 9 kW. Bei den Leistungsangaben ist die Leistung der Heizfront vernachlässigbar, da diese bei den Versuchen gut wärmegedämmt war, was auch der Bauweise in der Praxis entspricht.

##### **b) Serieller Betrieb**

Die Wärmeleistung im seriellen Betrieb ist gegenüber dem Parallelbetrieb höher. Sie beträgt bei einem Heizintervall von 12 Stunden ca. 7 kW. Die grössere Leistung ist auf das Gegenstromprinzip Luft/Rauchgase zurückzuführen, wobei die Rauchgase wesentlich tiefer abgekühlt werden und sich ein entsprechend höherer Wirkungsgrad ergibt. Zum Vergleich: Im Parallelbetrieb erreicht die Rauchgas-Austrittstemperatur TRG3 während des Abbrandes Werte von ca. 320 °C, beim seriellen Betrieb solche von ca. 170 °C.

Das Kachelofen-Berechnungsprogramm basiert auf einem Wirkungsgrad von 78 %, was einer mittleren Rauchgas-Kamineintrittstemperatur während des Abbrandes von 240 °C entspricht. Unter Berücksichtigung der effektiv gemessenen Rauchgastemperaturen stimmen die erhaltenen Leistungsdaten recht gut mit der theoretischen Berechnung des Kachelofens überein, was

für die Praxis eine sehr gute Hilfestellung ist. Das Berechnungsprogramm gibt somit nicht nur in Bezug auf Emissionen und Wirkungsgrad, sondern auch in Bezug auf die Leistung verlässliche Werte an.

### **Heizungsluft-Temperaturen**

Im 12-Stunden-Intervall mit einem Volumenstrom von ca. 500 m<sup>3</sup>/h stellt sich beim parallelen Betrieb ein mittleres  $\Delta T$  von 40 °C, beim seriellen Betrieb und gleichem Volumenstrom ein solches von 46 °C ein. Der Unterschied ist v.a. darauf zurückzuführen, dass beim parallelen Betrieb nach dem Abbrand immer noch ein unveränderter Teil des Volumenstroms über die Stahl-Nachheizfläche geführt wird, obschon keine Leistung mehr abgegeben werden kann. Die kältere Luft aus der Nachheizflächen-Kammer mischt die warme Luft des Heizeinsatzteils auf ein tieferes Temperaturniveau. Beim seriellen Betrieb strömt die ganze Luftmenge zuerst durch die Nachheizkammer und nachher durch die Kammer des Heizeinsatzes. Dadurch wird die anfänglich hohe Temperaturspitze der Nachschaltheizfläche gedämpft, d.h. im Speicherteil zwischengespeichert und nach dem Abbrand wieder abgegeben. Die Heizungslufttemperatur verläuft somit ausgeglichener und auf einem etwas höheren Temperaturniveau.

Im parallelen Betrieb bei einem Heizintervall von 8 Stunden und einem Volumenstrom von 630 m<sup>3</sup>/h stellt sich ein  $\Delta T$  von 44 °C ein. Die Rücklauftemperatur liegt gegenüber den anderen Versuchen um ca. 10 °C höher, was sich auch auf eine entsprechend höhere Vorlauftemperatur auswirkt.

### **Speichermasse Nachheizfläche**

Beim parallelen und seriellen Betrieb weisen die Messungen eine Spreizung von ca. 150 °C auf, wobei zu berücksichtigen ist, dass es sich um einen gewichteten Mittelwert aus drei Messpunkten handelt. Rechnerisch ergibt sich im parallelen Betrieb eine Spreizung von 209 °C für den Heizeinsatz mit einer Masse von 950 kg. Soll auch Q<sub>2</sub> abgespeichert werden, so erhält man rechnerisch bei einer Spreizung von 200 °C eine Masse von zusätzlich ca. 700 kg für eine keramische Nachheizfläche anstelle der schnellen Stahl-Nachheizfläche.

|                  |      | Formel | Abbrandstunde/ Beginn |        |        |        | i.M. über<br>12h |
|------------------|------|--------|-----------------------|--------|--------|--------|------------------|
|                  |      | Nr.    | 12                    | 24     | 36     | 48     |                  |
| Abbrandintervall | h    |        | 12.00                 | 12.00  | 12.00  | 12.00  |                  |
| Trg1             | °C   |        | 216                   | 222    | 221    | 224    | 221              |
| Trg3             | °C   |        | 104                   | 104    | 88     | 95     | 96               |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                  |
| TVL1             | °C   |        | 92                    | 97     | 98     | 102    | 98               |
| TRL1             | °C   |        | 40                    | 42     | 41     | 44     | 42               |
| TVL2             | °C   |        | 58                    | 60     | 57     | 61     | 59               |
| TRL2             | °C   |        | 40                    | 42     | 42     | 44     | 42               |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                  |
| V1               | m3/h |        | 247                   | 248    | 253    | 252    | 250              |
| V2               | m3/h |        | 247                   | 247    | 242    | 242    | 245              |
| Σ V              | m3/h |        | 494                   | 495    | 495    | 494    | 495              |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                  |
| Q1 (HE)          | W    | 3      | 4062                  | 4313   | 4500   | 4550   | 4407             |
| Q2 (WT)          | W    | 4      | 1378                  | 1367   | 1162   | 1247   | 1265             |
| QSUMM            | W    | 10     | 5440                  | 5680   | 5662   | 5797   | 5671             |
| Q Total          | kWh  | 13     | 65.3                  | 68.2   | 67.9   | 69.6   | 68.0             |
| Mrg              | kg/s |        | 0.0123                | 0.0116 | 0.0088 | 0.0096 | 0.0102           |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                  |
| ΔT1 (HE)         | °C   | 17     | 57                    | 60     | 62     | 63     | 61               |
| ΔT2 (WT)         | °C   | 19     | 19                    | 19     | 16     | 17     | 18               |
| Σ ΔT             | °C   | 22     | 76                    | 79     | 78     | 78     | 79               |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                  |
| ΔTm              | °C   | 16     | 192                   | 204    | 213    | 216    | 209              |
| Masse HE         | kg   |        | 950                   | 950    | 950    | 950    | 950              |
| Masse NHF        | kg   | 26     | 819                   | 773    | 672    | 695    | 723              |
| Masse Total      | kg   |        | 1769                  | 1723   | 1622   | 1645   | 1673             |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                  |
| Q theo           | W    | 11     | 5256                  | 5439   | 5365   | 5390   | 5402             |
| ΔT theo          | °C   | 24     | 38                    | 40     | 39     | 41     | 40               |
| TVL theo         | °C   | 25     | 78                    | 82     | 81     | 85     | 81               |

