

**Schlussbericht Juni 2005**

# **Regelkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen mit Speicher**

**Messungen an einer Anlage in Azmoos**

ausgearbeitet durch  
Hans Rudolf Gabathuler und Hans Mayer  
Gabathuler AG, Beratende Ingenieure  
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen

**Autoren:**

Hans Rudolf Gabathuler  
Hans Mayer  
Gabathuler AG  
Beratende Ingenieure  
Kirchgasse 23  
8253 Diessenhofen  
gabathuler.ag@bluewin.ch

**Begleitgruppe:**

Heinz Böhler  
Köb & Schaefer KG  
Flotzbachstrasse 33  
A-6922 Wolfurt

Ruedi Bühler  
Umwelt und Energie  
Sagiweg 4  
8933 Maschwanden

Heinz Eggenberger  
Ingenieur + Planer  
Bühlstrasse 2  
9470 Buchs

Andres Jenni  
ardens GmbH  
Rufsteinweg 1  
4410 Liestal

Wolfgang Rosegger  
Schneid Ges.m.b.H.  
Fahrschulweg 9  
A-8054 Graz-Pirka

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie  
3003 Bern

Vertreten durch den  
Bereichsleiter Holzenergie  
Daniel Binggeli

# Zusammenfassung

Im Rahmen von «QM Holzheizwerke» wurden 6 Standard-Schaltungen für Holzheizungsanlagen definiert. Die beiden wichtigsten sind die bivalente Holzheizungsanlage ohne Speicher (WE3) und die bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher (WE4). An der Versuchsanlage in Azmoos (nahe Sargans) wurde WE4 untersucht.

Die Versuchsanlage wurde zunächst nicht mit der Regelstrategie gemäss Standard-Schaltung WE4 betrieben, sondern statt des effektiven Speicherladezustandes wurde als Ersatzgrösse der Mittelwert der Speichertemperatur verwendet. Dieses Regelkonzept arbeitete zufriedenstellend. Insbesondere das ziemlich gut geglättete Istwertsignal (keine Sprünge) war praktisch bei der Reglereinstellung, weil damit mit üblichen Regelparametern gearbeitet werden konnte.

Die exakte Programmierung der Regelstrategie WE4 konnte leider nur als P-Regler, aber nicht als PI-Regler realisiert werden. Die Argumentation gegen den PI-Regler war sowohl beim Lieferanten des MSR-Systems wie auch beim Holzkesselhersteller, dass die Anlage mit den beiden anderen getesteten Regelkonzepten ja bestens arbeite. Ein tiefergreifendes Verständnis für die Untersuchung und die dafür notwendige Motivation konnte bei den betroffenen Firmen leider trotz Verlängerung des Projektes nicht erreicht werden.

Da die Anwendung der Regelstrategie WE4 in zahlreichen anderen Anlagen längst Realität ist, wurden die in diesen Anlagen gemachten Erfahrungen zusammen mit den im vorliegenden Projekt gemachten Erfahrungen in einem Merkblatt zusammengefasst. Dieses Merkblatt ist bereits von der Website [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch) herunterladbar. Neu wurde auf der Website auch eine Liste häufig gestellter Fragen FAQ's eingerichtet. Diese Massnahmen sollten in Zukunft helfen, den beteiligten Firmen von Anfang an das Regelkonzept und insbesondere die Istwerterfassung klar zu machen.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass noch zahlreiche Fragen offen sind. Deshalb werden zwei Projektvorschläge als sinnvolle Ergänzung zum vorliegenden Projekt formuliert – ein Messprojekt für die Standard-Schaltung WE3 und ein Projekt zur Simulation der Standard-Schaltungen WE3 und WE4.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.
--

## Abstract

Under the «QM Holzheizwerke» programme, 6 standard circuits for wood heating installations were laid out. The two principal types are a bivalent heating plant without storage tank (WE3) and a bivalent plant with storage tank (WE4). The WE4 installation was tested in Azmoos (near Sargans).

