
Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

Berechnung des Nutzungsgrades von Oel- und Gasheizkesseln

Die Arbeiten zu diesem Projekt sind an der Abteilung Verbrennungsmotoren/Feuerungen der EMPA unter der Leitung von Dr. A.Paul (Abteilungsleiter) und J.Brenn (Leiter Gruppe Feuerungen) durchgeführt worden.

Die Messungen haben Marco Manfredi, Daniel Schreiber und Hanspeter Zaugg ausgeführt. Volker Schmatloch hat mich bei Delphi, Heiner Manz und Peter Egolf haben mich bei der Modellierung unterstützt.

Ich danken allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Stefan Remund
EMPA Abt. Verbrennungsmotoren / Feuerungen

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Juni 1999

1. Zusammenfassung	5
2. Einleitung	7
3. Ausgangslage, bestehende Modelle	8
3.1. Rechenmodell von Cerkez	8
3.2. BoilSim	8
3.3. Folgerungen	9
4. Neuer Ansatz	10
4.1. Zielsetzung	10
4.2. Anforderungen an das Modell	10
4.3. Ansätze	10
5. Modellbildung	11
5.1. Datenbasis	11
5.2. Gegenstromwärmetauscher als Heizkesselmodell	11
5.2.1. Voraussetzungen	11
5.2.2. Der Teillastnutzungsgrad	12
5.2.3. Der Normnutzungsgrad nach DIN 4702	12
5.2.4. Wirkungsgrad, Nutzungsgrad	13
5.2.5. Gleichungssystem	13
5.2.6. Diskretisiertes DG-System	14
5.2.7. Serieschaltung	15
5.2.8. Zeitschritt	15
5.3. Auswertung der Eingabedaten	16
5.3.1. Verbrennungsrechnung	16
5.3.2. Adiabate Verbrennungstemperatur	16
5.3.3. NTU-Effectivness Beziehungen	16
5.3.4. Wärmeübergang	17
5.3.5. Gleichungssystem	19
5.3.6. Behandlung des Oberflächenverlustes	19
5.3.7. Die Rücklauftemperatur	20
5.4. Kondensation	21
5.5. Start/Stop	22

5.6.	Auskühlen	22
5.7.	Umrechnen auf ein anderes tV-tR-Paar	22
5.8.	Ändern von tL	22
5.9.	Implementierung	23
6.	Arbeiten mit dem Rechenprogramm	24
6.1.	Installation	24
6.2.	Dateneingabe	24
6.2.1.	Daten Typenprüfung	25
6.2.2.	Brennstoffdaten	26
6.2.3.	Berechnete Werte	26
6.3.	Rechenoptionen	27
6.3.1.	Volllast	27
6.3.2.	Teillast	27
6.3.3.	Normnutzungsgrad	27
6.3.4.	Bereitschaftsverlust	27
6.3.5.	Kühlwasserleistung QpktW	28
6.3.6.	Hilfsfunktionen	28
7.	Vergleiche Messung – Rechnung	29
7.1.	Zur Verfügung stehende Daten	29
7.2.	Vergleich der Normnutzungsgrade	29
7.3.	Vergleich 30%-Teillastnutzungsgrade	33
7.4.	tV/tR Änderung	34
7.5.	Sensitivität des Modells	36
7.6.	Kondensation	36
7.7.	Einschränkung	37
8.	Messungen	38
8.1.	Messungen mit Öl	38
8.2.	Messungen mit Gas	38
9.	Vergleich NNG - 30%TLNG	39

10. Verschiedenes	40
10.1. Zu den Gasheizkesseln	40
10.2. Zur Genauigkeit des Modells	40
10.3. Zum Einsatzgebiet des Modells	41
10.4. Ausblick	42
11. Anhang 1: NNGModell – Programmcode	43
12. Anhang 2: Messresultate	62
13. Literatur	67

1. Zusammenfassung

Der Normnutzungsgrad (DIN 4708) bietet sich als aussagekräftige Grösse zur energetischen Beurteilung von Heizkesseln an. Seine Bestimmung durch Messungen ist jedoch sehr aufwendig. Es ist deshalb die Idee entstanden, den Normnutzungsgrad aus vorhandenen Daten zu berechnen.

Ein Modell für die allgemeine Berechnung des Normnutzungsgrades war das Ziel der vorliegenden Arbeit, in Fortsetzung eines vorausgegangenen Projekts zum selben Thema.

Die Randbedingungen haben sich in den letzten Jahren insofern verändert als die Unterschiede zwischen in Konzept und Leistung vergleichbaren Heizgeräten immer kleiner geworden sind. Wirkungsgrade oder Nutzungsgrade ähnlicher Geräte liegen heute meist nahe beieinander.

Unterschiede, welche mit dem Normnutzungsgrad gut aufgezeigt werden können, bestehen aber zwischen unterschiedlichen technischen Konzepten. So unterscheiden sich die Normnutzungsgrade von Heizkesseln mit und ohne Kondensation oder bei gleitender statt konstanter Betriebsweise deutlich.

Es bietet sich an, einen Heizkessel als Gegenstromwärmetauscher zu modellieren. Ein solcher Wärmetauscher lässt sich mit Hilfe eines Differentialgleichungssystems dynamisch beschreiben. Im einfachsten Fall wird je eine Gleichung für das thermisch-zeitliche Verhalten von Brenngas, Kesselmasse und Heizwasser benötigt. Das Differentialgleichungssystem ist für das vorliegende Modell mit einem expliziten Ansatz diskretisiert worden. Gerechnet werden die Temperaturverläufe in Zeitschritten von meistens weniger als einer Sekunde. Die Berechnungen eines Heizkessels mit dem aktuellen, in Delphi (Pascal) implementierten Modell dauern nur einige Sekunden.

Das Modell ermöglicht die Berechnung von kondensierenden und nicht kondensierenden Heizkesseln mit einstufigen Brennern. Als Brennstoff sind sowohl Oel als auch Gas möglich.

In der aktuellen Version können die Normnutzungsgrade bei den Vorlauf-/Rücklauftemperaturen 75/60°C und 40/30°C berechnet werden. Zudem ist die Berechnung einzelner Teillaststufen (z.B. für 30% Teillastnutzungsgrad nach EN) möglich.

Zufriedenstellend funktioniert auch die Umrechnung auf andere Betriebsbedingungen. So kann z.B. ausgehend von einem Datensatz bei 80/60°C relativ genau auf ein anderes Vorlauf-Rücklaufpaar umgerechnet werden.

Die Eingabedaten beschränken sich auf Werte, wie sie an der Typenprüfung für Oelheizkessel an der EMPA bestimmt werden. Zusätzlich sind einige Daten zur Geometrie des Gerätes erforderlich.

Die Vergleiche von gemessenen und berechneten Werten fallen mehrheitlich erfreulich aus. Die Abweichungen liegen meistens bei weniger als 1% bis 1.5%. Für die Vergleiche standen Daten von 14 Geräten zur Verfügung. Der Grossteil der Messungen ist an der EMPA durchgeführt worden. Im Verlaufe des Projekts sind an der EMPA zusätzlich Messungen an einem kondensierenden Oelheizkessel und an einem kondensierenden Gaswandgerät durchgeführt worden. Weitere Datensätze sind von einem Hersteller zur Verfügung gestellt worden.

Es besteht die Absicht, das Modell in einem nächsten Schritt für die Benützung mit mehrstufigen oder modulierenden Brennern zu erweitern.

Summary

The Standard Annual Efficiency (Normnutzungsgrad) according to the German Industrial Standard (DIN 4708) is a suitable characteristic to compare domestic boilers. The usual way to determine the Standard Annual Efficiency is rather expensive, as it takes about one week measurement work.

The idea of the present research project was to develop a general model to compute the Standard Annual Efficiency. The work was done in succession of a former project with the same subject.

The project was performed at the department engines/furnaces of the Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research (EMPA) with the funding of the Swiss Federal Office of Energy.

The situation has changed in the last years as performance of comparable boilers differs less and less. Therefore efficiency at full load conditions and annual efficiency of devices with comparable technical concept and heat output do not differ significant.

But the Standard Annual Efficiency is well suited to identify the advantages of different technical concepts. The efficiency of a boiler allowing condensation of its flue gas is obviously better than the one of a conventional boiler. Furthermore variable boiler water temperature results in a clearly better annual efficiency than constant temperature at high level.

A domestic boiler may be considered as counterflow heat exchanger. Such a heat exchanger may be described dynamical by a system of differential equations. In a basic system three equations are required corresponding to the three masses flue gas, boiler mass and heating water. For the present model a finite-difference form of this system was obtained by using an explicit method.

Temperature determination is performed at successive times separated by discrete time intervals, which usually are smaller than one second. Just a few seconds are needed to compute the annual efficiency of a domestic boiler. The model is programmed under Delphi (Pascal) and runs on Windows95/98 and NT.

The present model allows computing domestic boilers with or without flue gas condensation. Supported fuels are heating oil as well as gas. At the actual state of development the model is limited to boilers with single stage burners.

Standard Annual Efficiencies for these boilers may be computed at supply/return water temperatures of 75/60°C and 40/30°C. Furthermore part load efficiency at any other load may be computed included the 30% part load efficiency (in accordance with CEN). The conversion to other supply/return temperatures works rather satisfying.

The model requires the input of data from a measurement at full load conditions at a single temperature level as performed at a type testing procedure. Additionally some geometrical data defining the boiler's size and weight are required.

So far, the validation/comparison between calculation and measurement gives satisfactory results. Model and measurement differ for the most part not more than 1 to 1.5%. This has to be taken as a temporary result as a thorough validation has not yet been finished. For the development of the model measurements of fourteen domestic boilers were used. Most of the measurements where performed at the EMPA.

In the near future it is intended to complete the model by adding the support for multiple and modulating burners.

2. Einleitung

Die Grundlagen für die schweizerische Typenprüfung von Oel- und Gasheizgeräten sind in der Luftreinhalte-Verordnung LRV festgeschrieben. Für die Zulassung von Heizgeräten werden hauptsächlich lufthygienische Anforderungen geprüft. Schon vor Jahren ist der Wunsch entstanden, bei der Typenprüfung zusätzlich energetisch relevante Messungen durchzuführen.

Entsprechende Ideen sind von Erb im Arbeitspapier "Energierelevante Typenprüfung bei Oel- und Gasheizkesseln" [1] und von Zweifel in "Berechnung des Jahresnutzungsgrades von Heizkesseln" [2] ausgearbeitet worden.

Im Rahmen des Projekts „Energierelevante Typenprüfung für Oel- und Gasheizkessel mit Gebläsebrennern“ [3] ist von Cerkez ein Rechenmodell entwickelt worden, das die Abschätzung des Normnutzungsgrades für nicht kondensierende Oelheizkessel mit einstufigen Gebläsebrennern erlaubt.

Das Ziel des vorliegenden Projekts nun war, die allgemeine Anwendbarkeit der von Cerkez entwickelten Methode zu erreichen. Speziell atmosphärische und kondensierende Gasheizkessel sollen damit ebenfalls berechnet werden können.

Der Normnutzungsgrad (DIN 4708) ist eine aussagekräftige Grösse zur energetischen Beurteilung von Heizkesseln. Seine Bestimmung ist jedoch sehr aufwendig. Die erforderlichen Messungen der fünf Laststufen beanspruchen rund eine Woche.

Der Normnutzungsgrad hat in Deutschland eine Bedeutung im Zusammenhang mit dem Umweltlabel "Blauer Engel", für welches er gemessen werden muss. In der Schweiz hat der Normnutzungsgrad hingegen noch kaum eine praktische Bedeutung.

3. Ausgangslage, bestehende Modelle

3.1. Rechenmodell von Cerkez

Das Modell von Cerkez setzt sich zusammen aus Funktionen, welche die verschiedenen Verluste beschreiben. In den Funktionen enthaltene Konstanten sind mit Hilfe umfangreicher Messungen an acht Heizkesseln bestimmt worden.

Die folgenden Verluste werden durch je eigene Funktionen erfasst:

- *Bereitschaftsverluste*

Die Bereitschaftsverluste werden in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur durch eine lineare Funktion ohne Hilfsparameter abgeschätzt.

- *Abgasverluste, Abgastemperatur*

Die Abgasverluste, welche den weitaus grössten Teil der Verluste ausmachen, werden mit der erweiterten Siegert'schen Formel berechnet.

Die dafür benötigte Abgastemperatur wird nach einer von G.Zweifel in einem Arbeitspapier vorschlagenden Formel bestimmt. Sie basiert auf Untersuchungen von Gass/Hopkirk in IEA Annex 10, welche gezeigt haben, dass sich bei konstanter Kesselwassertemperatur die Abgastemperatur über die Auslastung linear verändert.

- *Oberflächenverluste, Auskühlverluste, Vorspülverluste*

Die Oberflächenverluste und die über die Stillstandszeit gemittelten Auskühlverluste werden in Abhängigkeit von den Bereitschaftsverlusten ausgedrückt. Die Vorspülverluste schliesslich werden abhängig von den Abgasverlusten beschrieben.

Die Uebereinstimmung von Rechnung und Messung fällt für die einzelnen Verluste und Heizkessel unterschiedlich aus. Beim Vergleich mit den im selben Projekt gemessenen und für die Modellentwicklung verwendeten Heizkesseln weichen die gerechneten Normnutzungsgrade ungefähr 1% von den Messungen ab.

Berechnet werden können mit dem Modell von Cerkez der Normnutzungsgrad oder ein beliebiger Jahresnutzungsgrad. Beide sind die Mittel von fünf Teillastnutzungsgraden. Der Normnutzungsgrad entspricht einem Standardklima, während mit Jahresnutzungsgrad das Klima an einem beliebigen Standort berücksichtigt werden kann. Der Normnutzungsgrad kann durch Einsetzen der in der Norm DIN 4702 definierten Paare aus Vorlauftemperatur und Last berechnet werden (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Um den Jahresnutzungsgrad einer Anlage zu berechnen, müssen zuerst die entsprechenden Klimadaten aufbereitet werden.

3.2. BoilSim

BoilSim ist ein PC-Programm [4] zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades von Heizkesseln. Es ist im Projekt "Annual efficiency calculation method for domestic boilers" im europäischen SAVE-Programm entwickelt worden.

BoilSim ist als Dimensionierungstool für Heizungsplaner konzipiert. Es soll dazu dienen, einen geeigneten Heizkessel für einen gegebenen Wärmebedarf zu bestimmen. Entsprechend sind die Systemgrenzen weiter gesetzt als beim Modell von Cerkez. BoilSim betrachtet neben dem eigentlichen Heizkessel auch das hydraulische Wärmeverteilsystem des Gebäudes.

Für eine Berechnung mit BoilSim müssen Heizkessel, Klima und Wärmeverteilsystem in einem Eingabedialog ausgewählt werden. Nur in einer Managerversion von BoilSim können Heizkessel und Klimadaten definiert werden. Für das Wärmeverteilsystem sind Angaben über dessen Auslegeleistung und die Auslegetemperaturen von Vorlauf und Rücklauf nötig. Weiter kann gewählt werden zwischen konstantem oder variablem (lastproportionalem) Heizwasserstrom. Alternativ kann auch direkt eine Heizkurve vorgegeben werden. Aus den Angaben berechnet das Programm Heizwasserstrom, Kessellast und die passenden Vorlauf- und Rücklauftemperaturen. Diese Größen können nicht direkt vorgegeben werden. Sie können nur durch Änderung von Klimadaten und Wärmeverteilung beeinflusst werden.

BoilSim setzt eine grosse Datenbasis voraus. Damit das Programm alle notwendigen Hilfsparameter für einen Heizkessel bestimmen kann, müssen Vollastmessungen bei 80/60, bei 60/40 und eine 30%-Teillastmessung (nach EN) vorliegen.

An der schweizerischen Typenprüfung werden nur 80/60 Messungen vorgenommen. Um mit BoilSim zu rechnen, wären zusätzliche Messungen notwendig. Die Verfügbarkeit aller Daten ist selbst in der EU nicht gesichert und stellt ein Problem der Methode dar [5].

Für BoilSim wird eine Abweichung von Messung zu Rechnung von $\pm 1.5\%$ angegeben. BoilSim kann gegenüber dem Modell von Cerkez alle gängigen Kesselkonstruktionen berechnen.

3.3. Folgerungen

Es war zu entscheiden mit welchem der beiden Modelle das angestrebte Ziel erreicht werden kann. In der diesem Projekt zugrunde liegenden Offerte ist davon ausgegangen worden, dass sich das Modell von Cerkez durch Messungen an einem einzigen, geeigneten Gasheizergerät wie gewünscht erweitern lasse.

Die folgenden Gründe liessen es jedoch als sinnvoll erscheinen, weder mit dem Modell von Cerkez noch mit BoilSim zu arbeiten:

Modell von Cerkez:

- Moderne Gasheizkessel sind immer häufiger Wandgeräte mit sehr kleinen Massen. Sie werden modulierend, also mit variabler Brennerleistung betrieben. Die Brennerlaufzeit nimmt gegenüber rein taktentdem Betrieb zu. Auskühl-, Stillstands- und Vorspülverluste nehmen hingegen ab. Diese sind als Einzelverluste, wie im Modell von Cerkez praktiziert, deshalb kaum mehr zuverlässig zu bestimmen.
- Für den verwendeten Ansatz für die Abgastemperatur gibt Zweifel eine untere Grenze für die Last von 40% an. Darunter muss eine Näherung verwendet werden. Der Bereich unter 40% hat für moderne, modulierende Brenner aber eine zunehmende Bedeutung.
- Einzelne Funktionen stützen sich weniger auf physikalische Gesetzmässigkeiten als vielmehr auf die mit Messungen bestimmten Konstanten. Das bedeutet, dass eine Erweiterung des Modells für weitere Kesseltypen immer zusätzliche Messungen erfordert. Moderne Gasgeräte unterscheiden sich wesentlich von den Heizkesseln, welche der bisherigen Modellentwicklung zugrunde liegen. Es ist deshalb zu bezweifeln, dass die Messungen eines einzigen zusätzlichen Gerätes ausreichen, um eine zuverlässig Erweiterung des Modells zu erreichen.

BoilSim Programm

- Beim BoilSim-Programm stellt die Verfügbarkeit der benötigten Daten die eigentliche Schwierigkeit dar. Zusätzliche Messungen sind notwendig. Man muss sich fragen ob es dann nicht sinnvoller ist, statt der zusätzlichen Messungen, direkt die Messungen für den Normnutzungsgrad durchzuführen.

4. Neuer Ansatz

4.1. Zielsetzung

Das Kernziel des Projektes besteht darin, Teillastnutzungsgrade von Öl- oder Gasheizgeräten mit möglichst wenig Daten genügend genau berechnen zu können. Aus diesen Teillastnutzungsgraden lassen sich dann beliebig Jahresnutzungsgrade oder der Normnutzungsgrad berechnen.

Drei Einsatzgebiete und Anwenderzielgruppen können unterschieden werden:

- *Die Berechnung des Normnutzungsgrades im Rahmen der Typenprüfung.*
Ziel wäre die Veröffentlichung der Werte, z.B. in der BUWAL-Liste [6] als Auswahlhilfe für Konsumenten und Planer.
- *Die Verwendung des Modells durch Heizungsplaner und Hersteller*
Planer könnten mit dem Modell Jahresnutzungsgrade mit individuellen Klimadaten bestimmen. Das Modell könnte auch für die Bestimmung der Auslegetemperaturen (Vorlauf und Rücklauf) dienen. Hersteller könnten das Modell für Abschätzungen im Entwicklungsprozess einsetzen.
- *Die Verwendung des Modells als Plug-In in einem Gebäudesimulationsprogramm*
Das erste Einsatzgebiet, der Einsatz zur Normnutzungsgradbestimmung, wird vorläufig als wichtigstes betrachtet und deshalb bei der Modellentwicklung primär berücksichtigt. Als Datenbasis wird von einem Typenprüfprotokoll der EMPA ausgegangen.

4.2. Anforderungen an das Modell

- Das Modell soll zuverlässig einsetzbar sein für den Hauptteil der im Markt vertretenen Öl- und Gasheizgeräte.
- Die Berechnung muss möglich sein für Öl- wie auch für Gas als Brennstoff.
- Die Kondensation der Abgase muss berücksichtigt sein.
- Es sollen auch mehrstufige und modulierende Brenner berechnet werden können.
- Die Genauigkeit der Bestimmung des Normnutzungsgrades muss mindestens jener der Messung entsprechen. Die EN-Norm 304 lässt für die Wirkungsgradbestimmung durch Messung eine Toleranz von $\pm 2\%$ zu.
- Die Berechnung muss mit wenigen und einfach zugänglichen Eingabedaten möglich sein. Es sollten Möglichkeiten bestehen, auch Heizgeräte mit unvollständigen Datensätzen berechnen zu können.
- Zusätzliche, für die Berechnung erforderliche Messungen müssen vermieden werden.
- Die Bedienung des Rechenprogramms soll einfach und zweckmäßig sein.
- Die Berechnung eines Heizkessels soll sich in angemessener Zeit durchführen lassen.

4.3. Ansätze

Interessante Modellansätze sind bei Ottin [7] und in einem Kapitel des BoilSim-Dokumentation [8] zu finden. In beiden Ansätzen wird ein Heizkessel als Gegenstromwärmetauscher betrachtet und mit Hilfe eines Differentialgleichungssystems beschrieben.

Im WKM-Modell von Huber [9] wird ein vergleichbares Differentialgleichungssystem auf ein Luft-Erdregister angewandt. Dabei werden die Speicher- und Entladevorgänge um ein luftdurchströmtes im Erdreich verlegtes Rohr behandelt.

5. Modellbildung

5.1. Datenbasis

Von den im Abschnitt 4.1 aufgezählten Einsatzgebieten, wird die Normnutzungsgradbestimmung vorläufig als Wichtigstes betrachtet und deshalb bei der Modellentwicklung primär berücksichtigt.

Als Datenbasis wird von einem Typenprüfprotokoll der EMPA für Ölheizkessel ausgegangen.

Weitere darin nicht enthaltene Daten sollen Herstellerunterlagen entnommen werden. Dabei handelt es sich um Daten zur Geometrie der Kessel:

Kesselwasserinhalt, Heizkesselgewicht und Brenngasinhalt.

5.2. Gegenstromwärmetauscher als Heizkesselmodell

In einem Heizkessel wird grundsätzlich die bei der Verbrennung von Öl oder Gas freiwerdende Wärme auf das im Heizkessel zirkulierende Heizwasser übertragen. Es ist naheliegend einen Heizkessel als Wärmetauscher zu modellieren. Die hier verwendete Gegenstromanordnung dürfte die Verhältnisse in einem Heizkessel besser treffen als eine ebenfalls mögliche Gleichstromanordnung.

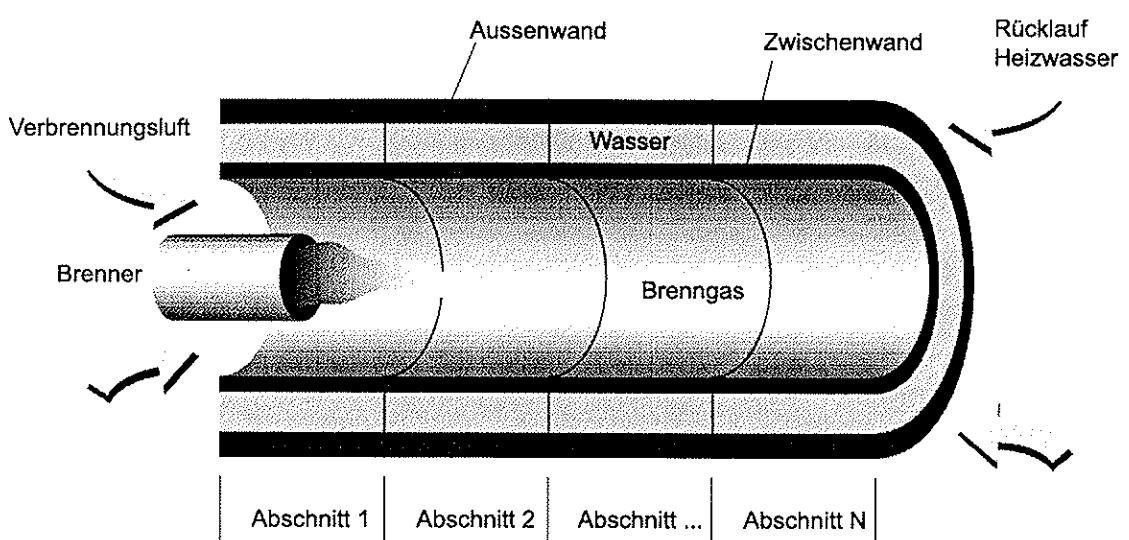


Abbildung 5.1: Gegenstromwärmetauscher als Heizkesselmodell. Der Brenngasraum ist zentral angeordnet. Koaxial fliesst das Kesselwasser in einem Ringspalt in der Gegenrichtung. Die Kesselmaße ist verteilt auf die Zwischenwand und die Außenwand.