**Tabelle 7.3-1 Zusammenstellung Versuch 6.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb, 12 Std. Intervall, Mittelwerte über die jeweilige Abbranddauer**

|                  |      | Formel | Abbrandstunde/ Beginn |        |        |        | i.M. über<br>8h |
|------------------|------|--------|-----------------------|--------|--------|--------|-----------------|
|                  |      | Nr.    | 24                    | 32     | 40     | 48     |                 |
| Abbrandintervall | h    |        | 8.00                  | 8.00   | 8.00   | 8.00   |                 |
| Trg1             | °C   |        | 272                   | 272    | 277    | 293    | 278             |
| Trg3             | °C   |        | 118                   | 129    | 124    | 131    | 125             |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                 |
| TVL1             | °C   |        | 108                   | 107    | 106    | 112    | 108             |
| TRL1             | °C   |        | 55                    | 55     | 54     | 57     | 55              |
| TVL2             | °C   |        | 76                    | 80     | 78     | 82     | 79              |
| TRL2             | °C   |        | 55                    | 55     | 54     | 57     | 55              |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                 |
| V1               | m3/h |        | 452                   | 452    | 454    | 448    | 452             |
| V2               | m3/h |        | 235                   | 235    | 234    | 234    | 234             |
| Σ V              | m3/h |        | 687                   | 687    | 688    | 682    | 686             |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                 |
| Q1 (HE)          | W    | 3      | 7221                  | 6995   | 7038   | 7300   | 7138            |
| Q2 (WT)          | W    | 4      | 1507                  | 1712   | 1660   | 1770   | 1661            |
| QSUMM            | W    | 10     | 8728                  | 8707   | 8698   | 9070   | 8799            |
| Q Total          | kWh  | 13     | 69.8                  | 69.6   | 69.6   | 72.6   | 70.4            |
| Mrg              | kg/s |        | 0.0163                | 0.0164 | 0.0165 | 0.0164 | 0.0164          |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                 |
| ΔT1 (HE)         | °C   | 17     | 53                    | 52     | 52     | 55     | 53              |
| ΔT2 (WT)         | °C   | 19     | 11                    | 13     | 13     | 14     | 13              |
| Σ ΔT             | °C   | 22     | 64                    | 65     | 65     | 69     | 66              |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                 |
| ΔTm              | °C   | 16     | 334                   | 331    | 334    | 346    | 338             |
| Masse HE         | kg   |        | 950                   | 950    | 950    | 950    | 950             |
| Masse NHF        | kg   | 26     | 198                   | 230    | 224    | 230    | 221             |
| Masse Total      | kg   |        | 1149                  | 1180   | 1174   | 1180   | 1171            |
|                  |      |        |                       |        |        |        |                 |
| Q theo           | W    | 11     | 8064                  | 8190   | 8255   | 8556   | 8316            |
| ΔT theo          | °C   | 24     | 43                    | 44     | 44     | 46     | 44              |
| TVL theo         | °C   | 25     | 98                    | 99     | 98     | 103    | 99              |

**Tabelle 7.3-2 Zusammenstellung Versuch 6.3.2 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb 8 Std. Intervall, Mittelwerte über die jeweilige Abbranddauer**

Im seriellen Betrieb wird die ganze Energiemenge inkl. derjenigen aus der Nachheizfläche in der Masse des Heizeinsatzes gespeichert, was zu einer theoretischen Spreizung ( $\Delta T_m$ ) von ca. 340 °C führt. Die Messungen zeigen aber auf, dass sich der Heizeinsatz nicht entsprechend stärker aufheizt. Durch eine Vergrößerung der Speichermasse kann die Spreizung auf einen praxisgerechten Wert reduziert werden, was auch zur Folge hat, dass die Leistungskurve noch mehr gedämpft wird, d.h. gleichmässiger über 12 Stunden verläuft. Die theoretisch ermittelte Masse der Nachheizfläche müsste derjenigen des parallelen Betriebes entsprechen.

Ob für die ganze Leistung Q2 ein zusätzlicher Speicher vorgesehen oder ob wie bei der Versuchsanstallation der Schnellerhitzer eingesetzt werden soll, ist von der Anlagencharakteristik des Hauses abhängig.

|                  |      | Formel | Abbrandstunde/ Beginn |       |       |           |
|------------------|------|--------|-----------------------|-------|-------|-----------|
|                  |      | Nr.    | 12                    | 24    | 36    | i.M. über |
| Abbrandintervall | h    |        | 12.00                 | 12.00 | 12.00 | 12h       |
| Trg1             | °C   |        | 208                   | 205   | 207   | 207       |
| Trg3             | °C   |        |                       |       |       |           |
|                  |      |        |                       |       |       |           |
| TVL1             | °C   |        | 88                    | 87    | 88    | 88        |
| TRL1             | °C   |        | 42                    | 42    | 42    | 42        |
|                  |      |        |                       |       |       |           |
| V1               | m3/h |        | 504                   | 501   | 501   | 502       |
|                  |      |        |                       |       |       |           |
| QSUMM            | W    | 10     | 7215                  | 7132  | 7186  | 7177      |
| Q Total          | kWh  | 13     | 86.6                  | 85.6  | 86.2  | 86.1      |
|                  |      |        |                       |       |       |           |
| $\Delta T$       | °C   |        | 46                    | 45    | 46    | 46        |
|                  |      |        |                       |       |       |           |
| $\Delta T_m$     | °C   | 16     | 340                   | 337   | 340   | 340       |
| Masse Total      | kg   |        | 1000                  | 1000  | 1000  | 1000      |