5.2.1. Voraussetzungen

Das Modell soll das instationäre Verhalten eines Heizkessels so weit nachbilden, dass Teillastnutzungsgrade mit Hilfe von Volllast- und Geometriedaten berechnet werden können. Es interessieren nur Input und Output des Wärmetauschers, nicht aber das Wie und Wo des Wärmeüberganges im Wärmetauscher. Wichtig für das Modell ist, dass der erste Hauptsatz der Thermodynamik, die Erhaltung der Energie, immer gewährleistet ist.

Die folgenden Vereinfachungen werden getroffen:

- Keine Berücksichtigung der Wärmestrahlung im Brennraum.
- Gerechnet wird mit mittleren Wärmeübergangskoeffizienten sowohl auf der Brenngasseite als auch auf der Wasserveite.

- Ebenfalls als konstant betrachtet werden die Wärmekapazitäten von Brenngas, Kesselmaterial und Heizwasser.
- Es findet keine Wärmeleitung im Kesselmaterial in Längsrichtung statt.
- Das Kesselmaterial (Zwischenwand) weist uniforme Temperatur auf.

5.2.2. Der Teillastnutzungsgrad

Der Teillastnutzungsgrad η_{φ_i} ist die bei einer bestimmten relativen Kesselleistung (oder: Laststufe) abgegebene Wärme im Verhältnis zur Feuerungswärme.

$$\eta_{\varphi_i} = \frac{Q_H}{Q_F} = \frac{\int_{t_0}^{t_2} \dot{Q}_H(t) dt}{\int_{t_0}^{t_2} \dot{Q}_F(t) dt} \quad \text{bei relativer Kesselleistung } \varphi_i = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_{H,n}}$$

Q_H = Heizwärme

Q_F = Feuerungswärme

$$\begin{aligned} \dot{Q}_F &= m_b \cdot Hu \quad (\text{Feuerungswärmeleistung}) \\ Q_F &= m_b \cdot Hu \cdot (t_1 - t_0) \end{aligned} \quad GI (5.1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_H &= m_w \cdot cp_w \cdot (T_V - T_R) \quad (\text{Heizwärmeleistung}) \\ Q_H &= m_w \cdot cp_w \cdot (T_V - T_R) \cdot (t_2 - t_0) \end{aligned}$$

t_0 = Zyklusstart, Brennerstart

t_1 = Brennerstop

t_2 = Zyklusende

Von den Volllast-Eingabedaten sind der Brennstoffmassenstrom m_b , der Heizwert Hu , der Heizwassermassenstrom m_w und die Wärmekapazität cp_w bekannt. Um den Teillastnutzungsgrad sinnvoll genau berechnen zu können, ist es also wichtig, im Modell das Verhältnis Zyklusdauer zu Brennerlaufzeit und die mittlere Vorlauf-Rücklauf-Temperaturdifferenz korrekt wiederzugeben.

5.2.3. Der Normnutzungsgrad nach DIN 4702

Aus den Teillastnutzungsgraden bei den fünf vorgegebenen Laststufen errechnet sich der Normnutzungsgrad nach DIN 4702.

$$\eta_n = \frac{5}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\eta_{\varphi_i}}} \quad GI (5.2)$$

Der Normnutzungsgrad (NNG) repräsentiert die Benützung eines Heizkessels für ein durchschnittliches Jahresklima für Deutschland.

Der Jahresnutzungsgrad kann auf die gleiche Art wie der Normnutzungsgrad definiert werden. Die 5 Laststufen sind aber für das individuelle Klima am interessierenden Ort zu bestimmen. Dazu wird die Temperaturhäufigkeitsverteilung über ein Jahr in 5 gleich grosse Bereiche (z.B. Anzahl Gradtag) aufgeteilt.

Relative Kesselleistung	Temperaturpaar 75/60°C		Temperaturpaar 40/30°C		Temperaturpaar 90/70°C	
	Tv [°C]	Tr [°C]	Tv [°C]	Tr [°C]	Tv [°C]	Tr [°C]
0.63	55	45	33	26	64	51
0.48	46	39	30	25	54	44
0.39	42	36	28	24	47	39
0.3	37	32	26	23	41	35
0.13	27	25	23	21	29	26

Tabelle 5.1 Heizmitteltemperaturen in Abhängigkeit von der relativen Kesselleistung für die Normnutzungsgradbestimmung nach DIN 4702, Teil 8. Die Werte für 90/70°C sind in der Norm nicht vorgesehen und sind analog bestimmt worden.

5.2.4. Wirkungsgrad, Nutzungsgrad

Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen der nutzbaren Energie (hier: Heizwärme) und der zugeführten Energie (hier: Feuerungswärme, welche mit dem Brennstoff zugeführt wird).

Unter Nutzungsgrad wird grundsätzlich dasselbe verstanden. Die Energiezufluss zum System erfolgt jedoch nicht kontinuierlich. Dies ist bei allen Heizeräten ausser bei vollmodulierenden der Fall. Hat die Temperatur im Kesselwasser einen Sollwert erreicht, wird der Brenner ausgeschaltet. Der Brenner wird taktend betrieben.

5.2.5. Gleichungssystem

Die Zylinderform des Wärmetauschers in Abbildung 5.1 ist für die Funktion des Modells grundsätzlich irrelevant und wird in der Modellbildung nicht weiter beachtet.

Wenn die gesamte Kesselmasse in der Zwischenwand lokalisiert wird, lässt sich das Wärmetauschermodell durch ein System von drei Differentialgleichungen beschreiben:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_f}{\partial t} m_f c_p f &= \dot{m}_f c_p f (T_{ad} - T_f) - \alpha_f A (T_f - T_z) \\ \frac{\partial T_z}{\partial t} m_z c_z &= \alpha_f A (T_f - T_z) - \alpha_w A (T_z - T_v) \\ \frac{\partial T_w}{\partial t} m_w c_w &= \alpha_w A (T_z - T_v) - \dot{m}_w c_w (T_v - T_r) \end{aligned} \quad GI (5.3)$$

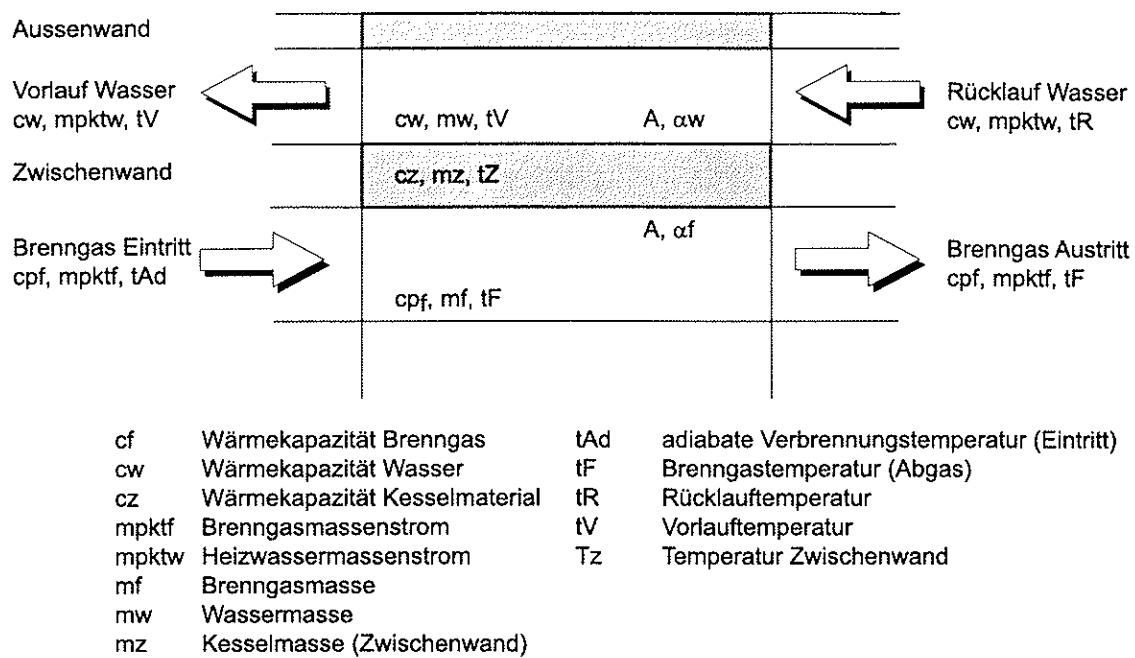


Abbildung 5.2 Wärmetauschermodell, wie mit dem Differentialgleichungssystem nach Gl (5.3) beschrieben.

Je eine Gleichung beschreibt das thermisch-zeitliche Verhalten von Brenngas (Index f), Kesselmasse (Index z) und Hezwasser (Index w).

Im realisierten Modell wird die Kesselmasse aufgeteilt auf die Zwischenwand und die Außenwand (Index m). Damit kann durch Verlagern von Kesselmasse das thermisch-zeitliche Verhalten des Systems verändert werden kann.

5.2.6. Diskretisiertes DG-System

Es bietet sich an, ein solches Problem nicht analytisch exakt sondern numerisch zu lösen. Im Gegensatz zu analytischen Methoden können die Temperaturen mit numerischen Methoden nur an zum voraus bestimmten Orten (Knoten) und Zeitpunkten angegeben werden. Dafür lässt sich das Problem mit relativ einfachen Algorithmen in einem Rechenprogramm realisieren.

Mit dem Differenzenverfahren können die Ableitungen von Gl (5.3) durch ihre Differenzenquotienten ersetzt werden.

$$\frac{T_{fi}^{t+1} - T_{fi}^t}{\Delta t} m_f c_f = \dot{m}_f c_f (T_{fi-1}^t - T_{fi}^t) - \alpha_f A (T_{fi}^t - T_{zi}^t) \quad \text{Gl (5.4)}$$

$$\frac{T_{zi}^{t+1} - T_{zi}^t}{\Delta t} m_z c_z = \alpha_f A (T_{fi}^t - T_{zi}^t) - \alpha_w A (T_{zi}^t - T_{wi}^t)$$

$$\frac{T_{wi}^{t+1} - T_{wi}^t}{\Delta t} m_w c_w = \alpha_w A (T_{zi}^t - T_{wi}^t) - \dot{m}_w c_w (T_{wi}^t - T_{wi+1}^t)$$

Δt = Zeitschritt

Diese Gleichungen könnten auch mit der Energiebilanzmethode gewonnen werden, indem die Energieflüsse zu und aus einem Kontrollvolumen um jeden Knoten bilanziert würden [10].

Für das Diskretisieren findet ein expliziter Ansatz Verwendung. Das bedeutet, dass unbekannte Temperaturen an einem Knoten ausschliesslich durch vom vorherigen Zeitschritt her bekannte Temperaturen bestimmt werden. Diese Methode hat nur so weit einen Nachteil, als dass bestimmte Verhältnisse zwischen Orts- und Zeitschritt eingehalten werden müssen, damit die Berechnung stabil bleibt.

Das Rechengebiet wird für die numerische Berechnung mit einem Gitternetz überzogen (vgl. Abbildung 5.3), womit die zu berechnenden Knoten festlegt sind.

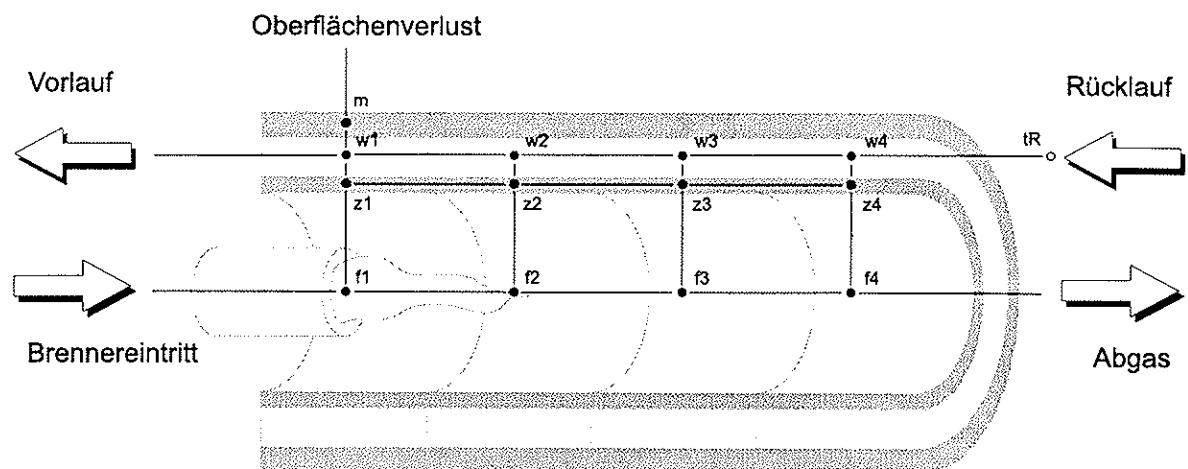


Abbildung 5.3 Rechengitter für das Heizkesselmodell.

Der Modellwärmetauscher wird längs unterteilt in vier Abschnitte. In jedem Abschnitt wird je ein Knoten im Gasraum, in der Zwischenwand und im Wasserraum festgesetzt.

Die Außenwand wird durch einen einzelnen zusätzlichen Knoten berücksichtigt.

Eine weitere Gleichung bestimmt die Eintrittsverhältnisse auf der Wasserseite, indem sie die Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur bestimmt.

5.2.7. Serieschaltung

Jeder Abschnitt des Modells ist für sich betrachtet ein Wärmetauscher. Das ganze Modell stellt eine Serieschaltung dieser Wärmetauscher dar. Wärmetauscherfläche und NTU der Serieschaltung sind die Summen der Werte der Abschnittswärmetauscher [11].

5.2.8. Zeitschritt

Bei expliziten Rechenalgorithmen müssen Stabilitätsbedingungen eingehalten werden. Diese setzen die Kenntnis der zu berechnenden Geometrie voraus. Die im Modell verwendete Geometrie hat aber keinen direkten Bezug zum realen Heizkessel, sondern wird so gewählt, dass das thermisch-zeitliche Verhalten des wirklichen Kessels möglichst genau wiedergegeben wird. Es musste deshalb eine andere Möglichkeit für ein Stabilitätskriterium gefunden werden.

Es ist offensichtlich, dass Information verloren geht, wenn pro Zeitschritt ein grösseres Brenngas- oder Heizwasservolumen verschoben wird, als im entsprechenden Rechenelement Platz findet. Mit dieser Überlegung lässt sich eine maximale Grösse für den Zeitschritt bestimmen.

5.3. Auswertung der Eingabedaten

5.3.1. Verbrennungsrechnung

Um den Brenngasmassenstrom \dot{m}_f zu bestimmen wird eine Verbrennungsrechnung durchgeführt. Als Eingabewerte müssen die Zusammensetzung des verwendeten Brennstoffs (Elementaranalyse), der Brennstoffmassenstrom \dot{m}_b und der Restsauerstoff im Abgas bekannt sein. (vgl. Abschnitt 6.2)

Die Verbrennungsrechnung wird durchgeführt gemäss den Ausführungen von Baehr [12].

Dabei wird die Verbrennung als vollständig betrachtet. Unverbrannte Brennstoffanteile, Asche und Russ werden nicht berücksichtigt. Das Brenngas wird vereinfachend als ideales Gas behandelt.

5.3.2. Adiabate Verbrennungstemperatur

Als Eingabedaten müssen die Abgastemperatur bei Vollast sowie die entsprechende Vorlauf- und Rücklauftemperatur bekannt sein. Als Eintrittstemperatur auf der Gasseite wird die adiabate Verbrennungstemperatur verwendet. Diese entspricht der maximal erreichbaren Temperatur bei vollständiger, verlustfreier Umsetzung der Brennstoffenergie in Wärme. Sie stellt eine Idealisierung dar und wird in der Realität nur annähernd erreicht. Sie lässt sich durch das Gleichsetzen der Enthalpie von Brennstoff und Luft (Edukte) und der Enthalpie des Verbrennungsgases (Produkte) berechnen [12].

5.3.3. NTU-Effectivness Beziehungen

Mit Hilfe der NTU-Effectivness Beziehungen lassen sich Wärmetauscher charakterisieren. Der NTU-Wert (Number of transfer units) kann als dimensionslose Wärmeübertragungsfläche betrachtet werden.

$$NTU = \frac{k \cdot A}{\dot{Q}_{min}} \quad GI (5.5)$$

k = Wärmedurchgangskoeffizient

A = Wärmetauscherfläche

\dot{Q}_{min} = kleinerer Wärmekapazitätsstrom

Die Effectivness stellt das Verhältnis zwischen der maximal möglichen und der tatsächlich übertragenen Wärme dar [10]. Die Effectivness lässt sich bestimmen, wenn beide Wärmekapazitätsströme und drei Temperaturen des Wärmetauschers bekannt sind

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_h (T_{ad} - T_f)}{\dot{Q}_{min} (T_{ad} - T_r)} \quad GI (5.6)$$

\dot{Q}_h = Wärmekapazitätsstrom heiße Seite

Weil im vorliegenden Fall der Wärmekapazitätsstrom auf der heißen Brenngasseite immer kleiner ist als derjenige auf der Hezwasserseite, vereinfacht sich der Ausdruck zu

$$\epsilon = \frac{(T_{ad} - T_f)}{(T_{ad} - T_r)}$$

Mit Hilfe des Verhältnisses der Wärmekapazitätsströme Z lässt sich schliesslich der NTU-Wert bestimmen

$$NTU = \frac{1}{Z-1} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon \cdot Z - 1}\right) \quad GI(5.7)$$

$$Z = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{Q}_w} = \frac{cp_f \cdot m_k f}{c_w \cdot m_k w} = \frac{T_v - T_r}{T_{ad} - T_f}$$

Die Wärmekapazitätsströme werden aus den Eingabedaten (Vollast) bestimmt. Sowohl Wärmekapazitäten wie auch Massenströme werden als temperaturunabhängig betrachtet und für alle Betriebszustände konstant gehalten. Die mittlere Wärmekapazität des Brenngases wird nach [13] bestimmt.

5.3.4. Wärmeübergang

Mit dem aus den Eingabedaten berechneten NTU-Wert ist auch das Produkt $A \cdot k$ bestimmt. Die Größe der Wärmetauscherfläche eines Heizkessels steht meistens nicht zur Verfügung. Sie wird im Modell in Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung abgeschätzt (vgl. Abschnitt 6.2.1). Weil die Temperatur der Zwischenwand als uniform betrachtet wird, hängt der Wärmedurchgang nur von den beiden Wärmeübergangskoeffizienten ab.

$$k = \frac{\alpha_f + \alpha_w}{\alpha_f \cdot \alpha_w} \quad GI(5.8)$$

Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient auf der Wasserseite ist etwa eine Größenordnung grösser als derjenige auf der Brenngasseite. Der k -Wert wird deshalb hauptsächlich durch die Brenngasseite bestimmt [14].

Bei mehrstufigen und modulierenden Brennern kann sich die Brennerleistung verändern. Entsprechend variiert auch der Brenngasmassenstrom. Die sich ändernden Strömungsverhältnisse sollen beim Wärmeübergang berücksichtigt werden. Es ist naheliegend den Wärmeübergang deshalb nach einem Ansatz für Rohrströmung zu formulieren [15].

Durch das Bestimmen der beiden Wärmeübergangskoeffizienten wird der erreichbare Wärmedurchgang im stationären Gleichgewicht nicht verändert, weil das Produkt $A \cdot k$ durch den NTU-Wert bestimmt wird. Hingegen wird das Temperaturniveau der Zwischenwand im Vollast-Gleichgewicht und der zeitliche Verlauf des Temperaturanstieges beim Aufheizen beeinflusst.

Die Stoffwerte werden für Brenngas und Heizwasser bei den mittleren Vollasttemperaturen bestimmt. Wobei für das Brenngas ein logarithmischer Temperaturverlauf angenommen wird. Für das Brenngas werden Dichte, Wärmeleitfähigkeit und dynamische Viskosität von Luft verwendet.

Der Wärmeübergang wird ebenfalls als temperaturunabhängig betrachtet und für alle Betriebszustände mit gleichen Strömungsverhältnissen konstant gehalten.

$$\dot{Q}_i^k = \alpha_f \cdot A_i \cdot \Delta T_i$$

Ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fluidströmen auf der einen Seite des Wärmetauschers viel grösser als auf der anderen, muss ΔT als logarithmische Temperaturdifferenz ausgedrückt werden [11].

$$\Delta T_i = \frac{(T_{fi-1} - T_{zi}) - (T_{fi} - T_{zi})}{\ln \frac{(T_{fi-1} - T_{zi})}{(T_{fi} - T_{zi})}}$$

Die an die Wand übertragene Wärme kann mit Hilfe der Effectivness aber auch durch eine lineare Beziehung ausgedrückt werden [10].

$$\dot{Q}_i = \varepsilon_{fi} \cdot \dot{Q}_f \cdot (T_{fi-1} - T_{zi}) \quad GI(5.9)$$

mit

$$\varepsilon_{fi} = 1 - e^{-NTU_{fi}}$$

$$NTU_{fi} = \frac{\alpha_f \cdot A_i}{\dot{Q}_f}$$

Für die Heizwasserseite lässt sich eine analoge Beziehung formulieren.

$$\dot{Q}_i = \varepsilon_{wi} \cdot \dot{Q}_w \cdot (T_{zi} - T_{wi+1}) \quad GI(5.10)$$

Wobei sich die Effectivness auf der Heizwasserseite ε_{wi} bestimmen lässt durch

$$\varepsilon_{wi} = Z \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_f}{\varepsilon_f - \varepsilon} \quad GI(5.11)$$

aus

$$T_z - T_r = \frac{T_{Ad} - T_f}{\varepsilon} - \frac{T_{Ad} - T_f}{\varepsilon_f}$$

mit

$$\varepsilon = \frac{T_{Ad} - T_f}{T_{Ad} - T_r}, \quad \varepsilon_f = \frac{T_{Ad} - T_f}{T_{Ad} - T_Z}, \quad \varepsilon_w = \frac{T_v - T_r}{T_z - T_r}$$

Diese linearen Beziehungen für den Wärmeübergang sind günstiger für die Implementierung und werden deshalb im Modell verwendet.

5.3.5. Gleichungssystem

Das Gleichungssystem für einen Teilabschnitt des Modells nach GI (5.4) wird mit den Ausführungen in den letzten Abschnitten zu

$$T_{fi}^{t+1} = \frac{\Delta t}{C_{fi}} \cdot \left[T_{fi-1}^t \cdot (\dot{Q}_f - \dot{Q}_{f\alpha}) + T_{fi}^t \cdot \left(\frac{C_{fi}}{\Delta t} - \dot{Q}_f \right) + T_{zi}^t \cdot \dot{Q}_{f\alpha} \right] \quad GI (5.12)$$

$$T_{zi}^{t+1} = \frac{\Delta t}{C_{zi}} \cdot \left[T_{fi-1}^t \cdot \dot{Q}_{f\alpha} + T_{zi}^t \cdot \left(\frac{C_{zi}}{\Delta t} - \dot{Q}_{f\alpha} - \dot{Q}_{w\alpha} \right) + T_{wi+1}^t \cdot \dot{Q}_{w\alpha} \right]$$

$$T_{wi}^{t+1} = \frac{\Delta t}{C_{wi}} \cdot \left[T_{zi}^t \cdot \dot{Q}_{w\alpha} + T_{wi}^t \cdot \left(\frac{C_{wi}}{\Delta t} - \dot{Q}_w \right) + T_{wi+1}^t \cdot (\dot{Q}_w - \dot{Q}_{w\alpha}) \right]$$

$$C_{fi} = cp_f \cdot m_{fi} \quad , \quad \dot{Q}_f = cp_f \cdot m_{fi} \cdot \dot{\epsilon}_f \quad , \quad \dot{Q}_{f\alpha} = cp_f \cdot m_{fi} \cdot \epsilon_{fi}$$

$$C_{zi} = c_z \cdot m_{zi}$$

$$C_{wi} = c_w \cdot m_{wi} \quad , \quad \dot{Q}_w = c_w \cdot m_{wi} \cdot \dot{\epsilon}_w \quad , \quad \dot{Q}_{w\alpha} = c_w \cdot m_{wi} \cdot \epsilon_{wi}$$

Randbedingungen

$$T_{f0}' = T_{Ad} \quad \text{adiabate Verbrennungstemperatur, Brenner läuft}$$

$$T_{f0}' = T_L \quad \text{Lufttemperatur, Brenner läuft nicht}$$

$$T_{wN+1}' = T_r \quad \text{Rücklauftemperatur}$$

N = Anzahl Abschnitte

Anfangsbedingungen (Kaltstart)

$$T_{fi}^0 = T_{zi}^0 = T_{wi}^0 = T_L$$

Die Rücklauftemperatur wie auch der Oberflächenverlust werden durch einfache lineare Beziehungen beschrieben (vgl. Abschnitt 5.3.6 und 5.3.7).