**Tabelle 7.3-3 Zusammenstellung Versuch 6.3.3 Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, serieller Betrieb 12 Std. Intervall, Mittelwerte über die jeweilige Abbranddauer**

## Ausschalten des Ventilators

Mit dem Ausschalten des Ventilators über eine gewisse Zeit kann eine verzögerte Wärmeabgabe erreicht werden. So kann der Ventilator z.B. bei starkem Sonneneinfall während des Tages über einen Thermostaten gesteuert, ein- und ausgeschaltet werden. Mit der momentan grossen Leistung beim Wiedereinschalten des Ventilators kann die gesamte Anlage rasch wieder auf Betriebstemperatur gebracht werden. Wichtig ist bei einem solchen Betrieb, dass die Verbrenungsluftzufuhr nach dem Abbrand verlässlich unterbrochen wird, z.B. mit einer Automatik, um eine innere Auskühlung der Speichermasse über die Rauchgaswege zu verhindern.

Das Ausschalten des Ventilators ist auch auf den Diagrammen mit den Oberflächen und Massentemperaturen ersichtlich. Die Wärmeabgabe wird gestoppt, die Lufttemperatur im Luftspalt erhöht sich im Ruhezustand, und die Wärme kann länger gespeichert werden.

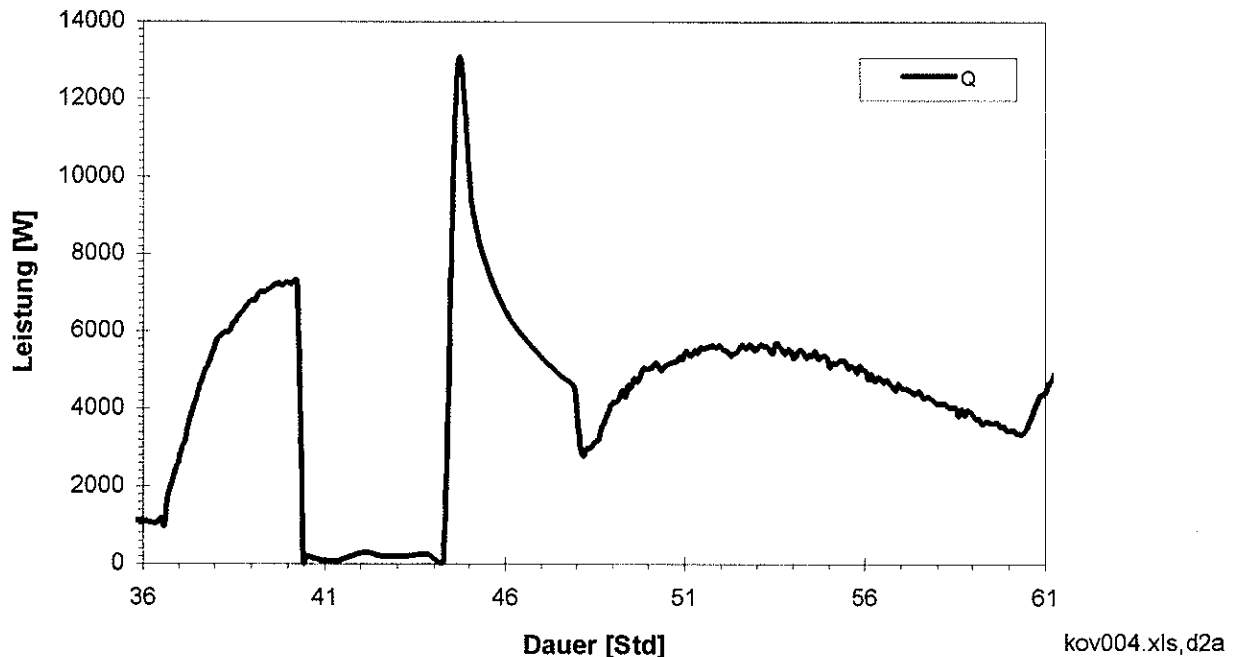
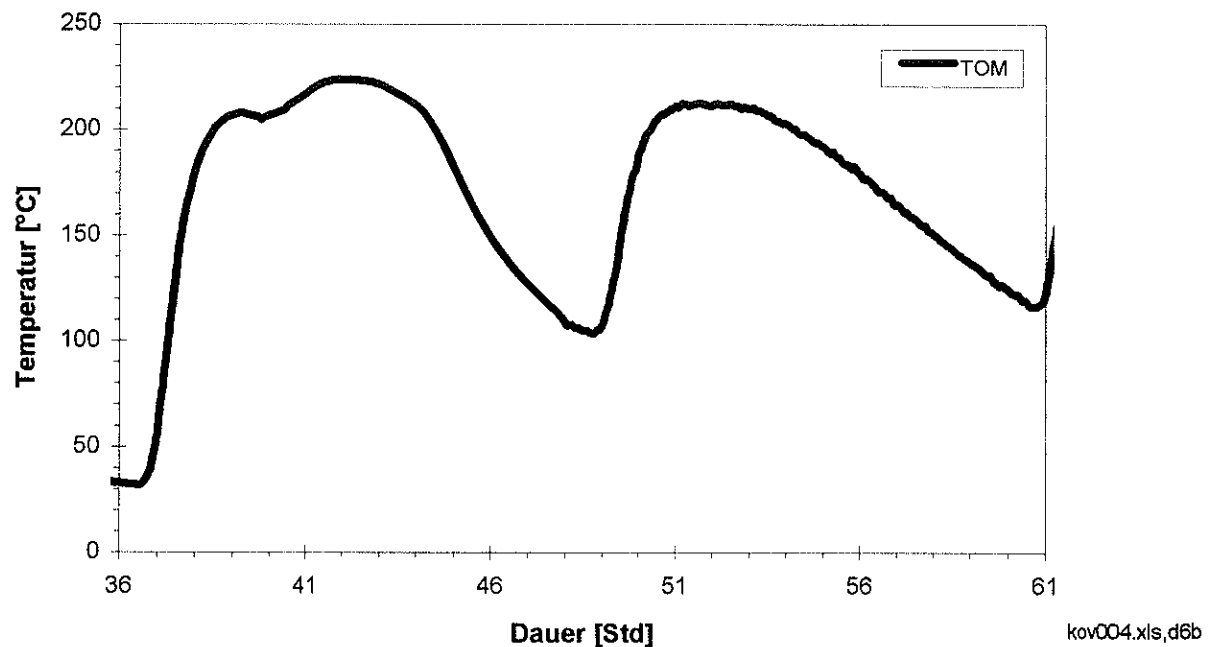
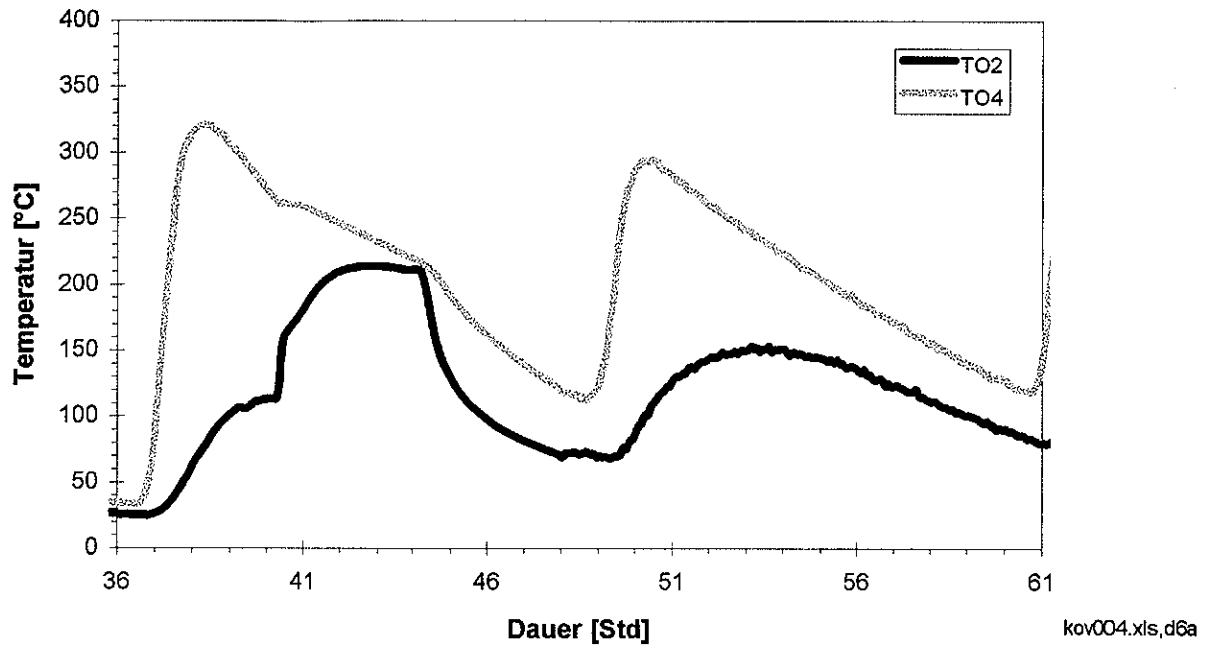


**Diagramm 7.3-1: Kachelofen-Heizeinsatz in Speicherbauweise, paralleler Betrieb**  
**Auswirkung Ventilatorunterbruch auf die Leistung**



---

## 8. Schlussfolgerungen, Ausblick

---

Mit der vorliegenden Untersuchung stehen jetzt die Leistungsdaten von drei charakteristischen, im Ofenbau üblichen Bauweisen von Hypokausten-Wärmeerzeugungsanlagen für Dimensionierungszwecke zur Verfügung. Die Ergebnisse der ausgewählten Heizeinsätze sind repräsentativ für weitere ähnliche Produkte und können auch auf diese umgesetzt werden. Die für die Planung von Hypokausten-Anlagen wichtigen Einflussgrößen wie Heizungslufttemperatur und Temperaturspreizung bei Feststoffspeichern werden angegeben und in Zusammenhang mit Betriebsbedingungen wie dem Heizungsluft-Volumenstrom und dem Heizintervall gesetzt.

Eine wichtige Erkenntnis stellt die Tatsache dar, dass auch individuell gefertigte, auf die jeweiligen Bedürfnisse hin dimensionierte Heizeinsätze in traditioneller Bauart bezüglich Heizungsleistung, Temperaturniveau und Emmissionen durchaus mit vorgefertigten Produkten verglichen werden können. Sie bieten zudem die Möglichkeit von integrierten Speichermassen, was zu einer kompakten Bauweise mit entsprechend gut kontrollierbarer Luftführung führt. Mit dem Berechnungsprogramm des Österreichischen Kachelofenverbandes, das auch in einer für Schweizer Verhältnisse adaptierten Version verfügbar ist, wurde eine sichere Dimensionierungsgrundlage geschaffen, deren Angaben mit den Versuchen bestätigt werden konnten.

Es zeigte sich, dass für holzbetriebene Hypokausten-Heizungen mit den heute verfügbaren Heizeinsätzen die Dimensionierung und Bewirtschaftung der Feststoff-Speicher von ausschlaggebender Bedeutung ist. Die Messungen ergaben, dass im 12-Stunden Heizrhythmus bei allen Aggregaten eine nutzbare Temperaturspreizung von ca. 200 °C als Ausgangsgrösse für die Speicherdimensionierung zugrundegelegt werden kann.

Für die bauliche Ausbildung der Anlagen konnten wichtige Angaben über die Auswirkung verschiedener Arten der Luftführung gemacht werden. Die Effizienz einer seriellen Luftführung für die Wärmeausnutzung konnte durch Versuche belegt werden. Der Planer wird im Einzelfall aufgrund der baulichen Möglichkeiten entscheiden, welche Luftführung er ausführen kann, und seine Dimensionierung mit den entsprechenden Leistungsdaten vornehmen.