5.3.6. Behandlung des Oberflächenverlustes

Die ganze Berechnung im Modell erfolgt brutto. Damit ist gemeint, dass die Oberflächenverluste in der vom Brenngas auf das Heizwasser übertragenen Wärme enthalten sind. Im letzten Knoten auf der Wasserseite wird der Oberflächenverlustanteil schliesslich an das Außenwandelement übertragen. Von dort findet im Modell der Wärmeverlust an die Umgebung statt.

Aus den vollständigen Eingabedaten lässt sich der Strahlungsverlust bei Vollast bestimmen.

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_F - \dot{Q}_H - \dot{Q}_A$$

\dot{Q}_S = Oberflächenverlust/Strahlungsverlust

\dot{Q}_F = Feuerungswärmleistung

\dot{Q}_H = Heizwärmleistung

\dot{Q}_A = Abgasverlust

GI (5.13)

Damit lässt sich ein Wärmeübergangskoeffizient für den Oberflächenverlust bestimmen. Dieser wird wie die anderen Wärmeübergangskoeffizienten als temperaturunabhängig betrachtet.

Die Temperatur der Außenwand wird ausgedrückt durch die Gleichung

$$T_m^{t+1} = T_{wl}^t \cdot \frac{\alpha_w A}{C_m} + T_m^t \cdot \left(\frac{\alpha_w A}{C_m} - \frac{\alpha_v A}{C_m} \right) + T_L \cdot \frac{\alpha_v A}{C_m}$$

α_v = Wärmeübergangskoeffizient Oberfläche

$C_m = c_m \cdot m_m$

5.3.7. Die Rücklauftemperatur

Ein hydraulisches Wärmeverteilsystem bringt die Heizwärme vom Heizkessel zu den zu beheizenden Räumen. Dort wird die Wärme durch Konvektion/Strahlung an den Raum abgegeben. Die entsprechende Heizwärmeleistung kann geschrieben werden als

$$\dot{Q}_{Hn} = \alpha_R \cdot A_R \cdot \Delta T_n = \alpha_R \cdot A_R \cdot \left(\frac{T_{Vn} + T_{Rn}}{2} - T_L \right)$$

A_R = Wärmeabgabefläche (z.B. Radiator)

α_R = Wärmeübergangskoeffizient

Index n = Nennleistung (Vollast, Eingabedaten)

Bei konstantem Wärmeübergangskoeffizienten, ist die Heizwärmeleistung proportional zur Temperaturdifferenz ΔT .

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{Hn} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T_n} \quad GI (5.14)$$

Für die Heizwärmeleistung gilt auch

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_w \cdot (T_V - T_R) \quad GI (5.15)$$

Durch Auflösen von GI (5.15) nach der Rücklauftemperatur und durch Einsetzen von GI (5.14) kann damit ein Ausdruck für die T_R gefunden werden, welcher nur die Vorlauftemperatur als Variable enthält

$$T_R = T_V - \frac{\dot{Q}_{Hn} \cdot \Delta T}{\Delta T_n \cdot \dot{Q}_w} = T_V - \frac{T_{Vn} - T_{Rn}}{(T_{Vn} + T_{Rn} - 2 \cdot T_L)} \cdot (T_V + T_R - 2 \cdot T_L)$$

$$T_R = T_W \cdot \frac{1 - f_2}{1 + f_2} + \frac{2 \cdot f_2}{1 + f_2} \cdot T_L \quad GI (5.16)$$

$$\text{mit } f_2 = \frac{T_{Vn} - T_{Rn}}{(T_{Vn} + T_{Rn} - 2 \cdot T_L)}$$

5.4. Kondensation

Die Berücksichtigung der Kondensation erfolgt nach einem einfachen Ansatz. Die aus den Eingabedaten ermittelte Effectivness enthält die Kondensation grundsätzlich nicht. Erst bei der Berechnung der Temperaturverläufe werden für jeden Zeitschritt die Brenngastemperaturen in den einzelnen Abschnitten überprüft. Liegen diese tiefer als die Taupunkttemperatur wird die Effectivness so angepasst, dass die Kondensationswärme berücksichtigt wird.

Kondensation wird nur berücksichtigt wenn der Brenner läuft.

$$T_f < T_s \text{ (Taupunkttemperatur)}$$

$$\dot{Q}_k = \Delta h_k(T_f) \cdot m_b$$

$$\Delta h_k = r \cdot (x_v - x_s) \cdot \mu_{vtr}$$

\dot{Q}_k = Kondensationswärmeleistung

r = Verdampfungsenthalpie

x_v = Wasserbeladung im Abgas

x_s = Wasserbeladung gesättigt

$\mu_{vtr} = m_{vtr}/m_b$ auf Brennstoffmasse bezogene trockene Abgasmasse

Durch die Kondensation vergrößert sich die Wärmeleistung des Heizkessels. Bei gleicher Rücklauftemperatur resultiert eine höhere Vorlaufttemperatur oder eine bestimmte Vorlaufttemperatur kann von einer tieferen Rücklauftemperatur her erreicht werden. Der Einfluss der Kondensation zeigt sich im Verhältnis

$$\frac{T_{ad} - T_r}{T_{ad} - T_{rk}} = \frac{\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_f \cdot \varepsilon}}{\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_f \cdot \varepsilon} + \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}}} = \frac{\dot{Q} \cdot \dot{Q}_w}{\dot{Q} \cdot \dot{Q}_w + \dot{Q}_k \cdot \dot{Q}_f \cdot \varepsilon}$$

T_{rk} = Rücklauftemperatur bei Kondensation

Die Effectivness mit Kondensation lässt sich damit ausdrücken als

$$\varepsilon_k = \varepsilon \cdot \frac{\dot{Q} \cdot \dot{Q}_w}{\dot{Q} \cdot \dot{Q}_w + \dot{Q}_k \cdot \dot{Q}_f \cdot \varepsilon} \quad GI(5.17)$$

In GI (5.11) wird eine Beziehung zwischen der Effectivness für den Wärmeübergang auf der Heizwasserseite ε_w und jenem auf der Brenngasseite und demjenigen für den ganzen Wärmedurchgang hergestellt. Weil die Effectivness auf der Heizwasserseite durch die Kondensation nicht verändert wird, kann diese Gleichung nach ε_f aufgelöst werden und für die Bestimmung von ε_{fk} verwendet werden.

$$\varepsilon_{fk} = \frac{\varepsilon_w \cdot \varepsilon_k}{\varepsilon_w - Z_k \cdot \varepsilon_k} \quad GI(5.18)$$

mit

$$Z_k = Z \cdot \frac{\dot{Q} + \dot{Q}_k}{\dot{Q}}$$

Durch Einsetzen von GI (5.17) in GI (5.18) und Vereinfachen entsteht schliesslich

$$\varepsilon_{jk} = \frac{\varepsilon_w \cdot \varepsilon_k \cdot \varphi_w \cdot \varphi}{\varepsilon_w \cdot \varphi_w \cdot \varphi + \varepsilon_w \cdot \varepsilon_k \cdot \varphi_f \cdot \varphi_k - \varphi_f \cdot \varepsilon_k \cdot (\varphi + \varphi_k)} \quad GI (5.19)$$

Damit kann die Kondensation auf relativ einfache Art auch bei instationären Verhältnissen berücksichtigt werden.

Was im Modell jedoch nicht berücksichtigt wird, ist die Rückreaktion, die Verdampfung von Kondensat, wie sie beim Aufheizen des Kessels stattfinden kann. Sie wird vernachlässigt, weil davon ausgegangen wird, dass der verursachte Fehler relativ klein ist. Dazu trägt auch bei, dass bei den ersten Zeitschritten nach dem Brennerstart keine Kondensation berücksichtigt wird.

5.5. Start/Stop

Beim Einschalten des Brenners wird die Eintrittstemperatur im Modell von TL auf Tad gesetzt. In einem wirklichen Kessel findet der Einschaltvorgang kaum so abrupt statt. Die berechneten Abgastemperaturen steigen deshalb meist schneller an als die gemessenen.

Dies dürfte sich aber auf die berechneten Wirkungsgrade kaum auswirken, weil dieses Verhalten des Modells durch Kessel- und Heizwassermasse stark gedämpft wird. Für die Nutzungsgradberechnung werden nur die Wassertemperaturen benutzt (vgl. Abschnitt 5.2.2).

5.6. Auskühlen

Die Beschreibung der Phasen mit Brennerstillstand ist mit wesentlich mehr Unsicherheiten verbunden als diejenige der Phasen mit laufendem Brenner. Insbesondere die inneren Auskühlverluste können nur abgeschätzt werden. Als innere Auskühlverluste werden die Verluste durch die thermisch bedingten Strömungen in Brenngaskanal und Kamin bei Brennerstillstand bezeichnet.

Der anlässlich der Typenprüfung zu messende Bereitschaftsverlust setzt sich hauptsächlich aus den temperaturabhängigen Oberflächenverlusten und inneren Auskühlverlusten zusammen. Bei bekannten Oberflächenverlusten sollte auf die inneren Auskühlverluste geschlossen werden können.

Ist der Oberflächenverlust eines Heizkessels nicht bekannt, sollte es trotzdem möglich sein, sowohl die inneren Auskühlverluste als auch die Oberflächenverluste zu bestimmen, wenn die Zykluszeiten der Bereitschaftsverlustmessung bekannt sind.

5.7. Umrechnen auf ein anderes tV-tR-Paar

Oft liegen die verfügbaren Messungen für das Vorlauf-/Rücklauf-Temperaturpaar bei 80/60°C vor. Der Normnutzungsgrad setzt aber 75/60°C voraus oder falls möglich sogar 40/30°C.

Es ist eine einfache Möglichkeit gefunden worden, mit welcher sich die gegebenen Eingabewerte auf ein anderes Temperaturpaar umrechnen lassen.

Analog zum Vorgehen beim Einstellen der Temperaturen am wirklichen Heizkessel wird im Modell die Last und der Heizwasserumlauf verändert, bis das gewünschte Vorlauf-/Rücklaufpaar erreicht ist.

Durch das Ändern der Last verändert sich die Mitteltemperatur des Heizwassers. Während sich durch die Änderung des Umlaufs ΔT die Spreizung zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur ändert.

5.8. Ändern von tL

Die gemessenen Vollasttemperaturen sind von den Messbedingungen, speziell von der Umgebungstemperatur abhängig. Mit einem einfachen Ansatz wird im Modell diese Abhängigkeit erfasst, so dass die Eingabedaten auf eine andere Umgebungstemperatur umgerechnet werden können. Dies kann verwendet werden, um die Berechnungen immer bei der gleichen Umgebungstemperatur (z.B. 20°C) durchzuführen.

Dem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Effectivness (vgl. Abschnitt 5.3.3) bei Änderung der Umgebungstemperatur nicht ändert.

5.9. Implementierung

Ein Modell mit diskreten Zeitschritten kann relativ rasch in einer Tabellenkalkulation (z.B. Excel) realisiert werden. Dieser Weg ist denn auch gewählt worden für die Ausarbeitung der Methode.

Die Entwürfe sind anschliessend in der Entwicklungsumgebung Delphi in ObjectPascal implementiert worden. Entstanden ist das Programm NNGModell, das sich über eine grafische Benutzeroberfläche bedienen lässt (vgl. Abbildung 6.1). Das Programm läuft unter Windows95/98 und NT.

Das Hauptaugenmerk bei der Programmentwicklung galt den technischen Aspekten der Modellierung. Die Benützerschnittstelle hatte dem zu dienen und ist deshalb für einen aussenstehenden Anwender sicher noch nicht optimal.

6. Arbeiten mit dem Rechenprogramm

6.1. Installation

Die benötigten Dateien liegen als selbstentpackendes Archiv 'nng.exe' vor. Durch Doppelklicken des Icons wird das Archiv entpackt und der Ordner 'NNG Modell 1.0b' angelegt. Darin befinden sich eine Kurzanleitung, ein Ordner 'Daten' und das eigentliche Rechenprogramm 'nng_modell.exe'. Der Ordner 'Daten' muss immer im gleichen Ordner liegen wie das Programm 'nng_modell.exe'. Im Ordner 'Daten' muss sich die Eingabedatei 'standardwerte.txt' befinden. In diesen Ordner schreibt das Programm die berechneten Ausgabedateien.

6.2. Dateneingabe

Das Programm NNGModell, wie es sich hier präsentiert, ist als unfertige Entwicklungsversion zu betrachten, welche weder über eine fertige Benutzeroberfläche noch über eine umfassende Fehlerbehandlung verfügt. Solange keine sinnlosen Daten eingegeben werden, sollten aber normalerweise brauchbare Resultate erhalten werden können.

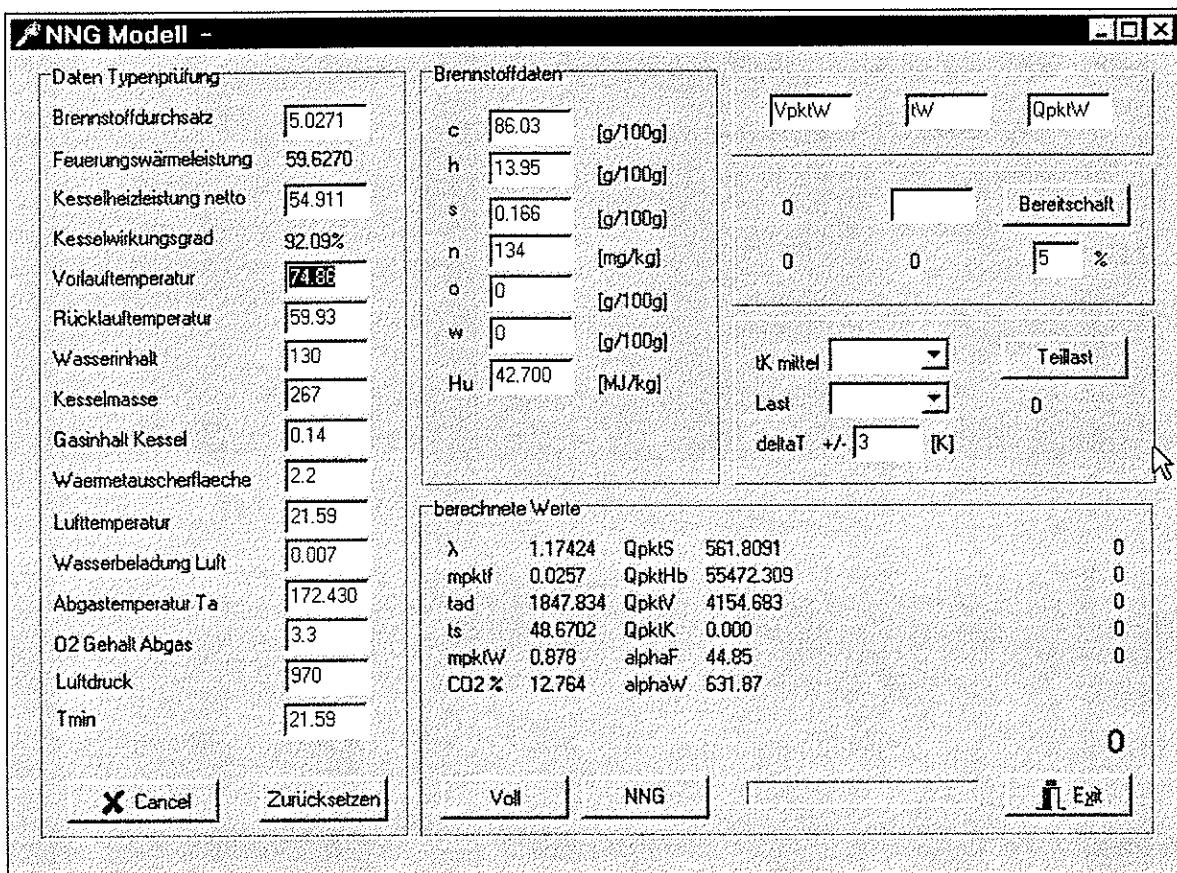


Abbildung 6.1 Das Arbeitsfenster des NNGModells wie es sich nach dem Programmstart präsentiert. Die bereits eingetragenen Heizkesseldaten sind aus der Datei 'standardwerte.txt' eingelesen worden. Zu den meisten Datenfeldern werden Erklärungen und die erforderlichen Einheiten (Balloon-Help) sichtbar, wenn der Mauszeiger an die betreffende Stelle geführt wird.

Gewisse Felder des Arbeitsfensters sind für die Dateneingabe gesperrt, um unbeabsichtigte Fehler zu verhindern. Diese Werte sind nur über das Eingabefile 'standardwerte.txt' zugänglich. Es ist wichtig, dass die Daten im 'standardwerte.txt' konsistent sind, also vollständig aus der selben Messsession stammen.

Insbesondere gilt es zu berücksichtigen, dass das Modell weder mit mehrstufigen noch mit modulierenden Brennern sondern nur mit einstufigen Brennern umgehen kann.

6.2.1. Daten Typenprüfung

Es ist wichtig, dass die Betriebsdaten konsistent sind. Sie sollten also vollständig von der gleichen Vollastmessung stammen. Andernfalls wird der Heizkessel verfälscht modelliert.

Die Dateneingabe muss immer mit der ENTER-Taste abgeschlossen werden. Der Cursor springt dabei auf das nächste Feld.

- *Brennstoffdurchsatz*
Das Feld ist gegen Eingabe geschützt.
- *Kesselheizleistung netto*
Das Feld ist gegen Eingabe geschützt.
- *Vorlauftemperatur*
Die Vorlauftemperatur kann verändert werden. Eine Neuberechnung wird ausgelöst nachdem auch das Feld für die Rücklauftemperatur durch Drücken der ENTER-Taste verlassen wird.
- *Rücklauftemperatur*
Die Rücklauftemperatur kann verändert werden. Beim Verlassen des Feldes durch Drücken der ENTER-Taste wird eine Neuberechnung gestartet, falls bei der Vorlauf- oder/und bei der Rücklauftemperatur eine Änderung vorgenommen worden ist.
Diese Umrechnung auf ein anderes Vorlauf-/Rücklauftemperaturpaar wird auch durchgeführt, wenn eine Normnutzungsgradberechnung durch Drücken des NNG-Buttons gestartet wird und das vorhandene Temperaturpaar nicht dem Soll entspricht.
- *Wasserinhalt*
Wasserinhalt des Heizkessels. Der Wert kann geändert werden.
- *Kesselmasse*
Gewicht des Heizkessels ohne Wasser. Der Wert kann geändert werden.
- *Gasinhalt*
Volumen des Brenngaskanals. Der Wert kann geändert werden.
- *Wärmetauscherfläche*
Die Wärmetauscherfläche ist die Kontaktfläche zwischen Brenngaskanal und Heizwasserkanal. Die Grösse der Wärmetauscherfläche ist normalerweise nicht verfügbar. Sie wird deshalb in Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung abgeschätzt. Weil das Produkt $A \cdot k$ durch die Eingabedaten bestimmt wird (vgl. Abschnitt 5.3.3), wird durch die Bestimmung der Wärmetauscherfläche auch der Wärmedurchgangskoeffizient k festgelegt und damit die Wärmeübergangskoeffizienten auf der Brenngas- und auf der Heizwasserseite. Diese Werte kommen mit der verwendeten einfachen Abschätzung für die Wärmetauscherfläche meistens in einen realistischen Bereich zu liegen. Trotzdem wird hier noch ein verfeinerter Ansatz zu suchen sein.
Die Grösse der Wärmetauscherfläche kann geändert werden.
- *Lufttemperatur*
Temperatur der Umgebungsluft. Der gleiche Wert wird auch für die Verbrennungsluft gesetzt. Der Wert kann geändert werden. Beim Verlassen des Feldes durch Drücken der ENTER-Taste wird eine Neuberechnung ausgelöst. Die von der Änderung betroffenen Kesseldaten werden angepasst (vgl. Abschnitt 5.8).
- *Wasserbeladung Luft*
Wasserbeladung der Verbrennungsluft. Diese beeinflusst die Zusammensetzung der Verbrenngase und hat Auswirkungen auf die Kondensation. Der Wert kann geändert werden.
- *Abgastemperatur*
Abgastemperatur bei Vollast. Der Wert kann geändert werden. Es ist jedoch Vorsicht geboten, weil damit der Eingabedatensatz verfälscht wird. Bei der durch die Änderung ausgelösten Anpassung der

anderen Vollastdaten wird die Annahme getroffen, dass die Vorlauftemperatur und damit der Oberflächenverlust konstant bleiben. Die Änderungsmöglichkeit ist lediglich vorgesehen, weil die Abgastemperaturen in Datensätzen teilweise nur ungefähr angegeben sind (z.B. in Herstellerprospekt) und deshalb angepasst werden können müssen.

- *O₂-Gehalt Abgas*
Restsauerstoffgehalt im Abgas. Der Wert kann geändert werden. Die anderen Vollastdaten werden entsprechend angepasst. Die Effectivness wird dabei als konstant angenommen.
- *Luftdruck*
Umgebungsdruck im Heizraum. Dieser Druck wird für die Bestimmung des Taupunktes der Abgase verwendet. Vom Umgebungsdruck abweichende Druckverhältnisse im Brenngaskanal werden nicht berücksichtigt.
- *T_{min}*
Minimal zulässige Vorlauftemperatur des Heizkessels. Oft geben Hersteller diese Temperatur für ihre Heizkessel an. Damit soll eine unerwünschte Kondensation der Abgase in dafür nicht vorgesehenen Kesseln verhindert werden.
Diese Minimaltemperatur hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Normnutzungsgrad.

6.2.2. Brennstoffdaten

Der Brennstoff muss durch seine Elementaranalyse und den Heizwert bestimmt sein. Die Elementaranalyse wird für die Bestimmung des Brenngasmassenstroms benötigt. (vgl. Abschnitt 5.3)

Sämtliche Brennstoffdatenfelder sind gegen Eingabe gesperrt, weil durch Änderungen der Wirkungsgrad unbeabsichtigt verändert werden kann.

6.2.3. Berechnete Werte

Die nach dem Programmstart im Bereich 'berechnete Werte' aufgeführten Daten, sind vom Programm aus den Eingabedaten bestimmt worden. Es sind dies

- *Luftverhältnis λ*
wird durch die Verbrennungsrechnung bestimmt
- *Brenngasmassenstrom mpktf*
wird durch die Verbrennungsrechnung bestimmt
- *Adiabate Verbrennungstemperatur tAd*
- *Taupunkttemperatur Abgas tS*
- *Heizwassermassenstrom mpktw*
- *CO₂- Gehalt in Volumenprozent im Abgasstrom CO2%*
wird durch die Verbrennungsrechnung bestimmt
- *Oberflächenverlust, Strahlungsverlust QpktS*
- *Kesselheizleistung brutto QpktHb*
Dies ist die Summe aus Kesselheizleistung netto und Oberflächenverlust ($QpktHb = QpktHn + QpktS$). Wenn der Oberflächenverlust für einen Kessel nicht bestimmbar ist, wird $QpktS = 0$ gesetzt. Der Heizkessel wird also brutto berechnet
- *Abgasverlust QpktV*
Es gilt: $QpktHb = QpktF - QpktV$. $QpktF$ ist die Feuerungswärmeleistung.
- *Kondensationswärme QpktK*
Es gilt falls Abgastemperatur $tF < tS$: $QpktHb = QpktF - QpktV + QpktK$
- *Wärmeübergang Brenngas- Wand alphaF*
- *Wärmeübergang Wand-Heizwasser alphaW*

6.3. Rechenoptionen

Für alle Rechenzyklen werden die Vorlauf-, die Rücklauf- und die Abgastemperaturen sowie die Laufzeit in eine txt-Datei in den Ordner 'Daten' geschrieben. Diese Dateien können einfach in eine Tabelenkalkulation importiert und weiterbearbeitet werden.

6.3.1. Vollast

Durch Drücken des Buttons 'Voll' wird eine Vollastberechnung durchgeführt. Dabei wird der Brenner eingeschaltet und der Heizkessel von Raumtemperatur bis zum Vollastgleichgewicht aufgeheizt. Die Berechnung wird beendet wenn sich die Temperaturen nicht mehr ändern. Die Abgastemperatur wird im vorhandenen Feld durch den neuen Wert ersetzt.