Die Auswirkungen eines Betriebes mit verschiedenen Heizungsluft-Volumenströmen auf die Wärmeleistung sind nun bekannt und können für den Schwerkraft- oder Ventilatorbetrieb be-

rücksichtigt werden. Es zeigte sich, dass bei einem Schwerkraftbetrieb keine wesentlichen Leistungseinbussen in Kauf genommen werden müssen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass Hypokausten-Heizungen eine Chance für den Einsatz von Holz als Brennstoff für die Beheizung von Einfamilienhäusern darstellen, da hohe Anforderungen an Komfort, Effizienz und Ökologie erfüllt werden. Mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung ist der Planer und Handwerker in der Lage, die Dimensionierung und Gestaltung der Wärmeerzeugung als Voraussetzung für einen funktionssicheren Betrieb vorzunehmen. Damit sind wichtige Bedingungen für einen Durchbruch dieser neuen, für das Ofenbauergewebe innovativen Technik erfüllt.

Aufgrund der Erfahrungen bei der Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis und in Berücksichtigung neuer, zukunftsgerichteter Entwicklungen im Einfamilienhausbau wird ein Handlungsbedarf für weitergehende Untersuchungen festgestellt. Dies betrifft die folgenden Punkte:

- Anpassung und versuchsmässige Überprüfung von Speicherdimensionierungen an die Bedingungen der Hypokausten-Wärmeerzeugung
- Untersuchung von Hypokausten-Kachelöfen mit innerer Isolation um Heizeinsatz und Feststoffspeicher für eine bedarfsabhängig geregelte Wärmeabgabe
- Untersuchung von Hypokausten-Kachelofenkonstruktionen mit vereinfachten, kostenoptimierten Wandaufbauten für eine bedarfsgerecht aufgeteilte Wärmeabgabe an den Aufstellungsraum und an das Hypokausten-System
- Überprüfung der Untersuchungsergebnisse an Praxisanlagen

## Danksagung

Das Projekt *Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen* wurde dank der Unterstützung des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) möglich.

Wesentliche finanzielle und ideelle Unterstützung erfuhr das Projekt durch Herrn Peter Siegl und den Verband Schweizerischer Hafner- und Plattengeschäfte, der Herrn Konrad Imbach für die intensive Mitarbeit am Projekt zeitweise freigestellt hat.

Dank gebührt auch dem Österreichischen Kachelofenverband, der sich finanziell und ideell an dem Projekt beteiligt hat und durch die Mitarbeit von Herrn Gerhard Baumgartner wesentliche Impulse beisteuerte.

Herr Beat Seiler, Professur für Elektrische Entwicklung und Konstruktionen, ETH Zürich, hat durch seine aktive Mitarbeit, insbesondere bei Fragen der Messtechnik, wertvolle Beiträge geleistet.

Herr Christian Gaegauf, Oekozentrum Langenbruck hat das Projekt fachlich als Berater begleitet.

Folgende Firmen und Personen haben das Projekt unterstützt, indem sie Materialien, Produkte oder Arbeitsleistungen gratis oder zu reduzierten Ansätzen zur Verfügung stellten:

- |                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| - Bartholet AG, Wetzikon    | - Rüegg Cheminée AG, Zumikon         |
| - BRULA GmbH, D-Kempten     | - Karl Spring, Steffisburg           |
| - Flumroc AG, Flums         | - Tonwerk Lohn AG, Lohn              |
| - Josef Ortner, A-Wien      | - UNES-Handels AG, Ormalingen        |
| - Aug. Rath jun. AG, A-Wien | - Wärmegerätebau Steyr GmbH, A-Steyr |

## Anhang 1: Symbolverzeichnis

|                   |                      |                                                                           |
|-------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\rho$            | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte                                                                    |
| $c$               | [kg/m <sup>3</sup> ] | Spezifische Wärme                                                         |
| Masse HE          | [kg]                 | Gewicht Heizeinsatz                                                       |
| Masse NHF         | [kg]                 | Gewicht Nachheizfläche                                                    |
| Masse Total       | [kg]                 | Gesamtgewicht                                                             |
| $m_{rg}$          | [kg/s]               | Rauchgasmassenstrom                                                       |
| $Q_1$             | [W]                  | Wärmeleistung Wärmeerzeuger                                               |
| $Q_3$             | [W]                  | Wärmeleistung Nachheizfläche / massenloser Wärmetauscher                  |
| $Q_{rg}$          | [W]                  | Wärmeleistung Rauchgase                                                   |
| $Q_{summ}$        | [W]                  | Gesamtwärmeleistung                                                       |
| $Q_{Total}$       | [Wh]                 | Gesamtwärmemenge Projektieren Abbrand                                     |
| $Q_{VLT}$         | [W]                  | Wärmeleistung Verbindungsrohr                                             |
| $T_{rg}$          | [K]                  | Rauchgastemperatur                                                        |
| $T_{RL}$          | [K]                  | Rücklauftemperatur Luft                                                   |
| $T_{VL}$          | [K]                  | Vorlauftemperatur Luft                                                    |
| $\Delta T$        | [K]                  | Temperaturdifferenz Systemluft                                            |
| $\Delta T_1$ (HE) | [K]                  | Temperaturdifferenz Systemluft über Wärmeerzeuger                         |
| $\Delta T_2$ (WT) | [K]                  | Temperaturdifferenz Systemluft über Wärmetauscher                         |
| $\Delta T_m$      | [K]                  | Temperaturspreizung Speichermasse                                         |
| $\Delta T_{rg}$   | [K]                  | Temperaturdifferenz Systemluft über Rauchrohr                             |
| $\Delta T_{VLT}$  | [K]                  | Temperaturdifferenz Systemluft über Verbindungsrohr                       |
| $\Sigma \Delta T$ | [K]                  | Temperaturdifferenz Systemluft bei Serienschaltung und Volumenstrom $V_I$ |
| $V$               | [m <sup>3</sup> /h]  | Volumenstrom Systemluft                                                   |
| $\Sigma V$        | [m <sup>3</sup> /h]  | Gesamtvolumenstrom                                                        |