Der Vollastzyklus wird in die Datei output_v.txt geschrieben.

6.3.2. Teillast

Durch Drücken des 'Teillast' Buttons kann ein Teillastzyklus gestartet werden. Eingabeparameter sind die gewünschte, über den Zyklus gemittelte Hezwassertemperatur ($T_{Kmittel} = (T_V + T_R)/2$) und die Laststufe.

Werden keine Werte für $t_{Kmittel}$ und Last eingegeben oder ausgewählt werden die Werte für 30%-Teillast nach EN gesetzt.

Weiter kann die Schaltdifferenz (Differenz zwischen Einschalt- und Ausschalttemperatur) des Heizkesselthermostates verändert werden. Eine Änderung hat natürlich auch Auswirkungen auf den Bereitschaftsverlust- und den Normnutzungsgradzyklus.

Der Teillastzyklus wird in die Datei output_t.txt geschrieben.

6.3.3. Normnutzungsgrad

Durch Drücken des Buttons 'NNG' wird die Normnutzungsgradbestimmung nach DIN 4702 gestartet. Es sind Berechnungen bei den Vorlauf-/Rücklauftemperaturpaaren 75/60, 40/30 und 90/70 möglich. Ist die Vorlauftemperatur $t_V > 50.0^\circ\text{C}$ und $t_V < 85.0^\circ\text{C}$ wird die Berechnung bei 75/60 durchgeführt. Bei $t_V < 50.0^\circ\text{C}$ wird für 40/30 gerechnet bei $t_V > 85^\circ\text{C}$ bei 90/70.

Ausgegeben werden für jede Laststufe der entsprechende Teillastnutzungsgrad und die mittleren Vorlauf- und Rücklauftemperaturen.

Die einzelnen Teillastzyklen zum Normnutzungsgrad werden in die Dateien output13.txt, output30.txt, output39.txt, output48.txt und output63.txt geschrieben.

6.3.4. Bereitschaftsverlust

Durch Drücken des 'Bereitschaft'-Buttons wird der Bereitschaftsverlust berechnet. Diese Funktion befindet sich noch im Experimentierstadium. Ziel ist es, eine Verbindung zwischen Oberflächenverlust und Bereitschaftsverlust herzustellen (vgl. 5.3.6 und 5.6).

Die Prozentangabe unter dem 'Bereitschaft'-Button dient dazu, die innere Auskühlung einzustellen. 5% bedeutet, dass der Gasmassenstrom im Stillstand 5% des Brenngasmassenstroms bei laufendem Brenner entsprechen soll.

Auf der Wasserseite wird bei Brennerstillstand ebenfalls eine Umwälzung angenommen. Diese dient dazu, die Durchmischung des Wassers und die Auskühlung überhaupt zu ermöglichen. Der Wert dieser Umwälzung kann nicht verändert werden.

Mit dem Feld für die Bereitschaftsverlusteingabe ist noch kein Ereignis verbunden.

Bei abgeschlossener Berechnung werden der Bereitschaftsverlust, die Brennerlaufzeit und die totale Zyklusdauer ausgegeben.

Der Teillastzyklus wird in die Datei output_b.txt geschrieben.

6.3.5. Kühlwasserleistung Q_{pktW}

Bei Messungen an Heizkesseln wird die erzeugte Heizwärme üblicherweise durch Mischen des Vorlaufwassers mit Zulaufwasser abgeführt. Durch Eingabe des Volumenstromes V_{pktW} und der Temperatur t_W des Zulaufwassers kann die abführende Wärmeleistung oder Kühlwasserleistung bestimmt werden. Diese stimmt mit der Kesselheizleistung netto überein, wenn der Kühlkreislauf als verlustfrei angenommen wird.

6.3.6. Hilfsfunktionen

- *Cancel*
Mit dem 'Cancel'-Button sollten die meisten hängenden Berechnungen gestoppt werden können. Wenn das Programm darauf nicht reagiert, kann es nur noch über die Taskleiste von Windows beendet werden. (Rechte Maustaste auf dem Programmikon drücken und im Kontextmenü 'Schliessen' wählen)
- *Zurücksetzen*
Durch Drücken des 'Zurücksetzen'-Buttons werden alle Werte im Eingabefenster auf den Anfangswert zurückgesetzt.
- *Exit*
Beendet das Programm.

7. Vergleiche Messung – Rechnung

7.1. Zur Verfügung stehende Daten

Es gestaltete sich als relativ schwierig, an die benötigten Datensätze für die Entwicklung und Überprüfung des Modells zu kommen.

Aus dem vorangegangenen Projekt standen Messdaten von Normnutzungsgraden von 8 nicht kondensierenden Heizkesseln mit einstufigen Oelbrennern zur Verfügung.

Weiter sind von einem Hersteller mehrere Messungen aus der eigenen Werkprüfstelle zur Verfügung gestellt worden.

Im Rahmen des Projekts sind zudem Messungen an zwei weiteren Heizkesseln an der EMPA durchgeführt worden. Weitere Angaben dazu sind im Abschnitt 8 zu finden.

Weitere Normnutzungsgradzahlen konnten einem Herstellerprospekt entnommen werden.

	Brennstoff	Feuerungswärmeleistung [kW]	Min. Kesseltemp [°C]	Kondensieren	Brenner	Kesselmasse [kg]	Wasserinhalt [kg]	Messung von
Kessel 1	Heizoel	19.7	-	nein	einstufig	133	64	EMPA
Kessel 2	Heizoel	64.3	35	nein	einstufig	532	65	EMPA
Kessel 3	Heizoel	20.8	38	nein	einstufig	160	36	EMPA
Kessel 4	Heizoel	59.6	35	nein	einstufig	267	130	EMPA
Kessel 5	Heizoel	65.5	40	nein	einstufig	332	132	EMPA
Kessel 6	Heizoel	21.1	30	nein	einstufig	230	37	EMPA
Kessel 7	Heizoel	69.1	40	nein	einstufig	225	15	EMPA
Kessel 8	Heizoel	26.1	30	nein	einstufig	118	42	EMPA
Kessel 10	Heizoel	16.6	-	nein	einstufig	143	61	Viessmann
Kessel 11	Heizoel	20	-	nein	einstufig	159	70	Viessmann
Kessel 12	Heizoel	52.8	-	ja	einstufig	290	87	EMPA
Kessel 14	Gas	13.5	-	ja	einstufig	50	1.3	EMPA
Kessel 15	Gas	83	-	ja	?	247	180	Viessmann
Kessel 16	Gas	11.7	-	ja	?	89	25	Viessmann

Tabelle 7.1 Zusammenstellung der zur Verfügung stehenden Normnutzungsgradmessungen. Die Daten von Kessel 15 und 16 entstammen Verkaufs-/Planungsunterlagen von Viessmann.

7.2. Vergleich der Normnutzungsgrade

Die Vergleiche bei den mit Oel betriebenen, nicht kondensierenden Heizkesseln fallen alle recht gut aus. Sie unterscheiden sich auch untereinander nicht gross. Es wird deutlich, dass diese Geräte mit dem Normnutzungsgrad nicht besser unterschieden werden können als mit dem Volllastwirkungsgrad. Erst die Normnutzungsgrade der kondensierenden Geräte liegen deutlich höher, während sich die dazugehörigen Volllastwirkungsgrade nicht so deutlich von den nicht kondensierenden abheben.

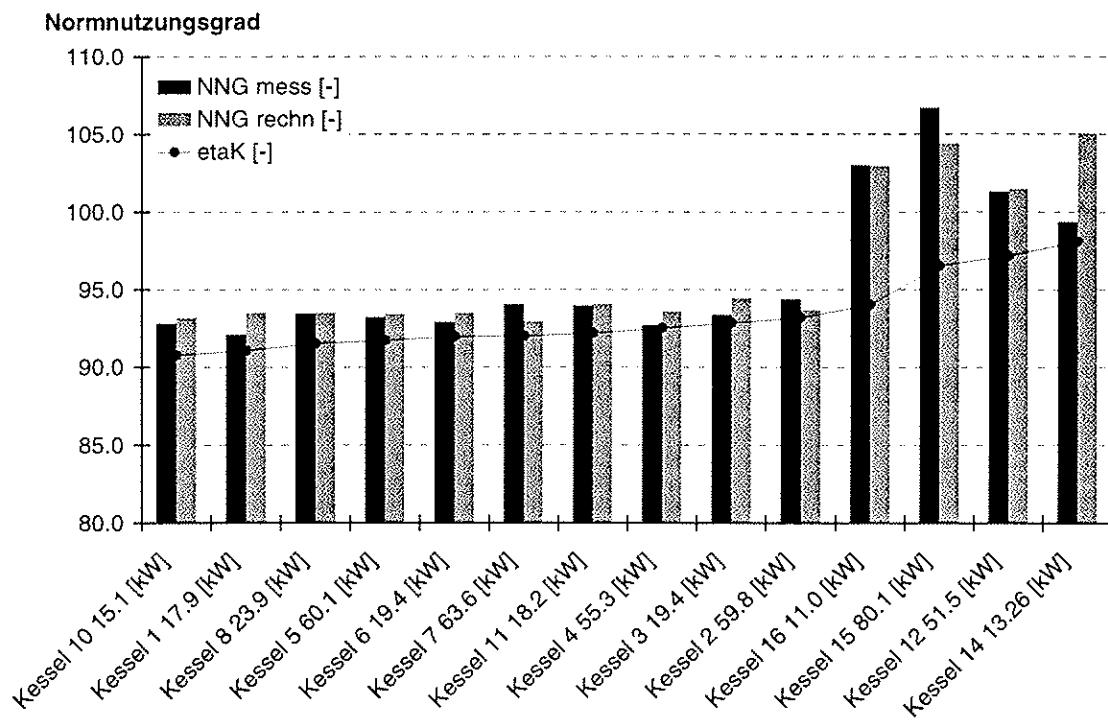


Abbildung 7.1 Vergleich der berechneten (NNG rechn) und gemessenen (NNG mess) Normnutzungsgrade von 14 unterschiedlichen Heizkesseln. Die Geräte sind nach zunehmendem Vollastwirkungsgrad (etaK) angeordnet. Kessel 1 bis 8 sowie 12 sind Ölheizkessel und wurden an der EMPA gemessen. Kessel 10 und 11 sind ebenfalls Ölheizkessel. Die Messungen sind beim Hersteller durchgeführt worden. Die Kessel 15 und 16 werden mit Gas betrieben. Die Eingabedaten stammen aus einem Herstellerprospekt. Kessel 14 schliesslich ist ein mit Gas betriebenes Wandheizergerät, das an der EMPA gemessen wurde.

Schlecht ist die Uebereinstimmung beim Gas-Wandgerät. Dies ist vermutlich teilweise auf den für diese Geräteart ungewöhnlichen nur taktenden Betrieb zurückzuführen (vgl. Abschnitt 8.2). Entsprechende Messungen mit modulierendem statt nur taktendem Brenner liegen deutlich höher und damit in der Nähe der Rechnung.

In Abbildung 7.2 können die einzelnen gemessenen und gerechneten Teillastnutzungsgrade verglichen werden. Der ebenfalls eingetragene Vollastwirkungsgrad (Last = 1.0) gehört nicht zum Normnutzungsgrad.

Auffallend ist, wie sich die minimal zulässige Kesseltemperatur beim Modell stärker auswirkt als bei den Messungen (abfallende Kurve zur tiefsten Last). Eine minimale Kesseltemperatur ist bei allen Kesseln ausser bei den Kesseln 1 und 12 berücksichtigt. Bei allen mit Minimaltemperatur weist die tiefste Teillaststufe (Last = 0.13) einen tieferen Nutzungsgrad auf als die vorhergehende. Dies ist auch bei einigen Messungen zu beobachten, jedoch nie so deutlich wie bei der Rechnung. Die Ursache dieses Verhaltens könnte beim offensichtlich zu stark temperaturabhängig modellierten Oberflächenverlust liegen. (vgl. dazu auch Abschnitt 7.4)

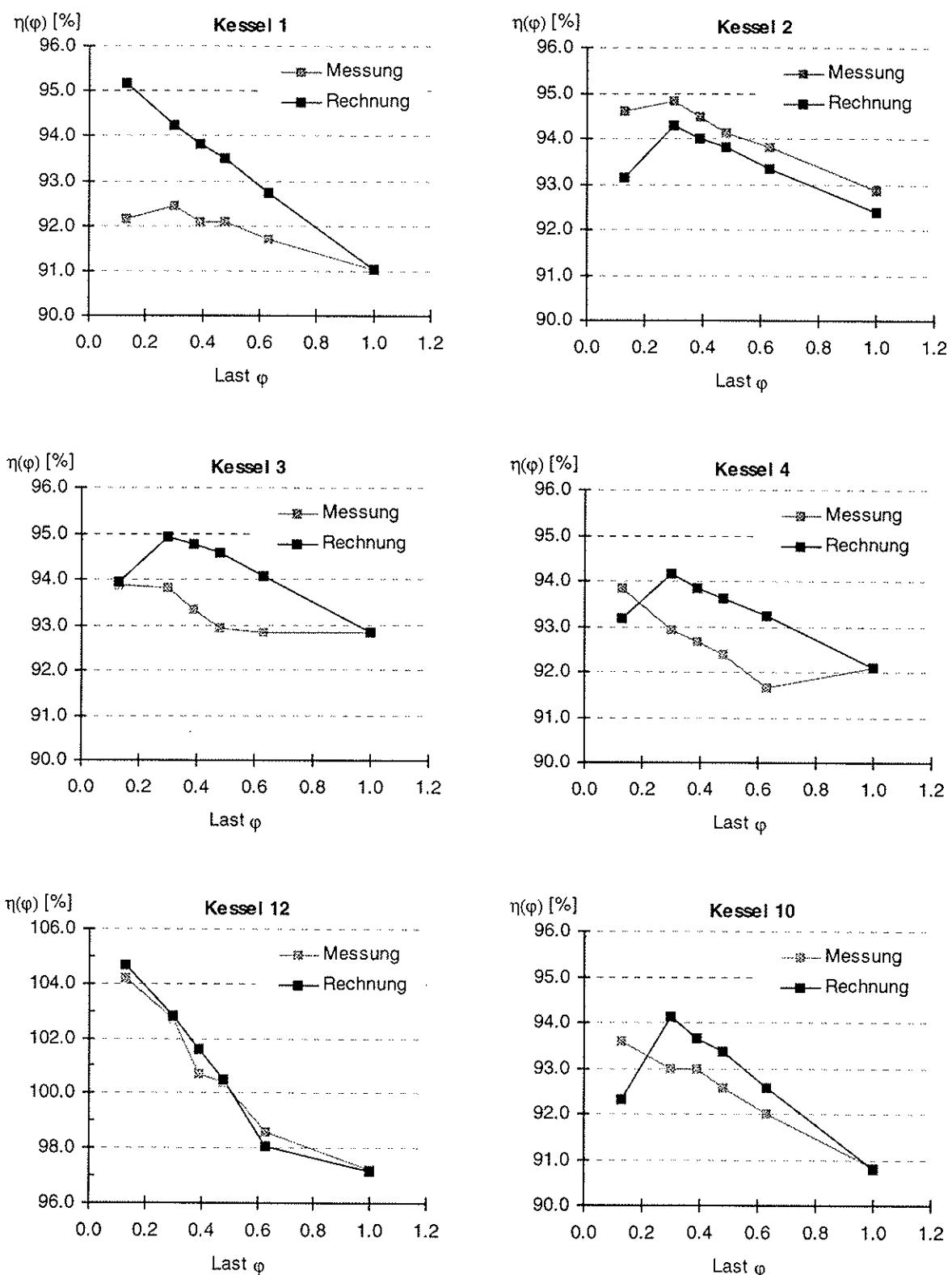


Abbildung 7.2 Vergleich Messung und Rechnung der Nutzungsgrade bei den fünf Laststufen des Normnutzungsgrades. Last = 1.0 entspricht dem Volllastwirkungsgrad.

Wie in Abschnitt 6.2.1 erwähnt, wird die Wärmetauscherfläche mit einem sehr einfachen Ansatz abgeschätzt. Die Berechnungen mit dem Modell zeigen jedoch, dass die Resultate verschiedener Heizkessel relativ stark von der Wahl dieser Größe abhängen.

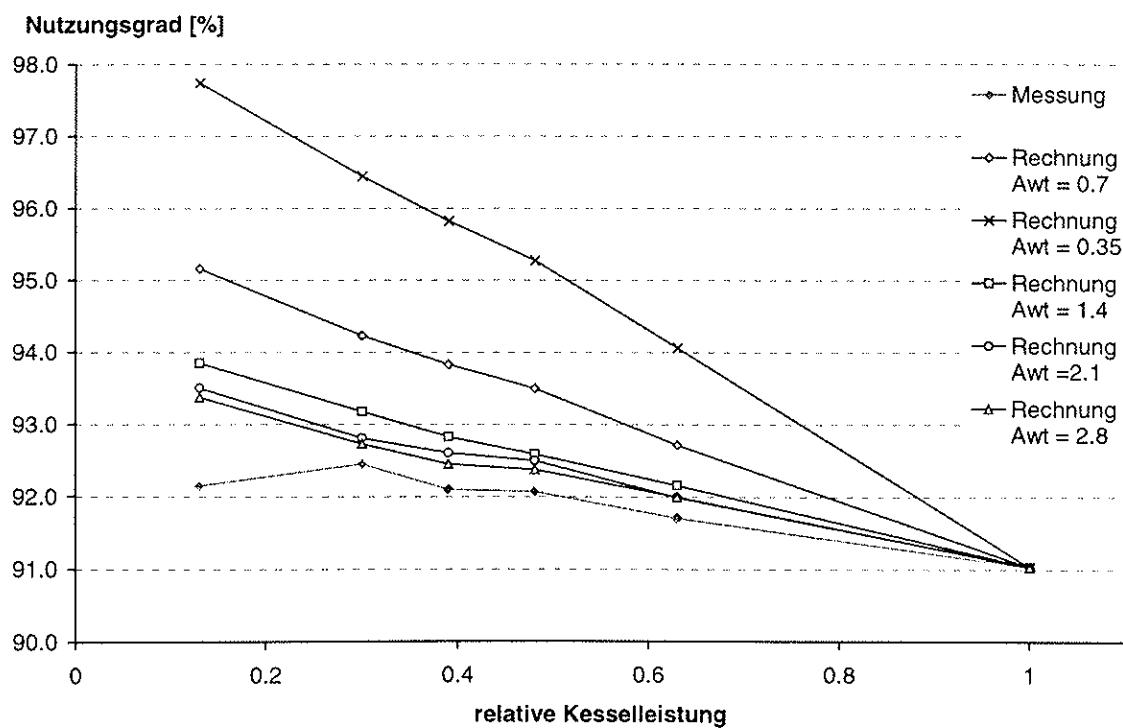


Abbildung 7.3 Abhängigkeit der mit dem Modell berechneten Nutzungsgrade von der gewählten Wärmetauscherfläche (A_{wt}). Der Ansatz des Modells bestimmt die Wärmetauscherfläche für diesen Heizkessel (Kessel 1) mit $A_{wt} = 0.7 \text{ m}^2$. Dies ist offensichtlich etwas zu klein.

Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 erwähnt sind Verbesserungen bei diesem Punkt notwendig. Es soll aber das Ziel bleiben, die Berechnungen mit dem Modell unabhängig von schwierig erhaltlichen Daten zu ermöglichen.

7.3. Vergleich 30%-Teillastnutzungsgrade

Der Vergleich Messung- Rechnung des 30% Teillastnutzungsgrades nach EN fällt nicht grundsätzlich anders aus als der Vergleich der Normnutzungsgrade.

Die Rechnungen liegen verglichen mit den Normnutzungsgraden eher häufiger tiefer als die Messungen.

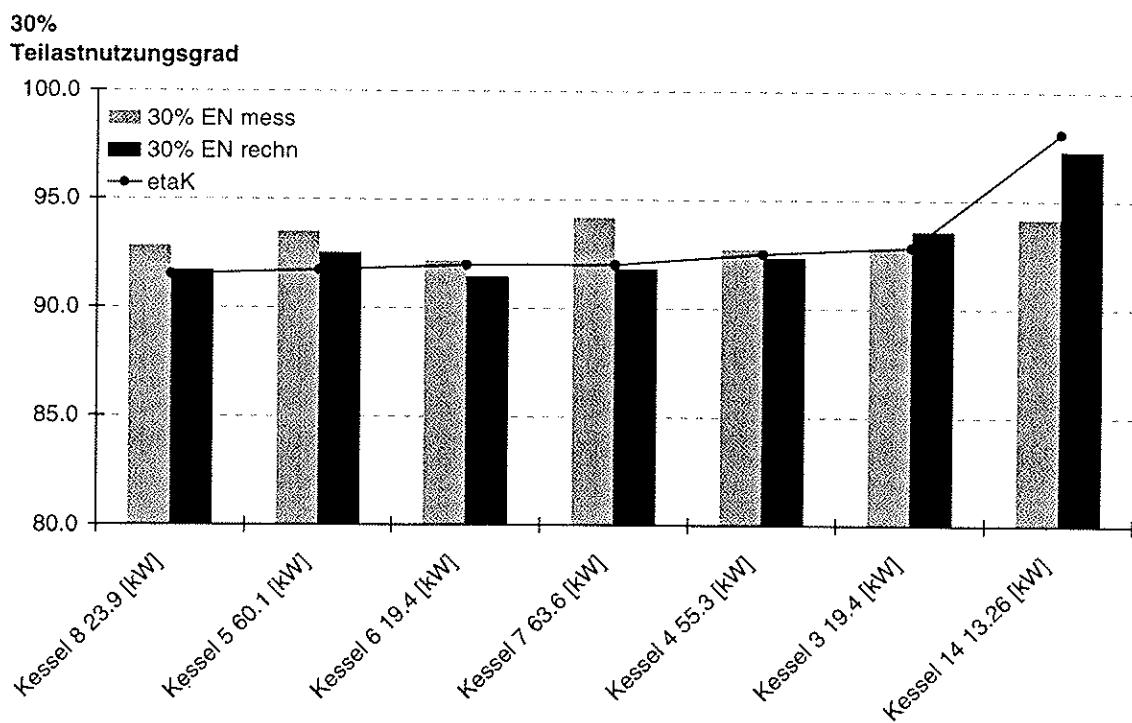


Abbildung 7.4 Vergleich Messung-Rechnung für den 30% Teillastnutzungsgrad nach EN. Kessel 14 entspricht den Messungen des taktend betriebenen Gas-Wandgeräts. Die restlichen Kessel sind nicht kondensierende Ölheizkessel.

7.4. tV/tR Änderung

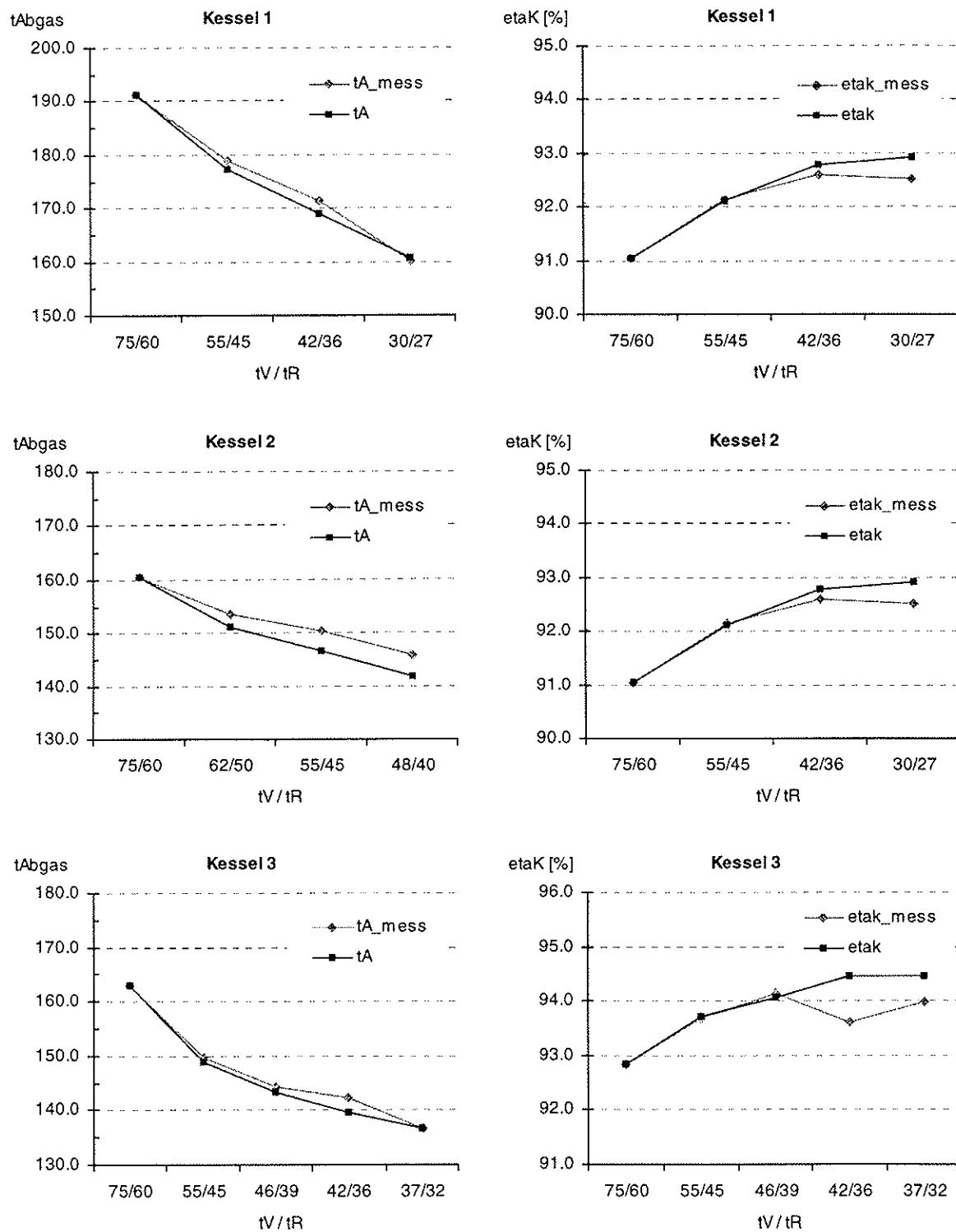


Abbildung 7.5 Vergleich Messung Rechnung: Umrechnung vom gegebenen T_V/T_R -Paar 75/60°C auf andere T_V/T_R -Paare (Vollast)

Das Programm kann ein gegebenes auf ein neues Vorlauf-/Rücklauf-Temperaturpaar umrechnen (vgl. Abschnitt 5.7). Der Vergleich mit den Messungen fällt recht gut aus. Offensichtlich werden die Oberflächenverluste im Modell zu optimistisch behandelt. Dies würde jedenfalls den immer etwas zu hoch liegenden Wirkungsgrad bei tiefen Temperaturen erklären.

In Abbildung 7.6 sind ausgehend von den Vollastdaten bei 80/60°C die Vorlauf/Rücklauftemperaturen umgerechnet worden auf 75/60°C, 40/30°C, 90/70°C. Dazu sind schliesslich je die entsprechenden Normnutzungsgrade bestimmt worden:

	75/60°C	40/30°C	90/70°C
Messwerte	106.7 %	109.0 %	103.8 %
gerechnet	105.5 %	108.8 %	103.9 %

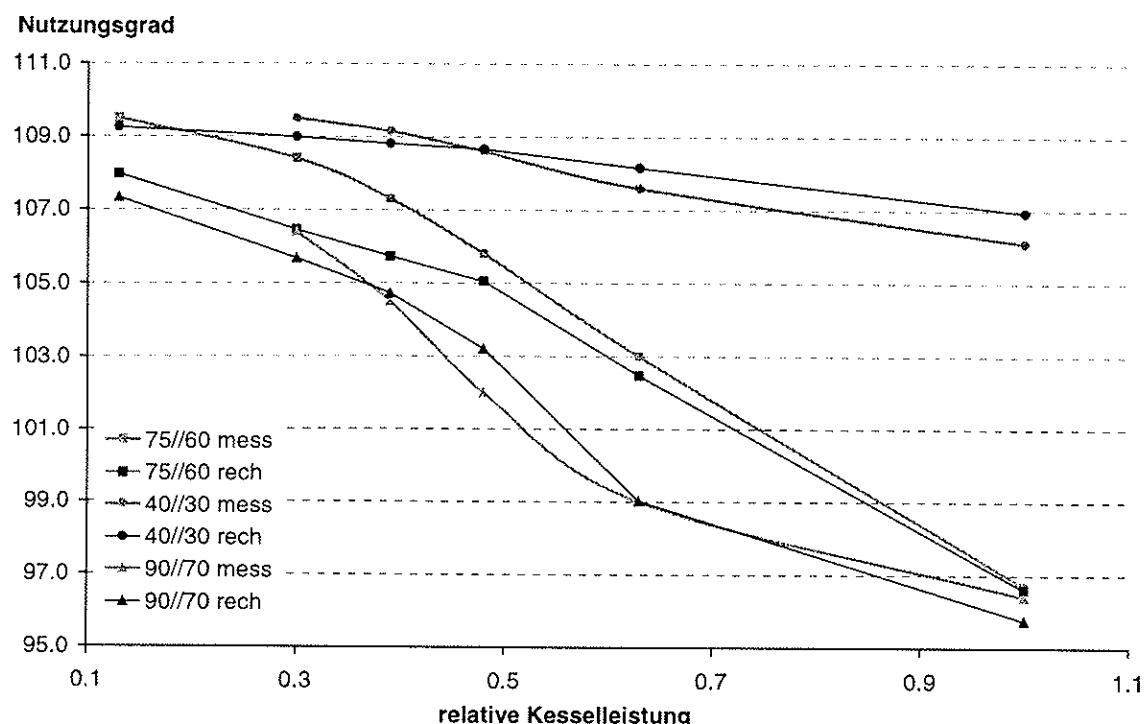


Abbildung 7.6 Vergleich Messung-Rechnung (Kessel 15) der Nutzungsgrade für die einzelnen Teillaststufen der Normnutzungsgrade bei 75/60°C, 40/30°C und 90/70°C. Die Messwerte sind [16] entnommen.

Diesem Vergleich mit Daten aus Prospektunterlagen darf sicher nicht zuviel Bedeutung beigemessen werden. So geht daraus nicht hervor, auf welcher Nennleistung der Kesselreihe die Messungen beruhen. Ebenso ist nicht bekannt welche Brennerart (modulierend, einstufig oder zweistufig) verwendet worden ist. Immerhin ist wieder das gleiche Verhalten des Modells ersichtlich wie in Abbildung 7.5. Bei der Umrechnung auf ein anderes Temperaturpaar wird der Oberflächenverlust nicht ganz zufriedenstellend behandelt. Die Temperaturabhängigkeit ist zu stark ausgeprägt. Der berechnete Vollastwirkungsgrad (relative Kesselleistung = 1) liegt bei 40/30°C entsprechend zu hoch und bei 90/70°C zu tief.

Weshalb die berechneten Punkte für die tieferen relativen Kesselleistungen bei 75/60°C verhältnismässig schlecht liegen, ist anhand der Unterlagen nicht nachvollziehbar.

7.5. Sensitivität des Modells

Die Empfindlichkeit des Modells bezüglich ungenauer Eingabedaten ist noch nicht systematisch untersucht worden. Gewisse Schwierigkeiten in Zusammenhang mit der Wärmetauscherfläche sind in Abschnitt 7.2 dargestellt worden.

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Modell zeigen, dass sich Änderungen der Geometriedaten relativ gering auf die berechneten Nutzungsgrade auswirken.

Wird beispielsweise die Kesselmasse verkleinert, verkleinert sich auch die Wärmespeicherkapazität des Heizkessels und damit die Stillstandszeit des Brenners. Die Aufheizdauer verkürzt sich aber ebenfalls. Das Verhältnis zwischen Brennerlauf und Brennerstillstand bleibt etwa erhalten und damit auch der berechnete Nutzungsgrad.

Sollen jedoch die Zykluszeiten (z.B. Brennerlaufzeit) mit den tatsächlichen des Heizkessels übereinstimmen, müssen die Geometriewerte in relativ engen Grenzen liegen.

7.6. Kondensation

Über das Kondensationsverhalten des Modells kann noch nicht viel gesagt werden. Dazu konnten einfach noch zu wenig Vergleiche mit kondensierenden Heizgeräten angestellt werden. Die Übereinstimmung bei Kessel 12, bei welchem die Kondensation eine wesentliche Rolle spielt, fällt aber gut aus.

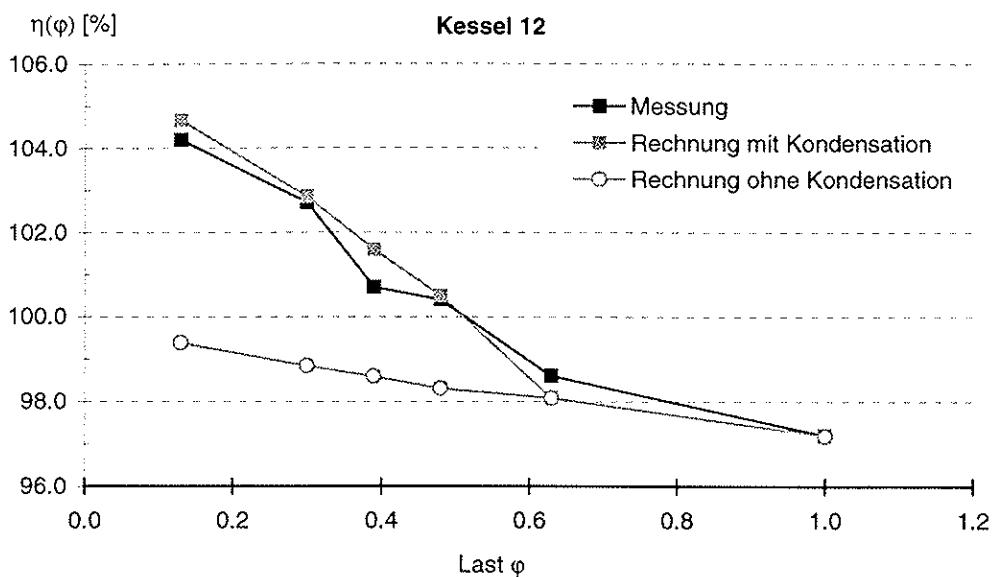


Abbildung 7.7 Vergleich Messung – Rechnung für Heizkessel 12. Die Rechnung mit dem Modell ist einmal mit Berücksichtigung der Kondensation und einmal ohne Berücksichtigung der Kondensation durchgeführt worden. Es wird deutlich, dass nur mit Kondensation eine gute Uebereinstimmung erreicht wird.

Bei Kessel 14 (Gas-Wandgerät) sind im einstufigen, getakteten Betrieb die Schaltzyklen so kurz, dass sich bildendes Kondensat beim nächsten Brennerstart vermutlich gleich wieder verdampft. Dies ist eine mögliche Interpretation der Messungen (vgl im Anhang 2: Messresultate) welche im Mittel keine Kondensation ausweisen (Nutzungsgrade < 100%). Im Modell wird die Rückverdampfung von Kondensat nicht berücksichtigt. Darin liegt vermutlich ein Grund für die schlechte Uebereinstimmung Messung – Rechnung bei Kessel 14 (vgl Abschnitt 5.4). Wenn sich das Fehlen der Rückverdampfung bei weiteren Heizgeräten als Problem erweisen sollte, müsste im Modell ein entsprechender Ansatz ergänzt werden.

7.7. Einschränkung

Das Modell in der vorliegenden Version besitzt noch Entwicklungsstatus und darf nicht als fertiges Produkt betrachtet werden. Insbesondere ist noch keine gründliche Validierung durchgeführt worden (vgl. in diesem Zusammenhang auch mit Abschnitt 7.5).

Das Modell ist noch nicht vorgesehen für Heizkessel mit mehrstufigen oder modulierenden Brennern. Die Berechnungsmöglichkeit dieser Brennertypen soll in einem folgenden Entwicklungsschritt in das Modell integriert werden.

8. Messungen

Entgegen der ursprünglichen Planung sind im Projekt als Folge des geänderten Modellansatzes relativ wenig Messungen durchgeführt worden.

Die Messarbeiten haben sich darauf konzentriert die Normnutzungsgrade von eher unüblichen Heizgeräten zu bestimmen. Dies mit der Idee, das Modell auch mit solch speziellen Geräten überprüfen zu können.

Eine Zusammenstellung der Messungen befindet sich im Anhang 2: Messresultate.

8.1. Messungen mit Öl

Die Messungen mit Öl sind an einem modernen Heizkessel durchgeführt worden, der sowohl mit Öl als auch mit Gas kondensierend betrieben werden kann. Gemessen wurde der kondensierende Betrieb mit Öl.

Es wurden Vollastmessungen beim Vorlauf-/Rücklauf-Temperaturen 75/60°C und 40/30°C bei je drei unterschiedlichen Brennerleistungen (bei 52, 40 und 26 kW) durchgeführt. Diese Messungen sind von Interesse im Zusammenhang mit der Behandlung von mehrstufigen und modulierenden Brennern.

Weiter sind alle Laststufen des Normnutzungsgrades für 75/60°C gemessen worden, sowie einzelne Laststufen des Normnutzungsgrades bei 40/30°C.

8.2. Messungen mit Gas

Die Messungen mit Gas sind an einem kleinen Wandgerät (13 kW) durchgeführt worden, das einen sehr kleinen Wasserinhalt aufweist.

Um dem Rechenmodell zu entsprechen, das die modulierende Betriebsweise noch nicht beherrscht, ist das Gerät taktend betrieben worden. Obwohl mit einer grossen Schalldifferenz des Kesselthermostates (+/- 8°C) gearbeitet worden ist, waren die Zyklen bei den niedrigen Lasten sehr kurz. Deshalb ist es vermutlich auch kaum zu Kondensation gekommen.

Taktend sind die Vollast bei 75/60°C und der Normnutzungsgrad für 75/60°C sowie der 30%-Teillastnutzungsgrad nach EN gemessen worden.

Schliesslich ist der Normnutzungsgrad bei 75/60°C auch noch mit der für diese Geräteart üblicheren modulierend Betriebsweise gemessen worden. Dabei trat Kondensation sehr wohl auf.

9. Vergleich NNG - 30%TLNG

Der 30%-Teillastnutzungsgrad (30%TLNG) hat sich in der EU gegenüber dem Normnutzungsgrad als energetische Kenngröße durchgesetzt. Er ist neben dem Volllastwirkungsgrad für die CE-Zulassung vorgeschrieben.

Die mittlere Auslastung eines Heizkessels über ein Jahr entspricht ungefähr diesen 30%. Beim Normnutzungsgrad wird ein durchschnittlicher jährlicher Heizbetrieb nicht durch eine sondern durch fünf Laststufen erfasst. Es liegt auf der Hand, dass der 30%-Teillastnutzungsgrad ein ungenaueres Bild der energetischen Güte eines Heizgerätes vermittelt als der Normnutzungsgrad. Dafür verlangt er auch nur etwa einen Fünftel des Messaufwandes.

Weil der 30%TLNG eine zunehmende Verbreitung findet, sollte ergänzend zu den restlichen Arbeiten des Projekts, untersucht werden wieweit NNG und 30%TLNG energetisch gleichwertige Aussagen machen. Dies sollte als gegeben betrachtet werden, wenn die Rangfolge unterschiedlicher Heizkessel bei NNG und 30%TLNG gleich ist.

Für diese Untersuchung sind alle in der BUWAL-Liste aufgeführten Hersteller angeschrieben worden. Die erhaltenen, verwertbaren Datensätze reichen aber kaum aus für eine eindeutige Aussage. Die Auswertungen deuten aber darauf hin, dass NNG und 30%TLNG eher nicht die gleiche Rangfolge aufweisen.

10. Verschiedenes

10.1. Zu den Gasheizkesseln

Bei der schweizerischen Typenprüfung nach der LRV ist keine Bestimmung des Volllastwirkungsgrades vorgesehen. Von in der Schweiz beim SVGW (Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches) typengeprüften Gasheizgeräten fehlt deshalb diese Angabe.

Dagegen werden bei den Oelheizgeräten anlässlich der Typenprüfung an der EMPA routinemässig wasserseitige Messungen durchgeführt, so dass der Volllastwirkungsgrad bestimmt werden kann.

Der fehlende Wirkungsgrad hat zur Folge, dass Gasgeräte mit dem Rechenmodell nur brutto, das heisst ohne Abgrenzung der Oberflächenverluste berechnet werden können. Die Oberflächenverluste oder Strahlungsverluste sind bei heutigen gut isolierten Geräten eigentlich meistens im 1%-Bereich. Deshalb sollten dadurch bei den Berechnungen keine allzu grossen Verfälschungen auftreten.

Viele Gasgeräte werden aus EU-Ländern in die Schweiz importiert. Um die CE-Zulassung zu erhalten, müssen sowohl der Volllastwirkungsgrad wie auch der 30% Teillastnutzungsgrad gemessen werden. Diese Daten sollten also vorhanden sein.

10.2. Zur Genauigkeit des Modells

Systematische Untersuchungen zur Genauigkeit des Modells sind noch nicht durchgeführt worden. Wie die Vergleiche in Abschnitt 7 zeigen, unterscheiden sich Rechnung und Messung in den meisten Fällen etwa um 1%.

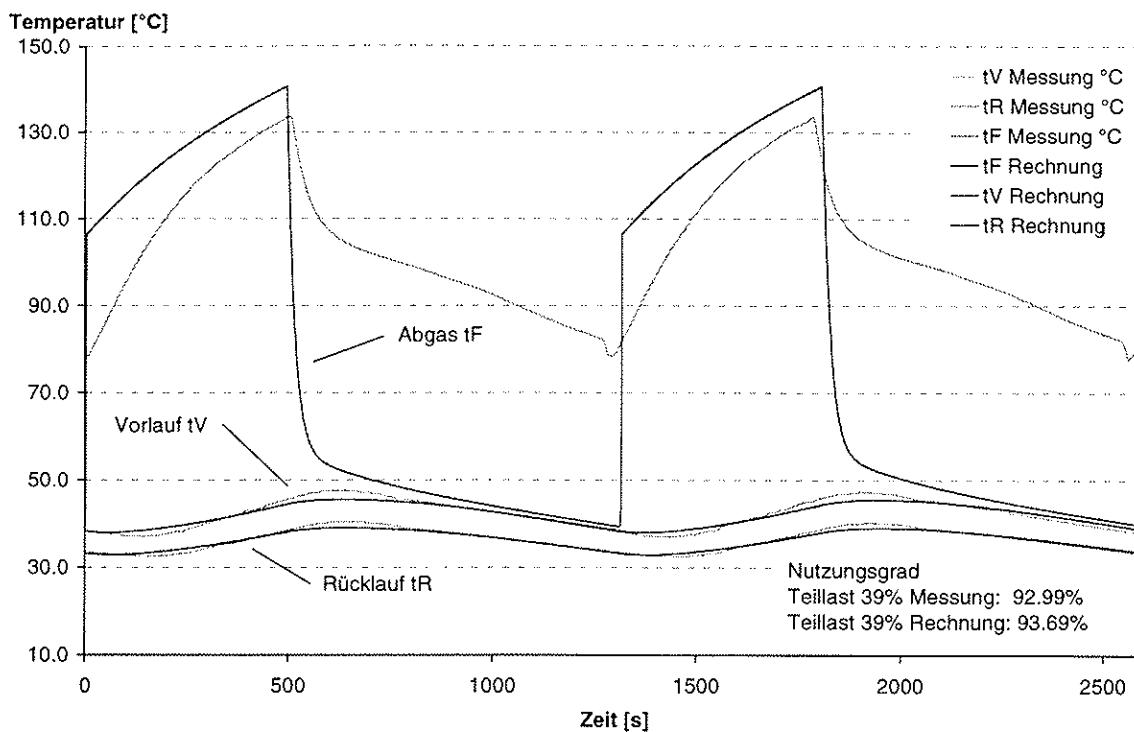


Abbildung 10.1 Vergleich Messung-Rechnung der zeitlichen Temperaturverläufe von Kessel 10 (Oel, nicht kondensierend). Der sprunghafte Anstieg der berechneten Abgastemperatur beim Brennerstart wird vermutlich mitverursacht durch den verwendeten einfachen Modellansatz. Offensichtlich wird auch der Wärmeübergang bei Brennerstillstand im Modell überschätzt, weshalb sich die Abgastemperatur entgegen den Messungen rasch an die Wassertemperaturen annähert. Die berechneten Temperaturverläufe auf der Wasserveite weichen trotzdem recht wenig von den gemessenen ab.

Die Genauigkeit der Berechnungen hängt zum einen von der Genauigkeit der eingegebenen Volllastdaten ab und zum anderen von den verwendeten Rechenansätzen und getroffenen Vereinfachungen.

Bei den Messungen sind Abweichungen <2% zulässig (Norm EN 304).

Verschiedene Ansätze im Modell sind sehr einfach gehalten. So wird etwa die Eintrittstemperatur beim Brennerstart in einem einzigen Zeitschritt von Raumtemperatur auf die adiabate Verbrennungstemperatur geändert. Diese plötzliche Temperaturänderung zeigt sich bei verschiedenen Heizkesseln in einem sprunghaften Anstieg der Abgastemperatur, wie er bei den Messungen nicht so ausgeprägt zu beobachten ist.

Es ist klar, dass die Brenngastemperatur wegen der geringen Wärmekapazität (Trägheit) im Modell viel schwieriger abzubilden ist als die Heizwassertemperatur. Abweichungen wirken sich aber auch wesentlich geringer auf die Ergebnisse aus.

Auch der Ansatz, welcher die innere Auskühlung beschreibt ist sehr einfach und vermag die Verhältnisse nicht immer günstig wiederzugeben. Auf die Nutzungsgradberechnungen hat dies ebenfalls nur einen geringen Einfluss.

Diese Zusammenhänge werden durch Abbildung 10.1 und Abbildung 10.2 veranschaulicht.

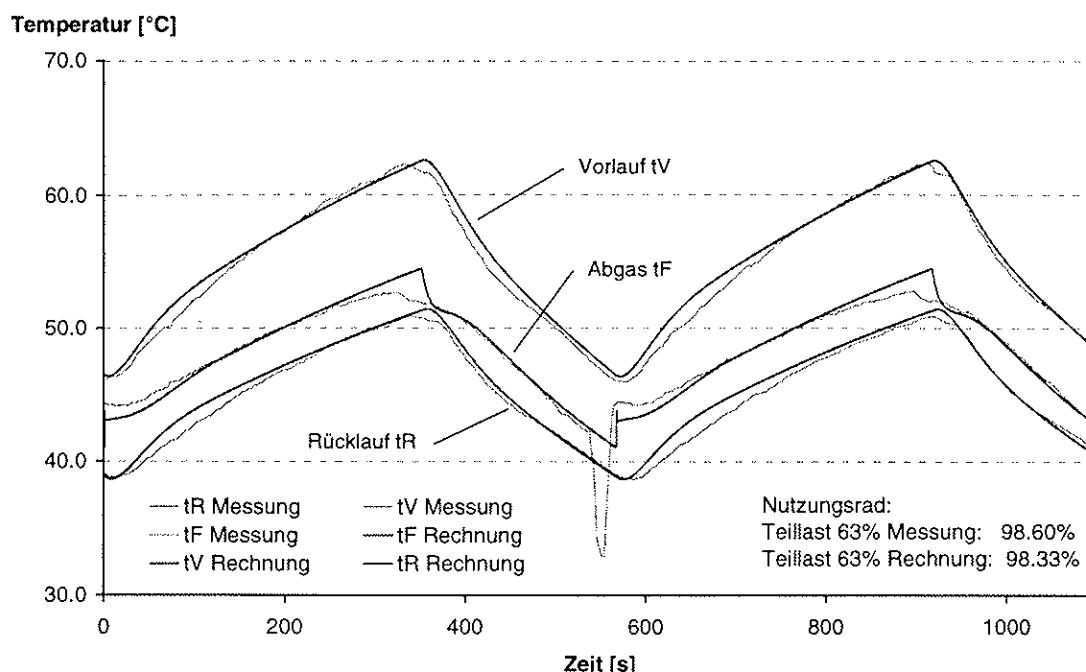


Abbildung 10.2 Vergleich Messung-Rechnung von Kessel 12 (Öl, kondensierend). Der Ausschlag nach unten der Abgastemperatur vor dem Brennerstart ist vermutlich durch das Vorspülen (Anlaufen des Gebläses vor dem eigentlichen Brennerstart) verursacht. Vorspülen wird im Modell nicht berücksichtigt.

10.3. Zum Einsatzgebiet des Modells

Wie bereits erwähnt sind die Unterschiede von vergleichbaren Geräten in den letzten Jahren kleiner geworden. Eine Rangfolge ähnlicher Geräte ist weder mit dem Modell noch mit Messungen sinnvoll festzusetzen. Die Unterschiede sind zu gering (vgl. dazu auch Abbildung 7.1).