### ***Indizes***

|     |                                             |
|-----|---------------------------------------------|
| 0   | Bei Normzustand 0°C, 1013mbar               |
| 1   | Wärmeerzeuger                               |
| 2   | Nachheizfläche 1                            |
| 3   | Nachheizfläche 3 / massearmer Wärmetauscher |
| L   | Luft                                        |
| NHF | Nachheizfläche                              |
| m   | Masse                                       |
| rg  | Rauchgase                                   |
| RL  | Rücklauf                                    |
| VL  | Vorlauf                                     |
| VLT | Verbindungsrohr                             |

## **Anhang 2: Messgeräte**

- 1 Messwert-Erfassungssystem 1, bestehend aus
  - 80-Kanal-Messstellenumschalter Keithley 7001 mit GPIB
  - Präzisions-Systemmultimeter Keithley 2001 mit GPIB
  - Desktop-PC mit GPIB-Buskarte Keithley 488 und
  - Messwert-Erfassungssoftware CEC TESTPOINT for Windows
- 1 Messwert-Erfassungssystem 2, bestehend aus
  - 40 Thermoelement-Umformer, linearisiert, mit Kaltstellen-Kompensation
  - 1 Anschlusskarte Keithley
  - 1 PC-Steckkarte für 64 Analogkanäle Keithley DAS 1800
  - 1 Notebook-PC mit Docking-Station und
  - Messwert-Erfassungssoftware CEC TESTPOINT for Windows
- 1 Messwert-Erfassungssystem 3, bestehend aus
  - System-Multimeter Keithley 2000 mit eingebautem 9-Kanal-Scanner
  - und Kaltstellenkompensation für Thermoelemente; serielle Verbindung zum PC
  - Notebook-PC mit Messwert-Erfassungssoftware TESTPOINT for Windows

### ***Sensoren:***

- 7 Messkörper V-Control CR... von Hesco Pilgersteg AG
  - für Volumenstrom-Messungen in Luft
  - Verschiedene Nenndurchmesser
  - Ausgang: Druckdifferenz 0 ... 100 Pa
- Total ca. 160 Thermoelemente Typ K (NiCr/Ni)
  - teilweise Mantelthermoelemente (für aggressive Gase und hohe Temperaturen)
  - teilweise selbst hergestellt aus Meterware
  - alle genauigkeitskritischen Thermoelemente sind mit Eiswasser Nullpunkt-kontrolliert und die Korrekturwerte im Rechner abgespeichert. Dadurch sinkt die Messunsicherheit auf ca.  $\pm 0.1\text{K}$ .
- 1 Flügelrad-Anemometer „Schildknecht“ mit Spannungsausgang
- 1 Hitzdraht-Anemometer „Bestobell-Mobrey“ mit Spannungsausgang
- 2 Relativ-Druckgeber „Keller“
- 

### ***Messwert-Umformer***

- 5 Druck-Spannungsumformer „Suprag“ 0 ... 100 Pa
- 1 Präzisions-Druck-Spannungsumformer „Suprag“ 0 ... Pa

### Anhang 3: Glossar

|                                  |                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Abbrandphase</b>              | Zeitspanne in der die Holzcharge abbrennt                                                                                                                                          |
| <b>Charge</b>                    | Eine Charge beinhaltet die Holzmenge einer Beschickung der Feuerung                                                                                                                |
| <b>Feuerungsintervall</b>        | Zeitdauer zwischen den einzelnen Beschickungen                                                                                                                                     |
| <b>Gegenstromprinzip</b>         | Die Systemluft wird in entgegengesetzter Richtung zu den Rauchgasen geführt. Die Rückluft kommt zuerst mit den tiefsten Rauchgastemperaturen in Kontakt; bedingt Ventilatorbetrieb |
| <b>Gleichstromprinzip</b>        | Die Systemluft wird von unten dem Wärmeerzeuger zugeführt und erwärmt sich beim Aufsteigen entlang des Wärmeerzeugers; Schwerkraftprinzip                                          |
| <b>Hypokaustenheizung</b>        | Geschlossenes Warmluftsystem mit zentraler Wärmeerzeugung und dezentralen Strahlungswänden in den Räumen                                                                           |
| <b>Nachheizfläche</b>            | Dem Wärmeerzeuger nachgeschaltete zusätzliche Heizfläche                                                                                                                           |
| <b>Nachheizfläche keramisch</b>  | Nachheizfläche aus Hafnerschamotte, in der Regel individuell gebaut, grosse Speichermasse                                                                                          |
| <b>Nachheizfläche Stahl/Guss</b> | Vorfabrizierte im Handel erhältliche Nachheizflächen, ohne grosse Speichermasse                                                                                                    |
| <b>Schwerkraftbetrieb</b>        | Durch den Dichteunterschied der Luft erzeugte Luftumwälzung                                                                                                                        |
| <b>Temperaturspreizung</b>       | Temperaturdifferenz zwischen entladene und beladene keramischen Speicher                                                                                                           |
| <b>Ventilatorbetrieb</b>         | Die Systemluft wird mit einem Ventilator umgewälzt                                                                                                                                 |
| <b>Wärmeleistung</b>             | Nutzbare, abgegebene Heizleistung des Wärmeerzeugers an die Systemluft                                                                                                             |
| <b>Massearmer Wärmetauscher</b>  | Rauchgas/Luft-Wärmetauscher aus Stahl                                                                                                                                              |
| <b>Heizintervall</b>             | Tageszyklus der Abbrände, z.B. 6/6/12: jeweils 8.00 Uhr, 14.00 Uhr und 20.00 Uhr feuern                                                                                            |

|                         |                                                                                                           |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Abbrandsteuerung</b> | Die Verbrennungsluftmenge wird anhand der Rauchgastemperatur am Rauchgasstutzen des Einsatzes eingestellt |
| <b>Abbrandregelung</b>  | Die Verbrennungsluftmenge wird anhand der Rauchgastemperatur und einer Lambdasonde geregelt               |

## Anhang 4: Kachelofenberechnung

### Angaben

|               |                                               |                 |            |
|---------------|-----------------------------------------------|-----------------|------------|
| Projektnummer | : 6                                           | Datum:          | 21.05.1996 |
| Datei         | : C:\DATEN\HPKP\BERICHT\KOV2.KF2              |                 |            |
| Bezeichnung   | : Versuchsaufbau Hypokaustenprojekt           |                 |            |
| Bauherr       | : Peter Siegl, Weesen                         |                 |            |
| Adresse       | : Planer: Ing. Gerhard Baumgartner, KOV, Wien |                 |            |
| Standort      | :                                             | m. ü. M.        | : 450 m    |
| Heizleistung  | : 6,0 kW                                      | max. Holzmenge: | 22 kg      |
| Nennheizzeit  | : 12 Stunden                                  | min. Holzmenge: | 11 kg      |

### Kamin

|                       |               |       |
|-----------------------|---------------|-------|
| Stahlkamin Di = 18 cm | Durchmesser : | 18 cm |
| Wirksame Höhe : 9,0 m |               |       |

### Brennraum

|                          |                        |        |         |
|--------------------------|------------------------|--------|---------|
| Grundfläche              | : 2362 cm <sup>2</sup> | Höhe   | : 82 cm |
| Biofeuerraumquerschnitt: | 236 cm <sup>2</sup>    | Breite | : 45 cm |
| Gasschlitzquerschnitt    | : 22 cm <sup>2</sup>   | Tiefe  | : 53 cm |

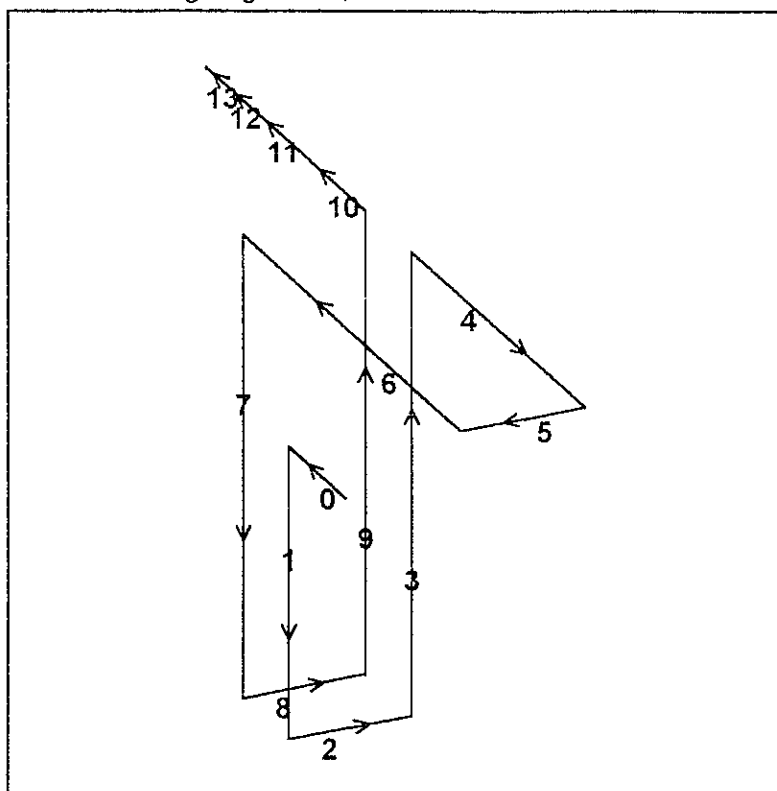
### Heizgasführung

Zuglänge = 6,75 m

| Nr. | Länge<br>[cm] | V<br>[mm] | A<br>[mm] | H (D)<br>[cm] | Breite<br>[cm] |
|-----|---------------|-----------|-----------|---------------|----------------|
| 0   | 25            | 40        | 40        | 38            | 19             |
| 1   | 60            | 40        | 40        | 38            | 19             |
| 2   | 25            | 40        | 40        | 38            | 19             |
| 3   | 95            | 40        | 40        | 38            | 19             |
| 4   | 75            | 30        | 30        | 35            | 18             |
| 5   | 25            | 30        | 30        | 35            | 18             |
| 6   | 95            | 30        | 30        | 35            | 18             |
| 7   | 95            | 25        | 25        | 23            |                |
| 8   | 25            | 25        | 25        | 23            |                |
| 9   | 95            | 25        | 25        | 23            |                |
| 10  | 30            | 20        | 20        | 23            |                |
| 11  | 20            | 20        | 20        | 18            |                |
| 12  | 10            | 20        | 20        | 16            |                |

### Verbindungsstück(e)

|    |                                |
|----|--------------------------------|
| 13 | Metallverbindungsst. 18cm rund |
|----|--------------------------------|



Diese Berechnung der Firma **Österreichischer Kachelofenverband** entspricht den geprüften Berechnungsrichtlinien der Versuchsanstalt der Hafner.