Der Normnutzungsgrad und damit auch das Rechenmodell können aber dazu verwendet werden, die Unterschiede zwischen verschiedenen Kesselkonzepten, etwa kondensierenden und nicht kondensierenden sichtbar zu machen.

Natürlich kann auch sehr deutlich gezeigt werden, wie sich der Ersatz eines alten Heizkessels auf den Energieverbrauch auswirken kann.

Ebenfalls untersucht werden kann der Einfluss des Gleitens und der minimal zulässigen Kesseltemperatur auf den Normnutzungsgrad.

Wegen der Möglichkeit auf andere Vorlauf-/Rücklauf-Temperaturpaare umzurechnen (vgl. Abschnitt 5.7) können Planer auf einfache Art auch die Auswirkungen verschiedener Auslegetemperaturen abschätzen.

10.4. Ausblick

Es besteht die Absicht, die fehlende Unterstützung des Modells für mehrstufige und kondensierende Brenner in einem folgenden Schritt zu ergänzen.

Ebenfalls sollen Verfeinerungen einzelner Modellansätze die Genauigkeit für unterschiedlichste Heizgeräte zuverlässig gewährleisten helfen.

Schliesslich soll das Programm eine benutzerfreundlichere Bedienoberfläche erhalten. Überarbeitet werden kann auch die Datenein- sowie die Resultatausgabe.

11. Anhang 1: NNGModell – Programmcode

Aus Platzgründen ist es nicht möglich den ganzen Programmcode (rund 2500 Programmzeilen) anzufügen. Es sind deshalb nur einige auswählte Prozeduren zusammengestellt worden, welche zum Verständnis des Modells beitragen sollen.

```

unit Modell_explizit_kond;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Mask, Buttons, MathFunktionen, waerme, ComCtrls, ExtCtrls,
  Menus, InOut;

const
  Anz          = 4;           {Anzahl Teilgebiete}
  cW           = 4190;        {[J/kgK]}
  cZ           = 452;          {[J/kgK], Eisen}
  f_stop_C     = 0.05;        {Faktor für mpktf bei Brennerstillstand}
  w_stop       = 0.1;          {Faktor für mpktw bei Bereitschaftsbetrieb}
  delay         = 3;           {[s], Verzögerung }
  lambdaZ      = 74;          {[W/m2K], lambda Eisen f. Kesselmasse}
  verteiler    = 0.85;        {verteilt Masse zwischen z und m}
  Az            = 0;           {Querschnittsfläche z für Längsleitung}
  dim          = 3*Anz+2;     {Dimension der Matrizen}
  delta_t_C    = 3.0;         {[K], Schaltdifferenz für Thermostat}
  tSenke       = 10.0;        {[°C], Temperatur der Wärmesenke}

type
  ...

private

public
  { Public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;
  c,h,s,n,o,w,O2,M_vf,M_vtr,CO2prozent,
  mpktB,mpktf,mpktw,VpktkW,
  QpktF,QpktHn,QpktHb,Hu,QpktS,QpktK_3,QpktK_4,QpktBsoll,
  cpf,CpktFei,CpktWei,CpktWei_b,CpktF,CpktW,QpktK,QpktV,QpktS_alt,
  e_tot,e_i,e_fi,Z,e_wi,e_f3,e_f4,
  Cfi,Czi,Cwi,Cm,
  alpha_w,alpha_f,alpha_fk,Lzi,f_stop,
  etaK,TLNG,
  mw,mm,
  tL,tad,tVneu,tmin,tR,tRneu,tRs,tF,tS,t_ein,t_aus,tVn,tRn,
  deltaTsoll,tlneu,tV_alt,tR_alt,tksum,tl_alt,
  dtsum,tvsum,tksum,
  lambda,xL,pL,xv,
  li,Awt,Awti,Awtk,V_f,Aaw,Aav,Axk_i,
  Last,Last_soll,f2,einstell_Umlauf,
  dt,laufzeit,delta_t
  :double;

  step,stp,AnzSchr
  :integer;

  BrennerLaeuft, Teillast, Kaltstart, Bereitschaft,
  NNGZyklus,UmwEnde,Vollast,einstellen,abbrechen
  :Boolean;

  mue      :mueMatrix;
  stringarray :array[0..20] of string;
  Hk       :Hkmatrix;

```

```
G          :array [1..dim,1..dim+2] of double;
T          :array [1..dim] of double;
clip       :clipmatrix; {Zwischenlagern der Ausgabedaten}
NNGarray   :array[0..5] of double;
wait       :variant;

{*****}

implementation

uses Start;

{$R *.DFM}

...

{Behandelt die Änderung der Vorlauftemperatur}
procedure TForm1.TvStrKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if Key = #13 then
  begin
    tV_alt:=tV;
    if length(tvStr.text)=0 then
    begin
      tv:=StrToFloat(stringarray[9]);
      tvStr.text:=stringarray[9];
    end
    else
      tv:=StrToFloat(tvStr.text);

    SelectNext(tvStr,true,true);
  end;
end;

{Behandelt die Änderung der Rücklauftemperatur und startet die Umrechnung auf
ein anderes Vorlauf/Rücklauf Temperaturpaar}
procedure TForm1.tRStrKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if Key = #13 then
  begin
    tR_alt:=tR;
    if length(tRStr.text)=0 then
    begin
      tR:=StrToFloat(stringarray[10]);
      tRStr.text:=stringarray[10];
    end
    else
      tR:=StrToFloat(tRStr.text);

    if (tV_alt=tV) and (tR_alt=tR) then
      (do nothing)
    else
    begin
      deltaTsoll:= tV-tR;
      tV_tR_anpassen;
    end;

    SelectNext(tRStr,true,true);
  end;
end;
```

```

(Prozedur tV_tR_anpassen rechnet das Vorlauf/Rücklauf-Temperaturpaar auf
andere, vorzugebende Werte um. Dies geschieht durch variieren der Last
(ändert die Mitteltemperatur) und variieren des Umlaufes (ändert die Differenz
tV-tR) bis tVsoll und deltaTsoll erreicht sind)
procedure tV_tR_anpassen;
var
  tVsoll,
  mpktW_alt,grenze           :double;
  count                        :integer;
  s2                           :string;

begin
  tVsoll:=tV;                {als Startwert, bisherige tV}
  tV:=tV_alt;                {als Startwert, bisherige tR}
  mpktW_alt:=mpktW;
  QpktS_alt:=QpktS;
  Vollast:= false;
  Teillast:= false;
  Bereitschaft:=false;
  NNGZyklus:=false;
  Brennerlaeuft:= true;
  s2:='noFile';

  einstellen:=true;
  Last:=1.0;                  {Starwert, Zulauf}
  einstell_Umlauf:=1.0;        {Genauigkeit der Resultate, Startwert}
  grenze:=1e-0;                {für ProgressBar}
  count:=1;

repeat
  Form1.ProgressBar.Position:=count;
  repeat
    repeat
      kaltstart:=true;
      Brenner_Run(tV,s2);
      Last:=Last*(1+(T[9]-tVsoll)/tVsoll);
      until abs(T[9]-tVsoll)< grenze;
      tF:=T[4];
      tV:=T[9];
      tR:=T[13];
      einstell_Umlauf:=einstell_Umlauf*
        (1+(T[9]-T[13]-deltaTsoll)/deltaTsoll);
      mpktW:=mpktW_alt*einstell_Umlauf;
    until abs(T[9]-T[13]-deltaTsoll)<grenze;
    grenze:=grenze*1e-1;
    count:=count+1;
  until grenze<=1e-4;

  QpktHn:=CpktW*(tV-tR);
  neuberechnen;

  einstellen:=false;
  Form1.ProgressBar.Position:=0;
end;
...
```

(Behandelt die Änderung der Umgebungstemperatur, indem die Prozedur tL_umrechnen ausgelöst wird)

```

procedure TForm1.TLStrKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if Key = #13 then
  begin
    tL_alt:= tL;
    if length(TLStr.text)=0 then
    begin
      tL:=StrToFloat(stringarray[14]);
      TLStr.text:=stringarray[14];
    end;
  end;
end;
```

```

    end
  else
    tL:=StrToFloat(TLStr.text);

    SelectNext(TLStr,true,true);
    tL_umrechnen;
  end;
end;

(Annahme: die Effectivness bleibt konstant bei Änderung von tL. Ebenfalls
konstant bleibt der Wasserumlauf mpktW)
(Die Verschiebung des Gleichgewichtes hängt von der Grösse der Änderung
(Konstante im Ausdruck für tF) der Abgastemperatur tF ab)
Procedure tL_umrechnen;
var
  Qpkts_ist,tV_old,e_tot_soll,Qpkts_x,tVb,tRb_tr           :double;
  s                                                               :string;

begin
  Qpkts_ist:= Qpkts;
  tV_old:=tV;
  CpkTW:=mpktW*cW;
  cpf:=cp_(tad,tF,xL,mue,Hk);
  CpkTF:=mpktf*cpf;
  Z:=CpkTF/CpkTW;
  tVb:= tR+Qpkthb/CpkTW;
  tRb_tr:=tVb-(tAd-tF)*Z;
  e_tot_soll:=(tad-tF)/(tad-tRb_tr);   {Effectivness bleibt konstant}

  tAd:=Tad_(tL,xL,Hu,mue,Hk);          {tAd für neue tL}

repeat
  Qpkts_x:=Qpkts_ist*(tV-tL)/(tV_old-tL_alt);
  Brutto;
  tRb_tr:=tAd-(tAd-tF)/e_tot_soll;
  tVb:=tRb_tr+(tAd-tF)*Z;
  tR:=tVb-Qpkthb/CpkTW;
  Qpkthn:=Qpkthb-Qpkts_x;
  tV:=Qpkthn/CpkTW+tR;
  tF:=tF*(1-(Qpkts_x-Qpkts)/(1e4*Qpkts_x));
  cpf:=cp_(tad,tF,xL,mue,Hk);
  CpkTF:=mpktf*cpf;
  Z:=CpkTF/CpkTW;
until abs(Qpkts_x-Qpkts)<1e-6;

neuberechnen;
Str(tL:5:2,s);
Form1.tLStr.text:=s;
end;

(Annahme: tV bleibt konstant -> Qpkts bleibt konstant,
Bestimmung des neuen Qpkthb, Qpkthn = Qpkthb - Qpkts)
procedure TForm1.tFStrKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
var
  Qpkts_alt           :double;

begin
  if Key = #13 then
  begin
    if length(tFStr.text)=0 then
    begin
      tFStr.text:=stringarray[15];
      tF:=StrToFloat(tFStr.text);
    end
    else
      tF:=StrToFloat(tFStr.text);

    if tF <> StrToFloat(stringarray[15]) then

```

```

begin
    QpkTS_alt:= QpkTS;
    brutto;
    QpktHn:=QpktHb-QpkTS_alt;
    tR:=tV-QpktHn/(mpktW*cW);
end;
neuberechnen;
SelectNext(tFStr,true,true);
end;
...

{*****Startprozedur*****}
procedure TForm1.Form1Create(Sender: TObject);
begin
  Read_File('Daten\standardwerte.txt',stringarray);
  {initialisiert die Tabelle mit den Hk-Werten für Berechnung der cp0 Werte}
  setHkTable(Hk);

  {initialisieren der Benutzer-Oberfläche}
  cStr.text:=stringarray[0];
  c:=(StrToFloat(cStr.text))/100;
  hStr.text:=stringarray[1];
  h:=(StrToFloat(hStr.text))/100;
  sStr.text:=stringarray[2];
  s:=(StrToFloat(sStr.Text))/100;
  nStr.text:=stringarray[3];
  n:=(StrToFloat(nStr.text))/(10000*100);
  oStr.text:=stringarray[4];
  o:=(StrToFloat(oStr.text))/100;
  wStr.text:=stringarray[5];
  w:=(StrToFloat(wStr.text))/100;
  HuStr.text:=stringarray[6];
  Hu:=StrToFloat(HuStr.text)*1e6;
  mpktBStr.text:=stringarray[7];
  mpktB:=StrToFloat(mpktBStr.Text)/3600;
  QpktHStr.text:=stringarray[8];
  QpktHn:=(StrToFloat(QpktHStr.Text))*1000;
  TvStr.text:=stringarray[9];
  tV:=(StrToFloat(TvStr.Text));
  TrStr.text:=stringarray[10];
  Tr:=(StrToFloat(TrStr.Text));
  mwStr.text:=stringarray[11];
  mw:=(StrToFloat(mwStr.Text));
  mmStr.text:=stringarray[12];
  mm:=(StrToFloat(mmStr.Text));
  V_fStr.text:=stringarray[13];
  V_f:=StrToFloat(V_fStr.text);           {Gasinhalt}
  tLStr.text:=stringarray[14];
  tL:=StrToFloat(tLStr.text);
  tFStr.text:=stringarray[15];
  tF:=StrToFloat(tFStr.text);
  O2Str.text:=stringarray[16];
  O2:=(StrToFloat(O2Str.text))/100;
  xStr.text:=stringarray[17];
  xL:=StrToFloat(xStr.text);
  pLStr.text:=stringarray[18];
  pL:=StrToFloat(pLStr.text)*100;        {[Pa]}
  tMinStr.text:=FloatToStr(tL);
  tMin:=StrToFloat(tMinStr.text);
  Form1.caption:='NNG Modell - '+stringarray[19];
  Awt:=round(QpktHn/1000*2/50*10)/10;      {linearer Ansatz}
  Awt:=round(QpktHn/1000/(10*ln(QpktHn/1000/2))*10)/10; {Log. Ansatz}
  AwtStr.text:=FloatToStr(Awt);             {Abschätzung Wärmetauscherfläche}
  deltaTStr.text:=FloatToStr(delta_T_C);
  delta_T:=delta_T_C;

```

```
f_stopStr.text:=FloatToStr(f_stop_C*100);
f_stop:=f_stop_C;

Neuberechnen;

if QpktS <=0.0 then
begin
  MessageDlg('Strahlungsverlust ist < 0.0, es wird brutto gerechnet',
  mtInformation,[mbOK],0);
  QpktHn:=QpktHb;
  neuberechnen;
end;
end;

{*****diverse Prozeduren*****}

...

{Berechnet die Kenngrößen neu bei der Initialisierung
oder nach einer Änderung der Eingabewerte}
procedure Neuberechnen;
var
  s1: string;
begin
  QpktF:=mpktB*Hu;
  etaK:=QpktHn/QpktF;
  mpktW:=QpktHn/(cW*(tV-tR));
  Verbrennung_rechnen( mpktB,c,h,s,n,o,w,O2,xL,Hk,lambda,mpktf,
    M_vf,M_vtr,CO2prozent,mue);
  tAd:=tAd_(tL,xL,Hu,mue,Hk);
  Taupunkt_rechnen(tL,pL,M_vf,M_vtr,mue,tS,xv);
  NTU_rechnen;

  Str((QpktF/1000):6:4,s1);
  Form1.QpktFStr.caption:=s1;
  Str (QpktHn/1000:5:3,s1);
  Form1.QpktHStr.text:=s1;
  Str (etaK*100:5:2,s1);
  Form1.etaKStr.caption:=s1+'%';
  Str(tV:5:2,s1);
  Form1.tVStr.text:=s1;
  Str(tR:5:2,s1);
  Form1.tRStr.text:=s1;
  Str (tF:5:4,s1);
  Form1.tFStr.text:=s1;

  Str (QpktS:5:4,s1);
  Form1.QpktSStr.caption:=s1;
  Str (QpktHb:5:3,s1);
  Form1.QpktHbStr.caption:=s1;
  Str (QpktV:5:3,s1);
  Form1.QpktVStr.caption:=s1;
  Str (QpktK:5:3,s1);
  Form1.QpktKStr.caption:=s1;

  Str(lambda:6:5,s1);
  Form1.lambdaStr.caption:=s1;
  Str(mpktf:6:4,s1);
  Form1.mpktfStr.caption:=s1;
  Str (Tad:8:3,s1);
  Form1.tadStr.caption:=s1;
  Str (Ts:5:4,s1);
  Form1.TsStr.caption:=s1;
  Str (mpktW:5:3,s1);
  Form1.mpktWStr.caption:=s1;
  Str (CO2prozent*100:5:3,s1);
  Form1.CO2Str.caption:=s1;
  Str (alpha_f:5:2,s1);
```

```
Form1.alphaFStr.caption:=s1;
Str (alpha_W:5:2,s1);
Form1.alphaWStr.caption:=s1;

end;

...

{*****Prozeduren der verschiedenen Betriebszyklen*****}

(Aufheizen des Kessels von Raumtemperatur bis zum Vollast-Gleichgewicht)
procedure TForm1.VollClick(Sender: TObject);
var
  s1,s2: string;
begin
  s2:= 'daten\output.txt';
  NewFile(s2);
  kaltstart:= true;
  Vollast:= true;
  Teillast:= false;
  Bereitschaft:=false;
  NNGZyklus:=false;
  Last:=1.0;

  Laufzeit:= 0.0;
  Brenner_Run(tV,s2);
  Str (T[4]:5:3,s1);
  tFStr.text:=s1;
end;

(Berechnet den Bereitschaftsverlust, Resultat ist abhängig von den Auskühl-
verlusten bei Brennerstillstand. Diese Verluste sind zu schätzen (f_stop))
procedure TForm1.BereitschaftButtonClick(Sender: TObject);
var
  s1,s2                      :string;
  Zstart,Bstop,Zstop,AnzSchritte,
  tK_,tKsoll,t_thermost,Qpkbt      :double;
  count                         :integer;

begin
  abbrechen:=false;
  Form1.AbbrechButton.setFocus;
  s2:= 'daten\output.txt';
  Vollast:= false;
  Teillast:= false;
  Bereitschaft:=true;
  NNGZyklus:=false;
  Last:=0.0;                  (Keine Wärmeabgabe im Umlauf)

  if Form1.tKsollStr.Text = '' then
    tKsoll:= tL+50.0
  else
    tKsoll:= StrToFloat(tKsollStr.Text);
  if Form1.f_stopStr.Text = '' then
    f_stop:= f_stop_C
  else
    f_stop:= StrToFloat(f_stopStr.Text)/100;

  t_thermost:= tKsoll;        (Startwert für Thermostat)
  count:=0;
```

```

repeat
    Kaltstart:= true;
    count:=count+1;
    if count<Form1.ProgressBar.Max then
        ProgressBar.Position:=count
    else
        ProgressBar.Position:=Form1.ProgressBar.Max;

    NewFile(s2);
    Laufzeit:= 0.0;
    t_ein:=t_thermost-delta_t;
    t_aus:=t_thermost+delta_t;
    Brenner_Run(t_aus,s2);
    UmwEnde:=false;
    Brenner_Stop(t_ein,s2);
    tKsum:=0.0;                      {Summe der mittleren Kesseltemperaturen}
    Zstart:=laufzeit;                {Messzyklus startet}
    Brenner_Run(t_aus,s2);
    UmwEnde:=false;
    Bstop:=laufzeit;
    Brenner_Stop(t_ein,s2);
    Zstop:=laufzeit;
    AnzSchritte:=(Zstop-Zstart)/dt;
    tK_:=tKsum/AnzSchritte;
    t_thermost:=t_thermost*(1-(tK_-tKsoll)/tKsoll);

    Application.ProcessMessages;

until abbrechen or (abs(tK_-tKsoll)<1e-2);

Qpkfb:=Qpkfb*(Bstop-Zstart)/(Zstop-Zstart);
Str (Qpkfb:5:2,s1);
Form1.QpkfbStr.caption:=s1+' [W]';
Str ((Bstop-Zstart):5:1,s1);
Form1.tLaufStr.caption:=s1+' [s]';
Str ((Zstop-Zstart):5:1,s1);
Form1.tZyklusStr.caption:=s1+' [s]';
Str (tK_:5:3,s1);
tKsollStr.text:=s1;
ProgressBar.Position:=0;
if abbrechen then
    ResetButton.Click;

end;

{Berechnet einen Teillastnutzungsgrad, Vorgegeben werden können die Last und die
mittlere einzuhalteende Vorlauftemperatur}
procedure TForm1.TeillastButtonClick(Sender: TObject);
var
  s1,s2                         :string;
  Zstart,Zstop,Bstop,AnzSchritte,Last_ist,
  Qpkfb_,t_thermost,tK_,QF_,QH_      :double;

begin
  s2:='daten\output.txt';
  Kaltstart:= true;
  Vollast:= false;
  Teillast:= true;
  Bereitschaft:=false;
  NNGZyklus:=false;
  einstellen:= false;

  if Form1.tKsollStr.Text = '' then
    tKsoll:= tL+30.0
  else if (Form1.tKsollStr.Text = 'tL+50K') then
    tKsoll:= tL+50.0
  else if (Form1.tKsollStr.Text = 'tL+40K') then
    tKsoll:= tL+40.0
  else if (Form1.tKsollStr.Text = 'tL+30K') then
    tKsoll:= tL+30.0
  else
    tKsoll:= tL+20.0;
  Qpkfb_:=Qpkfb*(Bstop-Zstart)/(Zstop-Zstart);
  Form1.QpkfbStr.caption:=FormatFloat('0.000',Qpkfb_);
  Str (Qpkfb_:5:3,s1);
  Form1.QpkfbStr.text:=s1;
  tLaufStr.caption:=FormatFloat('0.000',Zstop-Zstart);
  Str (tLaufStr.caption:5:1,s1);
  tZyklusStr.caption:=FormatFloat('0.000',Zstop-Zstart);
  Str (tZyklusStr.caption:5:1,s1);
  tKStr.caption:=FormatFloat('0.000',tK_);
  Str (tKStr.caption:5:3,s1);
  tKsollStr.text:=s1;
  Progressbar.Position:=0;
  if Vollast then
    ResetButton.Click;
  if Teillast then
    TeillastButton.Click;
  if Bereitschaft then
    BereitschaftButton.Click;
  if NNGZyklus then
    NNGZyklusButton.Click;
  if einstellen then
    EinstellenButton.Click;
end;

```

```

        tKsoll:= tL+30.0
    else
        tKsoll:= StrToFloat(tKsollStr.Text);

    if Form1.LastStr.Text = '30%' then
        Last_soll:= 0.3
    else if Form1.LastStr.Text = '' then
        Last_soll:= 0.3
    else
    begin
        Last_soll:= StrToFloat(LastStr.Text);
        if Last_soll > 1.0 then
            Last_soll:=Last_soll/100;
    end;

    t_thermost:=tKsoll; {Startwert für Thermostat}
    Last:= Last_soll;

    repeat
        repeat
            t_ein:=t_thermost-delta_t;
            t_aus:=t_thermost+delta_t;
            NewFile(s2);
            Laufzeit:= 0.0;
            Brenner_Run(t_aus,s2);{Vorbereiten der Messphase, Kaltstart}
            Brenner_Stop(t_ein,s2);
            dTsum:=0.0; {Summe der tV-tR Differenzen über Zyklus}
            tKsum:=0.0; {Summe der (tV+tR)/2 = tKessel mittel}
            Zstart:=laufzeit; {Startzeit erfassen }
            Brenner_Run(t_aus,s2); {Messphase}
            Bstop:=laufzeit; {Ende Brennerlaufzeit}
            Brenner_Stop(t_ein,s2);
            Zstop:=laufzeit; {Zyklusende erfassen}
            AnzSchritte:=(Zstop-Zstart)/dt;
            tK_:=tKsum/AnzSchritte;
            QpktH_:=dTsum*Cpktw/AnzSchritte; {Mittlere Heizleistung}
            Last_ist:=QpktH_/_QpktHn;
            t_thermost:=t_thermost*(1-(tK_-tKsoll)/tKsoll);
            until abs(tK_-tKsoll)<1e-2;
            Last:=Last*(1-(Last_ist>Last_soll)/Last_soll);
        until abs(Last_ist>Last_soll)< 1e-4;

        QH_:=QpktH_* (Zstop-Zstart);
        QF_:=(Bstop-Zstart)*mpktB*Hu;
        TLNG:=QH_/_QF_ ;

        Str (TLNG*100:5:4,s1);
        Form1.TLNGStr.caption:=s1+' %';
        Str (tK_:5:2,s1);
        Form1.tKsollStr.text:=s1;
        Str ((Last_ist*100):5:2,s1);
        Form1.LastStr.text:=s1;
    end;

    {Berechnet den Normnutzungsgrad nach DIN 4702}
    procedure TForm1.NNGBButtonClick(Sender: TObject);
    type
        Narray= array[0..4]of double;
    const
        NLast: Narray=(0.63,0.48,0.39,0.30,0.13);
        NLtV_mitte: Narray=(55.0,46.0,42.0,37.0,27.0); {Vorlauftemperaturen,75/60}
        NLtV_tief: Narray=(33.0,30.0,28.0,26.0,23.0); {Vorlauftemperaturen,40/30}
        NLtV_hoch: Narray=(64.0,54.0,47.0,41.0,29.0); {Vorlauftemperaturen,90/70}
        NLdT_mitte: Narray=(10.0,7.0,6.0,5.0,2.0); {Rücklauftemperaturen,75/60}
        NLdT_tief: Narray=(7.0,5.0,4.0,3.0,2.0); {Rücklauftemperaturen,40/30}
        NLdT_hoch: Narray=(13.0,10.0,8.0,6.0,3.0); {Rücklauftemperaturen,90/70}

```

```
var
  s1,s2,s3,s4                               :string;
  count                                     :integer;
  Zstart,Bstop,Zstop,
  QH_,QF_,NNG,tR_,faktor,
  AnzSchritte,t_thermost,tV_,tVsoll,tRsoll,
  _TLNG,_TLNG_sum, QpkTH_,Last_soll, Last_ist      :double;
  NLtV, NLdT                                :Narray;

begin
  abbrechen:=false;
  Form1.AbbrechButton.setFocus;

  if (tV > 50.0) and (tV < 85.0) then
  begin
    if (tV > 76.0)
    or (tV < 75.0)
    or (tR > 61.0)
    or (tR < 60.0) then

    begin
      MessageDlg ('Umrechnen auf tV/tR soll 75/60°C',
                  mtInformation,[mbOK],0);
      tV_alt:=tV;
      tR_alt:=tR;

      if (tL > 20.5) or (tL < 19.5) then
      begin
        tL:=20.0;
        tL_umrechnen;
      end;                                         {tL normieren auf 20°C}

      if (tV < 75.0) or (tV > 76.0) then
        tV:= 75.0;                                {Mindesttemperatur nach DIN 4702}
      if (tR < 60.0) or (tR > 61.0) then
        tR:= 60.0;                                {Mindesttemperatur nach DIN 4702}

      deltaTsoll:=tV-tR;
      tV_tR_anpassen;
    end;
  end

  else if (tV < 50.0) then
  begin
    if (tV > 41.0)
    or (tV < 40.0)
    or (tR > 31.0)
    or (tR < 30.0) then

    begin
      MessageDlg ('Umrechnen auf tV/tR soll 40/30°C',
                  mtInformation,[mbOK],0);
      tV_alt:=tV;
      tR_alt:=tR;

      if (tV < 40.0) or (tV > 41.0) then
        tV:= 40.0;
      if (tR < 30.0) or (tR > 31.0) then
        tR:= 30.0;

      deltaTsoll:=tV-tR;
      tV_tR_anpassen;
    end;
  end

  else if (tV > 85.0) then
  begin
    if (tV > 91.0)
    or (tV < 90.0)
    or (tR > 71.0)
```

```

        or (tR < 70.0) then
begin
    MessageDlg ('Umrechnen auf tV/tR soll 90/70°C',
                mtInformation,[mbOK],0);
    tV_alt:=tV;
    tR_alt:=tR;

    if (tV < 90.0) or (tV > 91.0) then
        tV:= 90.0;
    if (tR < 70.0) or (tR > 71.0) then
        tR:= 70.0;

    deltaTsoll:=tV-tR;
    tV_tR_anpassen;
end;
end;

Vollast:= false;
Teillast:= false;
Bereitschaft:=false;
NNGZyklus:=true;
NNG:= 0.0;

if tV > 85.0 then
begin
    NLtV:=NLtV_hoch;
    NLdT:=NLdT_hoch;
end
else if tV < 50.0 then
begin
    NLtV:=NLtV_tief;
    NLdT:=NLdT_tief;
end
else
begin
    NLtV:=NLtV_mitte;
    NLdT:=NLdT_mitte;
end;
ProgressBar.Position:=1;
count:=0;

repeat
    Last:=1.0;
    Kaltstart:= true;
    Last_soll:= NLast[count];
    Str (NLast[count]*100:2:0,s2);      {macht aus Laststufe einen String}
    s3:= 'daten\output'+s2+'.txt';

    {Berücksichtigen der min. Kesseltemperatur}
    if (tmin > tL) and (NLtV[count]< tmin) then
        tVsoll:=tmin
    else
        tVsoll:=NLtV[count];

    tRsoll:=tVsoll-NLdT[count];
    t_thermost:=tVsoll; {tV soll als Startwert für Thermostat}

repeat
repeat
    t_ein:=t_thermost-delta_t;
    t_aus:=t_thermost+delta_t;
    NewFile(s3);
    Laufzeit:= 0.0; {Vorbereiten der Messphase, Kaltstart}
    Brenner_Run(t_aus,s3);
    Brenner_Stop(t_ein,s3);
    dTsum:=0.0; {Summe der tV-tR Differenzen über Zyklus}
    tVsum:=0.0; {Summe der tV über Zyklus}
    Zstart:=laufzeit; {Startzeit erfassen }
    Brenner_Run(t_aus,s3); {Messphase}

```

```

        Bstop:=laufzeit;           {Brennerstopzeit erfassen}
        Brenner_Stop(t_ein,s3);
        Zstop:=laufzeit;          {Zyklusende erfassen}
        AnzSchritte:=(Zstop-Zstart)/dt;   {Anzahl Rechenschritte}
        tV_:=tVsum/AnzSchritte; (mittlere tV über Zyklus)
        tR_:=(tVsum-dTsum)/AnzSchritte;

        if (tV_>tVsoll) and (tR_<tRsoll) then
            t_thermost:=t_thermost*(1-(tR_-tRsoll)/tRsoll)
        else if (tV_<tVsoll) and (tR_>tRsoll) then
            t_thermost:=t_thermost*(1-(tV_-tVsoll)/tVsoll)
        else
            t_thermost:=t_thermost*(1-(tV_-tVsoll)/tVsoll);

        Application.ProcessMessages;

        until abbrechen or((tV_>tVsoll) and (tR_>tRsoll));
        QpktH_:=dTsum*Cpktw/AnzSchritte; (Mittlere Heizleistung)
        Last_ist:=QpktH_/_QpktHn;
        if ((Last_ist>Last_soll)/Last_soll)>0.5 then
            faktor:=1e1                  {Extremfallbehandlung}
        else
            faktor:=1.0;
        Last:=Last*(1-(Last_ist>Last_soll)/(faktor*Last_soll));

        until (abs(Last_ist>Last_soll)< 1e-3); {Max nach DIN 4702 +/- 0.03}

        QF_:=(Bstop-Zstart)*mpktB*Hu;
        QH_:=dTsum*Cpktw*dt;
        TLNG:=QH_/_QF_;
        _TLNG:=1/(TLNG*100);

        Str (TLNG*100:6:2,s1);
        Str (tV_:5:2,s2);
        Str (tR_:5:2,s3);
        Str (Last_ist:3:2,s4);
        case count of
            0: Form1.Label35.caption:='Last '+s4+: '+s1+'% / '+s2+ '/ '+s3;
            1: Form1.Label37.caption:='Last '+s4+: '+s1+'% / '+s2+ '/ '+s3;
            2: Form1.Label38.caption:='Last '+s4+: '+s1+'% / '+s2+ '/ '+s3;
            3: Form1.Label39.caption:='Last '+s4+: '+s1+'% / '+s2+ '/ '+s3;
            4: Form1.Label40.caption:='Last '+s4+: '+s1+'% / '+s2+ '/ '+s3;
        end;
        NNGarray[count]:=TLNG;
        ProgressBar.Position:=(count+1);
        count:= count+1;
        until abbrechen or (count > 4);

        _TLNG_sum:=0.0;
        for count:=0 to 4 do
            _TLNG_sum:=_TLNG_sum + NNGarray[count];
        NNG:= 5/_TLNG_sum;
        Str (NNG:5:2,s1);
        Form1.Controll1.caption:='NNG= '+s1+'%';
        ProgressBar.Position:=0;
        NNGarray[5]:=NNG;

        if abbrechen then
            ResetButton.Click;
    end;

```

```

{*****Berechnungsprozeduren*****}

(Berechnet die Brutto-Heizleistung und den Strahlungsverlust bei Vollast)
Procedure brutto;
begin
  if (tS<tF) then                                (falls keine Kondensation)
  begin
    QpktK:= 0.0;                                 (Kondensationswärme)
    QpktV:= h2(tF,mue,Hk,tL,xL)*mpktB;          (Abgasverlust)
    QpktHb:=Hu*mpktB-QpktV;
  end
  else
  begin
    QpktK:=delta_hk(tF,pL,M_vtr,xv,mue)*mpktB;
    QpktV:= h2(tF,mue,Hk,tL,xL)*mpktB;          (Abgasverlust)
    QpktHb:=Hu*mpktB - QpktV + QpktK;
  end;

  if einstellen then
    QpktS:=Qpkts_alt*(tv-tL)/(tV_alt-tL)
  else
    QpktS:= QpktHb-QpktHn;
end;

(Berechnet die NTU-Effectivness-Beziehungen. Bestimmt werden die Werte für die
trockene (= keine Kondensation) Heizleistung brutto)
Procedure NTU_rechnen;
var
  NTUtot,NTUi,NTUfi,
  tVb,tRb_tr :double;

begin
  CpktW:=mpktW*cW;
  cpf:=cp_(tad,tF,xL,mue,Hk);
  CpktF:=mpktf*cpf;
  Z:=CpktF/CpktW;                               (setzt voraus, dass CpktF < CpktW)
  brutto;                                       (berechnet QpktHb und Qpkts)
  tVb:= tR+QpktHb/CpktW;
  tRb_tr:=tVb-(tAd-tF)*Z;                      (Vorlauftemperatur brutto)

  e_tot:=(tad-tF)/(tad-tRb_tr);      (totale Effectivness ganzer Wärmetauscher
                                         trocken (= ohne Kondensation))
  NTUtot:=1/(Z-1)*ln((e_tot-1)/(e_tot*Z-1));
  NTUi:= NTUtot/Anz;
  Axk_i:=NTUi*CpktF;
  e_i:=(1-exp(-NTUi*(1-Z)))/(1-Z*exp(-NTUi*(1-Z)));
  Awti:=Awt/Anz;                             (Wärmetauscherteilfläche)

  Waermeuebergang_rechnen(tL,tV,tR,tAd,tF,pL,cpF,cW,mpktf,mpktW,Axk_i,
                         Awt,Awti,mw,li,alpha_f,alpha_w);(berechnet alphaf und alphaw trocken)

  NTUfi:=alpha_f*Awti/Cpktf;
  e_fi:=(1-exp(-NTUfi));                     (Teil-Effectivness Brenngas/Wand, Annahme:
                                         konstante Wandtemperatur je Abschnitt)
  CpktFei:=e_fi*CpktF;
  e_wi:=Z*e_i*e_fi/(e_fi-e_i);             (Teil-Effectivness Wand/Wasser)
  CpktWei:=e_wi*CpktW;

  {Annahme für Brennerstillstand: Effectivness = 1, Abgastemperatur und
  Wandtemperatur gleichen sich vollständig an.
  Ebenso wird angenommen, dass sich die Wandtemperatur und die
  Wassertemperatur im Bereitschaftsbetrieb völlig angleichen}
  if (not BrennerLaeuft) then
  begin
    CpktF:=Cpktf*f_stop;
    CpktFei:=CpktF;
    if (UmwEnde) and (Bereitschaft) then

```

```

begin
    CpktW:=CpktW*w_stop;
    CpktWei_b:=CpktW;
end;
end;

{Führt die Berechnung durch und schreibt die Temperaturwerte in ein File}
procedure Brenner_Run(soll:double;str:string);
var
    i,sp      :integer;
    T_old     :double;

begin
    step:=0;                      {Zählt die Zeitschritte wenn Brenner läuft}
    Brennerlaeuft:= true;
    i:=0;

    NTU_rechnen;
    InitGlSys;

    if Kaltstart then
        for sp:=1 to dim do T[sp]:=tL;      {Startwerte Temperatur bei Kaltstart}

    if Teillast or Bereitschaft or NNGZyklus then
    while T[9]<= soll do
    begin
        if i<500 then
            i:= i+1;
        tKsum:=tKsum+(T[9]+T[13])/2; {Summiert die mittleren Kesseltemp.}
        dTsum:=dTsum+(T[9]-T[13]);   {Summiert die tV-tR Differenzen}
        tVsum:=tVsum+T[9];          {Summiert die Vorlauftemperaturen}
        clip[1,i]:=Laufzeit;        {Zwischenspeicher}
        clip[2,i]:=T[4];
        clip[3,i]:=T[9];
        clip[4,i]:=T[13];
        Laufzeit:=Laufzeit+dt;
        Aufloesen;
        if i=500 then           {Schreiben in File nach 500 Schritten}
        begin
            Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
            i:=0;
        end;
    end;

    if Vollast then
    while (abs(T[9]-tV)>1e-4) do
    begin
        if i<500 then
            i:= i+1;
        clip[1,i]:=Laufzeit;
        clip[2,i]:=T[4];
        clip[3,i]:=T[9];
        clip[4,i]:=T[13];
        Laufzeit:=Laufzeit+dt;
        Aufloesen;
        if i=500 then
        begin
            Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
            i:=0;
        end;
    end;

    if einstellen then
    begin
        repeat
            T_old:=T[1];
            Aufloesen;
        until ((abs(T[1]-T_old)<1e-1));
    end;
end;

```

```

repeat
    T_old:=T[9];
    Aufloesen;
until ((abs(T[9]-T_old)<1e-6));
end;

if einstellen then                      {Restliche Werte in File schreiben}
  (do nothing)
else
  Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
end;

{Führt die Berechnung durch und schreibt die Temperaturwerte in ein File, wenn
der Brenner nicht läuft)
procedure Brenner_Stop(soll:double;str:string);
var
  i              :integer;
  Umwstop       :double;

begin
  Brennerlaeuft:= false;
  step:=0;
  i:=0;
  NTU_rechnen;
  InitG1Sys;

  if Teillast or NNGZyklus then
  while (T[9]>soll) do
  begin
    if i<500 then
      i:= i+1;
    dTsum:=dTsum+(T[9]-T[13]); {Summiert die tV-tR Differenzen}
    tVsum:=tVsum+T[9];
    tKsum:=tKsum+(T[9]+T[13])/2;
    clip[1,i]:=Laufzeit;
    clip[2,i]:=T[4];
    clip[3,i]:=T[9];
    clip[4,i]:=T[13];
    Laufzeit:=Laufzeit+dt;
    Aufloesen;
    if i=500 then
    begin
      Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
      i:=0;
    end;
  end;
  if Bereitschaft then
  begin
    UmwStop:=laufzeit+180.0;      {Wasserumwälzung läuft 3 Min nach}
    while (T[9]>soll)and (laufzeit<=UmwStop) do
    begin
      if i<500 then
        i:= i+1;
      tKsum:=tKsum+(T[9]+T[13])/2;
      clip[1,i]:=Laufzeit;
      clip[2,i]:=T[4];
      clip[3,i]:=T[9];
      clip[4,i]:=T[13];
      Laufzeit:=Laufzeit+dt;
      Aufloesen;
      if i=500 then
      begin
        Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
        i:=0;
      end;
    end;
  end;
  if (laufzeit>UmwStop) then

```

```

UmwEnde:= true;
NTU_rechnen;
InitG1Sys;
while (T[9]>soll)and (laufzeit>UmwStop) do
begin
  if i<500 then
    i:= i+1;
    tKsum:=tKsum+(T[9]+T[13])/2;
    clip[1,i]:=Laufzeit;
    clip[2,i]:=T[4];
    clip[3,i]:=T[9];
    clip[4,i]:=T[13];
    Laufzeit:=Laufzeit+dt;
    Aufloesen;
    if i=500 then
    begin
      Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
      i:=0;
    end;
  end;
end;
Write_Output(i,Laufzeit,str,Brennerlaeuft,clip);
end;

{initialisiert das Gleichungssystem}
Procedure InitG1Sys;
var
  mf,dtf,dtw,Tin      :double;
  ze,sp,p              :integer;

begin
  mf:= V_f*rol(Logtm(tad,tf,tL,tL),pL);
  Cfi:= cpf*mf/Awt*Awti;           {[J/K]}
  Czi:=mm*verteiler/Awt*Awti*cZ;   {[J/K]}
  Cwi:=mw/Awt*Awti*cW;            {[J/K]}
  Cm:=mm*(1-verteiler)*cZ;        {[J/K]}

  { Lzi:=lambdaZ*Az/li;      {[W/K]}  (zu Ansatz Laengsleitung)

  {Waermeuebergang Wasser-Aussenwand }
  Aaw:=alpha_w*Awti;               {[W/K]}
  Aav:=QpktS/((tV-QpktS/Aaw)-tL); {[W/K]}

  {Faktor f2 bestimmt die Wärmeabgabe und damit die Rücklauftemperatur}
  f2:=(tV-tR)/(tV+tR-2*tSenke)*Last;

  if (Brennerlaeuft)then          (Zeitschritt bestimmen)
  begin
    dtf:=Cfi/Cpktf;
    dtw:=Cwi/Cpktw;
    if dtw<dtf then
      dt:= dtw
    else
      dt:= dtf;
  end;

  for ze:=1 to dim do
    for sp:=1 to dim+2 do
      G[ze,sp]:=0.0;

  for p:=1 to 4 do
  begin
    G[p,p]:=Cfi/dt-Cpktf;
    G[p,p+4]:=Cpkfei;
    G[p,dim+1]:=Cfi/dt;
    G[p+4,p+9]:=CpkWei;
    G[p+4,dim+1]:=Czi/dt;
    G[p+8,p+4]:=CpkWei;
    G[p+8,p+9]:=Cpktw-CpkWei;
  end;

```

```

        G[p+8,dim+1]:=Cwi/dt;
      end;

      for p:=1 to 3 do
      begin
        G[p+1,p]:=Cpktfei;
        G[p+4,p+5]:=Lzi;                                {zu Ansatz Laengsleitung)
        G[p+5,p]:=Cpktfei;
        G[p+5,p+4]:=Lzi;                                {zu Ansatz Laengsleitung)
        G[p+9,p+9]:=Cwi/dt-Cpktw;
      end;

      for p:=1 to 2 do
        G[p+5,p+5]:=Czi/dt-Cpktfei-Cpktwei(-2*Lzi);

      G[5,5]:=Czi/dt-Cpktfei-Cpktwei(-Lzi);
      G[8,8]:=Czi/dt-Cpktfei-Cpktwei(-Lzi);
      G[9,9]:=Cwi/dt-Cpktw-Aaw;
      G[9,14]:=Aaw;
      G[13,9]:=(1-f2)/(1+f2);
      G[13,dim+1]:=1;
      G[14,9]:=Aaw;
      G[14,14]:=Cm/dt-Aaw-Aav;
      G[14,dim+1]:=Cm/dt;

      if BrennerLaeuft then
        Tin:=tad
      else
        Tin:=tL;
      G[1,dim+2]:=Tin*(Cpktfei-Cpktf);
      G[5,dim+2]:=-Tin*Cpktfei;

      G[13,dim+2]:=-2*f2/(1+f2)*tSenke;
      G[14,dim+2]:=-tL*Aav;
    end;

{Löst das Gleichungssystem auf für jeden Zeitschritt. Wenn Die Abgastemperatur
unter der Taupunkttemperatur liegt, wird die Kondensation berücksichtigt}
Procedure Aufloesen;
var
  ze,sp,p                               :integer;
  QpktK_tot,Qpkt_3,Qpkt_4,
  Cpktfe3_f,Cpktfe3_z,
  Cpktfe4_f,Cpktfe4_z,f3_3,f3_4       :double;
  Tplus1                                 :array[1..dim]of double;

begin
  {Der array wait wird verwendet um die Verzögerung der Antwort von tR auf
  eine Änderung von tV zu erreichen. Damit kann die Umlaufzeitdauer
  berücksichtigt werden}
  if kaltstart then
  begin
    AnzSchr:=1+round(delay/dt);
    wait:=VarArrayCreate([1,AnzSchr],vardouble);
    for p:=1 to AnzSchr do
      wait[p]:=tL;
    stp:=1;
    kaltstart:=false;
  end;

  if Brennerlaeuft then
    step:=step+1;
  for ze:=1 to dim do
    Tplus1[ze]:=0;

  {Behandeln der Kondensation ohne Berücksichtigung der Rückverdampfung
  in der Aufheizphase (instationäre Phase). Das Modell wird dadurch etwas
  zu positive Resultate erreichen.}
  {Die ersten Zeitschritte nach dem Einschalten des Brenners werden nicht

```

```

berücksichtigt für die Kondensation)
if step > 4 then          {Voraussetzung: Brenner läuft}
begin
  if T[3]<tS then
    begin
      QpktK_3:=delta_hk(T[3],pL,M_vtr,xv,mue)*mpktB;
      Qpkt_3:=(T[2]-T[3])*CpktF;
      e_f3:= e_wi*e_i*CpktW*Qpkt_3/
              (e_wi*Qpkt_3*CpktW+e_wi*QpktK_3*CpktF*e_i-
               CpktF*e_i*(Qpkt_3+QpktK_3));
      f3_3:=(QpktK_3+Qpkt_3)/Qpkt_3;
    end
  else
    begin
      e_f3:=e_fi;
      QpktK_3:=0.0;
      f3_3:=1.0;
    end;

  Cpkf3_f:=e_f3*CpktF;
  Cpkf3_z:=Cpkf3_f*f3_3;
  G[3,2]:=Cpkf-Cpkf3_f;
  G[3,7]:=Cpkf3_f;
  G[7,2]:=Cpkf3_z;
  G[7,7]:=Czi/dt-Cpkf3_z-Cpktwi-2*Lzi;

  if T[4]<tS then
  begin
    QpktK_tot:=delta_hk(T[4],pL,M_vtr,xv,mue)*mpktB;
    QpktK_4:=QpktK_tot-QpktK_3;
    Qpkt_4:=(T[3]-T[4])*CpktF;
    f3_4:=(QpktK_4+Qpkt_4)/Qpkt_4;
    e_f4:= e_wi*e_i*CpktW*Qpkt_4/
           (e_wi*Qpkt_4*CpktW+e_wi*QpktK_tot*CpktF*e_i-
            CpktF*e_i*(Qpkt_4+QpktK_4));
  end
  else
    begin
      e_f4:=e_fi;
      QpktK_4:=0.0;
      f3_4:=1.0;
    end;

  Cpkf4_f:=e_f4*CpktF;
  Cpkf4_z:=Cpkf4_f*f3_4;
  G[4,3]:=Cpkf-Cpkf4_f;
  G[4,8]:=Cpkf4_f;
  G[8,3]:=Cpkf4_z;
  G[8,8]:=Czi/dt-Cpkf4_z-Cpktwi-Lzi;
end;

{Auflösen des Gleichungssystems}
for ze:=1 to dim do
  begin
    for sp:=1 to dim do
      Tplus1[ze]:=Tplus1[ze]+G[ze,sp]*T[sp];
    Tplus1[ze]:=(Tplus1[ze]-G[ze,dim+2])/G[ze,dim+1];
  end;

{Behandlung der Rücklauftemperatur}
{tR wird nicht direkt mit dem tV des letzten Zeitschrittes berechnet,
sondern mit einem um eine bestimmte Zeitspanne zurückliegenden tV. Dazu
werden die tV in einem array mit entsprechender Länge zwischengespeichert}
Tplus1[13]:=(1-f2)/(1+f2)*wait[stp]+2*f2/(1+f2)*tSenke;
wait[stp]:=Tplus1[9];
stp:=stp+1;
if stp > AnzSchr then
  stp:=1;

for p:=1 to dim do

```

```
T[p]:=Tplus1[p];  
end;  
  
end. {***** Ende von Modell_explizit_kond *****}
```

12. Anhang 2: Messresultate

- Kessel 12: Normnutzungsgrad bei 75/60°C

Erstellt	6.12.94	EMPA Nr.	167701/DIN
Kesseltyp	Standard	Brennstoffwerte	
Messung nach	DIN	Analysedatum:	2.9.94
Modell	0	di	841.9
Eingelesene Werte		vi	3.78
max. Feuerungsleistung kW	53	Hu	42.5
max. Heizleistung kW	51.5	c	86.16
Kesselwirkungsgrad %	97.2	h	14.01
Vorlauftemperatur °C	75.2	s	0.164
Rücklauftemperatur °C	59.8	n	133
Feuerraumdruck mbar	0.85	o	0
Kamindruck mbar	0.01	w	0
Öeldurchsatz kg/h	4.49		
O2-Gehalt im Abgas %v	3.9		
CO-Gehalt im Abgas ppm	12		
relativer Bereitschaftsverlust %	0.8		
min. zul. Vor-/Rücklauftemp. °C	0		
bezogen auf	Tv		
Zulauftemperatur °C	13.3		
Verbrennungslufttemperatur °C	21.3		

	Teillast 13.0%	Teillast 30.0%	Teillast 39.0%	Teillast 48.0%	Teillast 63.0%
Mischwagen	MIWA8	MIWA8	MIWA8	MIWA8	MIWA8
Öelwaage	PC24	PC24	PC24	PC24	PC24
Datum	9.12.94	9.12.94	8.12.94	8.12.94	8.12.94
Startzeit	13:43	10:07	10:17	12:00	14:56
Teillastnutzungsgrad %	101.2	102.7	100.7	101.1	98.6
Soll-Rücklauftemperatur °C	25	32	36	39	45
Soll-Vorlauftemperatur °C	27	37	42	46	55
Soll-Kesselemparatur °C	keine	keine	keine	keine	keine
Soll-Umlauf m3/h	2.879	2.879	2.879	2.879	2.879
Soll-Teillast %	13.0±3%	30.0±3%	39.0±3%	48.0±3%	63.0±3%
Abbruchkriterium erfüllt bei Zyklus	5	3	3	4	3
Zyklen Nr	1-3	3-5	1-3	4-6	1-3
Abweichung %	-1.44	-1.29	-3.06	-2.85	-1.17
Teillastnutzungsgrad %	104.2	101.2	102.7	102.0	100.7
Teillast eff. %	11.6	11.7	26.9	27.1	37.9
Dauer h:m:s	0:45:00	0:44:48	0:30:28	0:30:48	0:29:00
Öeldurchsatz kg/h	4.356	4.407	4.431	4.397	4.466
mittlerer Ölverbrauch kg	0.121	0.126	0.194	0.199	0.265
Anzahl Zyklen	3	3	3	3	3
mittlere Zyklusdauer h:m:s	0:15:00	0:14:56	0:10:09	0:10:16	0:09:40
mittlere Brennerlaufzeit h:m:s	0:01:40	0:01:43	0:02:37	0:02:43	0:03:33
Feuerungswärmeleistung kW	5.714	5.961	13.507	13.707	19.395
Heizleistung kW	5.955	6.033	13.875	13.980	19.523
Kaltwasser-Zulauf m3/h	0.418	0.418	0.564	0.564	0.606
Kesselwasser-Umlauf m3/h	2.927	2.931	2.864	2.868	2.898
Umgebungstemperatur °C	19.8	19.8	19.8	19.7	19.0
Zulauftemperatur °C	15.0	14.9	14.7	14.7	14.5
Rücklauftemperatur °C	25.9	25.9	32.0	32.0	36.6
Vorlauftemperatur °C	27.8	27.8	36.3	36.4	42.5
Kesseltemperatur °C	26.9	26.9	34.1	34.2	39.5
Verbrennungslufttemperatur °C	19.5	19.6	19.1	19.2	18.6
Feuerraumdruck mbar	0.77	0.75	0.77	0.77	0.95
Kamindruck mbar	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
O2-Gehalt im Abgas %v	4.61	4.61	4.37	4.39	4.35
CO-Gehalt im Abgas ppm	15	15	13	14	12
VOC-Gehalt im Abgas ppm	1	1	1	1	1
NO-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
NOx-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0

- Kessel 12: Normnutzungsgrad bei 40/30°C
(Teillast: 63%, 48%, 13%)**

Erstellt 10.12.94 EMPA Nr. 167701/DIN Kond.