(Stand 1996)

## Angaben

|                                        |                        |
|----------------------------------------|------------------------|
| Projektnummer : 6                      | Datum: 21.05.1996      |
| Datei : C:\DATEN\HPKP\BERICHT\KOV2.KF2 |                        |
| Standort :                             | m. ü. M. : 450 m       |
| Heizleistung : 6,0 kW                  | max. Holzmenge: 22 kg  |
| Nennheizzeit : 12 Stunden              | min. Holzmenge : 11 kg |

## Kamin

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Stahlkamin Di = 18 cm | Durchmesser : 18 cm |
| Wirksame Höhe : 9,0 m |                     |

## Brennraum

|                                              |                |
|----------------------------------------------|----------------|
| Grundfläche : 2362 cm <sup>2</sup>           | Höhe : 82 cm   |
| Biofeuerraumquerschnitt: 236 cm <sup>2</sup> | Breite : 45 cm |
| Gasschlitzquerschnitt : 22 cm <sup>2</sup>   | Tiefe : 53 cm  |

## Heizgasführung

| Nr.                             | l<br>[m] | h<br>[m] | Umlenk-<br>ungen [°] | A<br>[m <sup>2</sup> ] | t<br>[°C] | VA<br>[m <sup>3</sup> /s] | v<br>[m/s] | ph<br>[Pa] | $\lambda_f$ | pr<br>[Pa] | pd<br>[Pa] | $\zeta$ | pu<br>[Pa] |
|---------------------------------|----------|----------|----------------------|------------------------|-----------|---------------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|---------|------------|
| <b>Luftzufuhr</b>               |          |          |                      |                        |           |                           |            |            |             |            |            |         |            |
|                                 |          |          |                      | 0,0236                 | 20        | 0,064                     |            |            |             |            |            |         | 2,99       |
| <b>Brennraum</b>                |          |          |                      |                        |           |                           |            |            |             |            |            |         |            |
|                                 |          | 0,82     |                      | 0,2362                 | 700       |                           |            | 7,10       |             |            |            |         |            |
| <b>Heizgaszüge</b>              |          |          |                      |                        |           |                           |            |            |             |            |            |         |            |
| 0                               | 0,25     | 0,00     | 0                    | 0,0739                 | 541       | 0,191                     | 2,58       | 0,00       | 0,040       | 0,05       | 1,35       | 0,00    | 0,00       |
| 1                               | 0,60     | -0,60    | 90                   | 0,0739                 | 510       | 0,184                     | 2,48       | -4,71      | 0,040       | 0,12       | 1,30       | 1,20    | 1,56       |
| 2                               | 0,25     | 0,00     | 90                   | 0,0739                 | 482       | 0,177                     | 2,39       | 0,00       | 0,040       | 0,05       | 1,25       | 1,20    | 1,51       |
| 3                               | 0,95     | 0,95     | 90                   | 0,0739                 | 444       | 0,168                     | 2,27       | 7,09       | 0,040       | 0,18       | 1,19       | 1,20    | 1,43       |
| 4                               | 0,75     | 0,00     | 90                   | 0,0627                 | 396       | 0,157                     | 2,50       | 0,00       | 0,041       | 0,20       | 1,55       | 1,20    | 1,85       |
| 5                               | 0,25     | 0,00     | 90                   | 0,0627                 | 370       | 0,151                     | 2,40       | 0,00       | 0,041       | 0,06       | 1,49       | 1,20    | 1,78       |
| 6                               | 0,95     | 0,00     | 90                   | 0,0627                 | 341       | 0,144                     | 2,29       | 0,00       | 0,041       | 0,23       | 1,42       | 1,20    | 1,70       |
| 7                               | 0,95     | -0,95    | 90                   | 0,0407                 | 300       | 0,134                     | 3,30       | -6,01      | 0,042       | 0,55       | 3,14       | 1,20    | 3,77       |
| 8                               | 0,25     | 0,00     | 90                   | 0,0407                 | 276       | 0,129                     | 3,16       | 0,00       | 0,042       | 0,14       | 3,01       | 1,20    | 3,61       |
| 9                               | 0,95     | 0,95     | 90                   | 0,0407                 | 255       | 0,124                     | 3,04       | 5,55       | 0,042       | 0,50       | 2,89       | 1,20    | 3,47       |
| 10                              | 0,30     | 0,00     | 90                   | 0,0407                 | 234       | 0,119                     | 2,92       | 0,00       | 0,042       | 0,15       | 2,78       | 1,20    | 3,34       |
| 11                              | 0,20     | 0,00     | 0                    | 0,0261                 | 226       | 0,117                     | 4,49       | 0,00       | 0,045       | 0,33       | 6,68       | 0,00    | 0,00       |
| 12                              | 0,10     | 0,00     | 0                    | 0,0211                 | 222       | 0,116                     | 5,49       | 0,00       | 0,047       | 0,29       | 10,09      | 0,00    | 0,00       |
| <b>Verbindungsstück(e)</b>      |          |          |                      |                        |           |                           |            |            |             |            |            |         |            |
| 13                              | 0,10     | 0,00     | 0                    | 0,0254                 | 220       | 0,115                     | 4,72       | 0,00       | 0,031       | 0,15       | 7,19       | 0,00    | 0,00       |
| <b>Kamin</b>                    |          |          |                      |                        |           |                           |            |            |             |            |            |         |            |
|                                 | 9,00     | 9,00     | 90                   | 0,0254                 | 207       | 0,112                     | 4,60       | 45,38      | 0,031       | 13,17      | 7,01       | 1,20    | 10,10      |
| <b>Summen</b>                   |          |          |                      |                        |           |                           |            | 54,40      |             | 16,18      |            |         | 37,11      |
| <b>Druckdifferenz = 1,11 Pa</b> |          |          |                      |                        |           |                           |            |            |             |            |            |         |            |

Diese Berechnung der Firma **Österreichischer Kachelofenverband** entspricht den geprüften Berechnungsrichtlinien der Versuchsanstalt der Hafner.

(Stand 1996)

### Rechenergebnisse

|                  |              |                         |          |
|------------------|--------------|-------------------------|----------|
| Brennstoffumsatz | : 17,28 kg/h | Kaminkopffinnenwandtemp | : 118 °C |
| Luftvolumen 20°C | : 0,064 m³/s | Fangmündungstemperatur  | : 126 °C |
| Abgasmassenstrom | : 0,078 kg/s | Wirkungsgrad            | : 80 %   |
| Mindestzuglänge  | : 6,12 m     |                         |          |
| Zuglänge         | : 6,75 m     |                         |          |

Diese Berechnung der Firma **Österreichischer Kachelofenverband**  
entspricht den geprüften Berechnungsrichtlinien der Versuchsanstalt der Hafner.

(Stand 1996)