Kesseltyp	Niedertemperatur	Brennstoffwerte
Messung nach	DIN	Analysedatum:
Modell	0	di 2.9.94
Eingelesene Werte:		vi 841.9
max. Feuerungsleistung kW	52.78	Hu 3.78
max. Heizleistung kW	55.04	c 42.5
Kesselwirkungsgrad %	104.28	h 86.16
Vorlauftemperatur °C	40.02	s 14.01
Rücklauftemperatur °C	29.86	n 0.164
Feuerraumdruck mbar	0.87	o 133
Kamindruck mbar	0.01	w 0
Öldurchsatz kg/h	4.47	
O2-Gehalt im Abgas %v	16.15	
CO-Gehalt im Abgas ppm	3.7	
relativer Bereitschaftsverlust %	0	
min. zul. Vor-/Rücklauftemp. °C	0	
bezogen auf	Tv	
Zulauftemperatur °C	14.15	
Verbrennungslufttemperatur °C	0	

	Teillast 13.0%	Teillast 48.0%	Teillast 63.0%
Mischwagen	MIWA3	MIWA3	MIWA3
Öelwaage	PM16	PM16	PM16
Datum	15.12.94	13.12.94	13.12.94
Startzeit	12:53	14:34	13:10
Teillastnutzungsgrad %	108.392	108.4	107.8
Soll-Rücklauftemperatur °C	21	25	26
Soll-Vorlauftemperatur °C	23	30	33
Soll-Kesseltemperatur °C	keine	keine	keine
Soll-Umlauf m3/h	4.665	4.665	4.665
Soll-Teillast %	13.0±3%	48.0±3%	63.0±3%
Abbruchkriterium erfüllt bei Zyklus	9	4	3
Zyklen Nr	1-3	4-6	1-6
Abweichung %	1.95	2.50	-0.72
Teillastnutzungsgrad %	106.4	110.4	108.4
Teillast eff. %	14.9	15.5	15.2
Dauer h:m:s	0:35:16	0:35:24	0:35:20
Öldurchsatz kg/h	4.389	4.4	4.3945
mittlerer Ölverbrauch kg	0.128	0.129	0.1285
Anzahl Zyklen	3	3	3
mittlere Zyklusdauer h:m:s	0:11:45	0:11:48	0:11:47
mittlere Brennerlaufzeit h:m:s	0:01:45	0:01:45	0:01:45
Feuerungswärmeleistung kW	7.737	7.728	7.733
Heizleistung kW	8.228	8.533	8.381
Kaltwasser-Zulauf m3/h	0.568	0.568	0.568
Kesselwasser-Umlauf m3/h	4.639	4.635	4.637
Umgebungstemperatur °C	32.9	34.1	33.5
Zulauftemperatur °C	16.0	16.1	16.1
Rücklauftemperatur °C	27.3	27.9	27.6
Vorlauftemperatur °C	29.1	29.6	29.3
Kesseltemperatur °C	28.2	28.7	28.5
Verbrennungslufttemperatur °C	20.0	20.1	20.1
Feuerraumdruck mbar	-0.82	-1.32	-1.07
Kamindruck mbar	-4.09	-5.70	-4.90
O2-Gehalt im Abgas %v	4.84	4.84	4.84
CO-Gehalt im Abgas ppm	15	14	15
VOC-Gehalt im Abgas ppm	2	2	2
NO-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0
NOx-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0

- Kessel 14: Normnutzungsgrad bei 75/60°C**

Erstellt	24.3.03	EMPA Nr. 200032					
Mischwagen Oelwaage	MIWA7 PC24	Brennstoffwerte: Analysedatum:	4.9.02	di	0	vi	0
				Hu	35.9	c	75
				h	25	s	0
				n	0	o	0
				w	0		
Datum	Datum	25.3.99	25.3.99	25.3.99	25.3.99	25.3.99	25.3.99
Startzeit	Startzeit	10:19	11:42	13:19	14:33	15:54	
max. Feuerungsleistung kW	13.524	Soll-Rücklauftemperatur °C	45	39	36	32	25
max. Heizleistung kW	13.250	Soll-Vorlauftemperatur °C	55	46	42	37	27
Kesselwirkungsgrad %	98.0	Soll-Kesseltemperatur °C	keine	keine	keine	keine	keine
eff. Abgasverlust %	2.7	Soll-Umlauf m3/h	0.762	0.762	0.762	0.762	0.762
Verl. Strahl.+Leit. %	-0.7	Soll-Teillast %	63.0±3%	48.0±3%	39.0±3%	30.0±3%	13.0±3%
norm. Abgasverlust %	3.4						
Vorlauftemperatur °C	77.1	Zyklen Nr	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10
Rücklauftemperatur °C	62.2	Teillastnutzungsgrad %	98.89	99.97	101.00	98.78	98.13
Abgastemperatur 1-Punkt °C	66.1	Teillast eff. %	62.3	49.7	39.0	28.0	12.4
Raumtemperatur °C	22.8	Dauer h:m:s	0:30:20	0:27:12	0:28:28	0:35:16	1:02:44
Feuerraumdruck mbar	-	Gasdurchsatz Nm3/h	0.838	0.660	0.513	0.377	0.168
Kamindruck mbar	-0.05	Anzahl Zyklen	10	10	10	10	10
Gasdurchsatz Nm3/h	1.356	mittlere Zyklusdauer h:m:s	0:03:02	0:02:43	0:02:51	0:03:32	0:06:16
O2-Gehalt im Abgas %v	5.92	mittlere Brennerlaufzeit h:m:s	0:01:52	0:01:18	0:01:04	0:00:58	0:00:45
CO-Gehalt im Abgas mg/Nm3	32	Feuerungswärmeleistung kW	8.354	6.581	5.119	3.757	1.674
NOx-Gehalt im Abgas mg/Nm3	56	Heizleistung kW	8.261	6.579	5.17	3.711	1.643
VOC-Gehalt im Abgas mg/Nm3	0	Kaltwasser-Zulauf m3/h	0.171	0.166	0.153	0.145	0.108
Russzahl	0	Kesselwasser-Umlauf m3/h	751.4	736.5	713.5	672.8	592.4
relativer Bereitschaftsverlust %	0	Umgebungstemperatur °C	22.2	22.5	22.8	22.9	22.8
Wassergehalt der Verbr.luft g/kg	8.5	Zulauftemperatur °C	13.2	12.5	12.5	12.8	12.8
min. zul. Vor-/Rücklauftemp. °C	0	Rücklauftemperatur °C	45.3	39.3	36.0	31.7	25.1
bezogen auf	Tv	Vorlauftemperatur °C	54.8	46.9	42.2	36.4	27.5
Zulauftemperatur °C	13.3	Kesseltemperatur °C	50.1	43.1	39.1	34.0	26.3
Verbrennungslufttemperatur °C	21.4	Verbrennungslufttemperatur °C	28.1	27.7	27.9	27.2	25.4
		Feuerraumdruck mbar	0	0	0	0	0
		Kamindruck mbar	0	0	0	0	0
		O2-Gehalt im Abgas %v	5.94	5.95	5.99	6.02	6.06
		CO-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
		VOC-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
		NOx-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
Volumen Beginn ltr	129850	Volumen ltr	143834	144940	145966	146572	146976
Volumen Ende ltr	133020	Beginn Zyklus	2	2	2	1	1
Dauer s	7544.04	Volumen ltr	144307	145342	146265	146819	147172
Kalibrations-Korrektur für 1.6 m	1.0039	Beginn Zyklus	12	14	13	11	11
Gasdruck mbar	24	Dauer s	1822.35	1966	1879.95	2115.91	3767.53
Barometer mbar	954	Kalibrations-Korrektur für 1.6 m	1.0039	1.0039	1.0039	1.0039	1.0039
Gastemperatur °C	20	Gasdruck mbar	24	24	24	24	24
		Barometer mbar	954	954	954	954	954
		Gastemperatur °C	20	20	20	20	20
Einstellungen:		Einstellungen:					
1 Hysterese Kesseltemp. K	8	1 Hysterese Kesseltemp. K	16	16	16	16	16
2 min. Drehzahl U/s	45	2 min. Drehzahl U/s	45	45	45	45	45
3 max. Drehzahl U/s	45	3 max. Drehzahl U/s	45	45	45	45	45
4 max. Heizleistung kW	45	4 max. Heizleistung kW	45	45	45	45	45
5 Frostschutz Ausentemp. °C	2	5 Frostschutz Ausentemp. °C	2	2	2	2	2
6 Dauerbetrieb	0	6 Dauerbetrieb	0	0	0	0	0
7 Pumpennachlauf 0.1 min	50	7 Pumpennachlauf 0.1 min	50	50	50	50	50
8 max. Kesseltemp. °C	90	8 max. Kesseltemp. °C	90	90	90	90	90
9 Taktsperrre min	0	9 Taktsperrre min	0	0	0	0	0
10 Heizleistung LAS kW	13	10 Heizleistung LAS kW	13	13	13	13	13
11 Thermostat Skala	6	11 Thermostat Skala	6	6	6	6	6
Last %	100	Last %	63	48	39	30	13

- Kessel 14: Normnutzungsgrad bei 75/60°C (gleitend)**

Erstellt	24.3.03	EMPA Nr. 200032					
Mischwagen Oelwaage	MIWA7 PC24	Brennstoffwerte					
		Analysedatum:	4.9.02				
		di	0				
		vi	0				
		Hu	35.9				
		c	75				
		h	25				
		s	0				
		n	0				
		o	0				
		w	0				
Datum	Datum	29.3.99	30.3.99	30.3.99	31.3.99	31.3.99	
Startzeit	Startzeit	11:58	11:26	14:58	9:30	10:52	
max. Feuerungsleistung kW	14.258	Soll-Rücklauftemperatur °C	45	39	36	32	
max. Heizleistung kW	13.250	Soll-Vorlauftemperatur °C	55	46	42	37	27
Kesselwirkungsgrad %	92.9	Soll-Kesseltemperatur °C	keine	keine	keine	keine	keine
eff. Abgasverlust %	2.7	Soll-Umlauf m3/h	0.749	0.749	0.749	0.749	0.749
Verl. Strahl.+Leit. %	4.4	Soll-Teillast %	63.0±3%	48.0±3%	39.0±3%	30.0±3%	13.0±3%
norm. Abgasverlust %	3.4						
Vorlauftemperatur °C	76.2	Zyklus Nr	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10
Rücklauftemperatur °C	60.6	Teillastnutzungsgrad %	100.5	104.0	104.2	104.5	102.7
Abgastermperatur 1-Punkt °C	66.1	Teillast eff. %	61.6	49.6	39.9	33.6	12.1
Raumtemperatur °C	22.8	Dauer h:m:s	1:03:10	1:44:28	1:05:40	0:57:32	1:21:13
Feuerraumdruck mbar	0	Gasdurchsatz Nm3/h	0.814	0.634	0.508	0.428	0.156
Kamindruck mbar	-0.01	Anzahl Zyklen	-	10	10	10	10
Gasdurchsatz Nm3/h	1.430	mittlere Zyklusdauer h:m:s	-	0:10:27	0:06:34	0:05:45	0:08:07
O2-Gehalt im Abgas %v	5.95	mittlere Brennerlaufzeit h:m:s	-	0:08:16	0:03:58	0:02:54	0:01:24
CO-Gehalt im Abgas mg/Nm3	32	Feuerungswärmeleistung kW	8.119	6.326	5.066	4.266	1.559
NOx-Gehalt im Abgas mg/Nm3	56	Heizleistung kW	8.160	6.578	5.281	4.457	1.601
VOC-Gehalt im Abgas mg/Nm3	0	Kaltwasser-Zulauf m3/h	0.17	0.174	0.160	0.162	0.113
Russzahl	0	Kesselwasser-Umlauf m3/h	695.7	890.0	846.9	750.7	523.8
relativer Bereitschaftsverlust %	0	Umgebungstemperatur °C	22.2	22.6	23.2	22.7	22.7
Wassergehalt der Verbr. luft g/kg	8.5	Zulauftemperatur °C	13.3	12.5	12.7	13.3	13.3
min. zul. Vor-/Rückläufigkeit °C	0	Rücklauftemperatur °C	44.5	39.0	36.1	32.6	24.5
bezogen auf	Tv	Vorlauftemperatur °C	54.6	45.4	41.5	37.7	27.1
Zulauftemperatur °C	13.1	Kesseltemperatur °C	49.6	42.2	38.8	35.1	25.8
Verbrennungslufttemperatur °C	27	Verbrennungslufttemperatur °C	27.0	27.2	27.4	26.7	25.7
		Feuerraumdruck mbar	0	0	0	0	0
		Kamindruck mbar	0	0	0	0	0
		O2-Gehalt im Abgas %v	6.60	6.73	6.62	6.55	0.00
		CO-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
		VOC-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
		NOx-Gehalt im Abgas ppm	0	0	0	0	0
Volumen Beginn ltr	149420	Volumen ltr	159230	166052	168298	170002	170552
Volumen Ende ltr	151060	Beginn Zyklus	kont.Betrieb	1	1	1	1
Dauer s	3762.4	Volumen ltr	160180	167462	169347	170272	170780
Kalibrations-Korrektur für 1.6 m3	1.00391527	Beginn Zyklus	kont.Betrieb	13	18	11	11
Gasdruck mbar	24	Dauer s	3827.67	7290.45	6773.11	2070.41	4783
Barometer mbar	970	Kalibrations-Korrektur für 1.6 m	1.003915	1.003915	1.003915	1.003915	1.003915
Gastemperatur °C	20	Gasdruck mbar	24	24	24	24	24
		Barometer mbar	970	970	970	970	970
		Gastemperatur °C	20	20	20	20	20
Einstellungen:		Einstellungen:					
1 Hysterese Kesseltemp. K	8	1 Hysterese Kesseltemp. K	8	16	16	16	16
2 min. Drehzahl U/s	30	2 min. Drehzahl U/s	25	27	27	27	27
3 max. Drehzahl U/s	76	3 max. Drehzahl U/s	76	76	76	76	76
4 max. Heizleistung kW	47	4 max. Heizleistung kW	47	47	47	47	47
5 Frostschutz Ausentemp. °C	5	5 Frostschutz Ausentemp. °C	5	5	5	5	5
6 Dauerbetrieb	0	6 Dauerbetrieb	0	0	0	0	0
7 Pumpennachlauf 0.1 min	50	7 Pumpennachlauf 0.1 min	50	50	50	50	50
8 max. Kesseltemp. °C	90	8 max. Kesseltemp. °C	90	90	90	90	90
9 Taktsperrre min	5	9 Taktsperrre min	5	0	0	0	0
10 Heizleistung LAS kW		10 Heizleistung LAS (U=1/ml)	30				
11 Thermostat Skala	8	11 Thermostat Skala	5.2	2.9	2.7	2.2	1.5
Last %	100	Last %	63	48	39	30	13

- Kessel 14: 30%-Teillastnutzungsgrad (EN)**

Erstellt	24.3.03	EMPA Nr.	200032
Mischwagen Ölwaage	MIWA7 PC24	Brennstoffwerte Analysedatum:	36041
		di	0
		vi	0
		Hu	35.9
		c	75
		h	25
		s	0
		n	0
		o	0
		w	0
Datum	Datum	26.3.99	
Startzeit	Startzeit	9:10	
max. Feuerungsleistung kW	13.524	Soll-Rücklauftemperatur °C	keine
max. Heizleistung kW	13.250	Soll-Vorlauftemperatur °C	keine
Kesselwirkungsgrad %	98.0	Soll-Kesseltemperatur °C	>= 50 °C
eff. Abgasverlust %	2.7	Soll-Umlauf m3/h	0.762
Verl. Strahl.+Leit. %	-0.7	Soll-Teillast %	30.0±2%
norm. Abgasverlust %	3.4	Zyklen Nr	1-10
Vorlauftemperatur °C	77.1	Teillastnutzungsgrad %	94.17
Rücklauftemperatur °C	62.2	Teillast eff. %	30.5
Abgastemperatur 1-Punkt °C	66.1	Dauer h:m:s	0:32:33
Raumtemperatur °C	22.8	Gasdurchsatz Nm3/h	0.430
Feuerraumdruck mbar	-	Anzahl Zyklen	10
Kamindruck mbar	-0.05	mittlere Zyklusdauer h:m:s	0:03:15
Gasdurchsatz Nm3/h	1.356	mittlere Brennerlaufzeit h:m:s	0:01:02
O2-Gehalt im Abgas %v	5.92	Feuerungswärmeleistung kW	4.286
CO-Gehalt im Abgas mg/Nm3	32	Heizleistung kW	4.036
NOx-Gehalt im Abgas mg/Nm3	56	Kaltwasser-Zulauf m3/h	0.087
VOC-Gehalt im Abgas mg/Nm3	0	Kesselwasser-Umlauf m3/h	723.1
Russzahl	0	Umgebungstemperatur °C	21.9
relativer Bereitschaftsverlust %	0	Zulauftemperatur °C	14.9
Wassergehalt der Verbr. Luft g/kg	8.5	Rücklauftemperatur °C	50.0
min. zul. Vor-/Rücklauftemp. °C	0	Vorlauftemperatur °C	54.8
bezogen auf	Tv	Kesseltemperatur °C	52.4
Zulauftemperatur °C	13.3	Verbrennungslufttemperatur °C	28.6
Verbrennungslufttemperatur °C	21.4	Feuerraumdruck mbar	0
		Kamindruck mbar	0
		O2-Gehalt im Abgas %v	6.04
		CO-Gehalt im Abgas ppm	0
		VOC-Gehalt im Abgas ppm	0
		NOx-Gehalt im Abgas ppm	0
Volumen Beginn ltr	129850	Volumen ltr	147794
Volumen Ende ltr	133020	Beginn Zyklus	1
Dauer s	7544.04	Volumen ltr	148054
Kalibrations-Korrektur für 1.6 m³	1.00391527	Beginn Zyklus	11
Gasdruck mbar	24	Dauer s	1982.36
Barometer mbar	954	Kalibrations-Korrektur für 1.6 m³	1.00392
Gastemperatur °C	20	Gasdruck mbar	24
		Barometer mbar	954
		Gastemperatur °C	20
Einstellungen:		Einstellungen:	
1 Hysterese Kesseltemp. K	8	1 Hysterese Kesseltemp. K	16
2 min. Drehzahl U/s	45	2 min. Drehzahl U/s	45
3 max. Drehzahl U/s	45	3 max. Drehzahl U/s	45
4 max. Heizleistung kW	45	4 max. Heizleistung kW	45
5 Frostschutz Ausentemp. °C	2	5 Frostschutz Ausentemp. °C	2
6 Dauerbetrieb	0	6 Dauerbetrieb	0
7 Pumpennachlauf 0.1 min	50	7 Pumpennachlauf 0.1 min	50
8 max. Kesseltemp. °C	90	8 max. Kesseltemp. °C	90
9 Taktsperrre min	0	9 Taktsperrre min	0
10 Heizleistung LAS kW	13	10 Heizleistung LAS kW	13
11 Thermostat Skala	6	11 Thermostat Skala	6
Last %	100	Last %	63

13. Literatur

- 1 Energierelevante Typenprüfung von Öl- und Gasheizkesseln; Ch.Erb, Dr. Eicher & Pauli AG
- 2 Berechnung des Jahresnutzungsgrades von Heizkesseln (Vorschlag zuhanden des Bundesamtes für Energiewirtschaft); G.Zweifel, EMPA
- 3 Energierelevante Typenprüfung für Öl- und Gasheizkessel mit Gebläsebrenner; Th. Cerkez, EMPA
- 4 Annual efficiency calculation method for domestic boilers, WP 9: Development of Computer Program BoilSim; Hans van Wolferen, Jan Woodrow
- 5 Annual efficiency calculation method for domestic boilers (Final Report); Jean Schweizer
- 6 Typengeprüfte Gebläsebrenner, Heizkessel und Wasservorwärmer (Brenner/Kesselliste, Herausgegeben von Bundesamt für Energie BFE und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL)
- 7 Etude et simulation du comportement dynamique de chaufferies; Thierry Ottin, Labor für Energiesysteme, ETH Zürich
- 8 Annual efficiency calculation method for domestic boilers; WP 6: Start/Stop Losses Measurement Method, Evaluation of Possible Methods to be Used; Martin Koot, Michael Koschowitz, Mikael Näslund
- 9 Validierung von Luft-Erdregistermodellen; Diplomarbeit von Roland Rütti und Stefan Remund; ETH Zürich
- 10 Fundamentals of Heat and Mass Transfer; Frank P. Incropera, David P. DeWitt
- 11 VDI Wärmeatlas: Abschnitt Ca: Berechnung von Wärmeübertragern, 4. Auflage
- 12 Thermodynamik; Hans Dieter Baehr; Springer-Lehrbuch
- 13 Brennstoffe-Wärme-Kraft 40 (1988) 30-33: Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen; H.D. Baehr, Ch. Diederichsen
- 14 VDI Wärmeatlas: Abschnitt Cb6, 4. Auflage
- 15 VDI Wärmeatlas: Abschnitt Gb: Wärmeübertragung bei der Strömung durch Rohre und Abschnitt Gd: Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt, 4. Auflage
- 16 Planungsanleitung Vertomat, Viessmann Werke GmbH&Co, D-35107 Allendorf (5811 056, 11/95)