The control procedure used in the test installation did not correspond exactly to the specified procedure. Thus instead of the heat stored, a substitute value based on the mean temperature in the tank was used. This method was found to be satisfactory. The mean temperature varied smoothly (i.e. without abrupt changes), which facilitated setting of the control values, since the customary control parameters could be applied.

Unfortunately, in programming the WE4 control procedure, it was not possible to use a PI controller as originally intended; instead, a P controller was programmed. The supplier of the measurement and control system and the manufacturer of the wood burner both opposed the PI controller on the grounds that the installation performed perfectly satisfactorily using the two control procedures already tested. Unfortunately, although the project deadline was extended, attempts to develop greater understanding on the part of these firms of the need to use a PI controller in the tests, and to motivate them to do so, were unsuccessful.

As the WE4 control procedure had already been realised in numerous other installations, the experience gained from these, together with that from the present project, were summarised briefly in a memorandum. The memorandum may be downloaded at [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch). As a new feature, the website now contains a list of frequently asked questions (FAQ). It is hoped that this information will enable the firms involved to grasp the fundamentals of the control procedure – particularly where measurement of the control value is concerned – from the outset.

In conclusion, it must be admitted that many questions still remain unanswered. Two suggestions for additional work to extend the present project are formulated: one to measure the standard WE3 circuit, and another to simulate the standard WE3 and WE4 circuits.

This project was carried out on behalf of the Swiss Federal Office of Energy. Responsibility for the content and conclusions of the report lies entirely with the authors.
--

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
Abstract.....	4
Inhaltsverzeichnis .....	5
1. Ziel der Arbeit .....	7
2. Versuchsanlage.....	8
3. Resultate der Messungen .....	12
3.1 Datenerfassung und Datenauswertung.....	12
3.2 Hauptregelgrösse = Mittelwert der Speichertemperatur .....	12
Istwerterfassung .....	12
Diskussion der Auswertung.....	13
3.3 Hauptregelgrösse = Speicherladezustand .....	19
Istwerterfassung .....	19
P-Regler .....	21
PI-Regler .....	27
3.4 Folgeschaltung .....	27
4. Schlussfolgerungen .....	28
4.1 Beantwortung der Fragen aus dem ersten Kapitel.....	28
4.2 Offene Fragen .....	30
Allgemeine Situation nach der Einführung von «QM Holzheizwerke» .....	30
Situation nach Abschluss des Messprojektes «Azmoos» .....	30
4.3 Projektvorschlag 1: Messprojekt für Standard-Schaltung WE3 .....	31
Zielsetzung .....	31
Schaltung.....	31
Regelkonzept WE3.1: Hauptvariante WE3 gemäss [2] .....	32
Regelkonzepte WE3.2 und WE3.3: Weitere zulässige Varianten für WE3 gemäss [2].....	32
Regelkonzept WE3.4: Anhang 2 gemäss [2] .....	33
Regelkonzept WE3.5: Vereinfachte Folgeschaltung ohne übergeordnetes MSR-System .....	33
4.4 Projektvorschlag 2: Simulation der Standard-Schaltungen WE3 und WE4 .....	34
Zielsetzung .....	34
Regelkonzepte.....	34
Simulation des Wärmenetzes.....	35
5. Literaturverzeichnis .....	35
Anhang: Merkblatt.....	36



# 1. Ziel der Arbeit

Im Rahmen von «QM Holzheizwerke» [1] wurden 6 Standard-Schaltungen für Holzheizungsanlagen definiert [2] (Abbildung 1). Diese beschreiben zwar generell die Schnittstellen, das Regelkonzept und die Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung, die detaillierte Planung und Realisierung wird jedoch weitgehend den beteiligten Firmen überlassen. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass hier noch wichtige Fragen offen sind, die durch ein Messprojekt geklärt werden sollen:

1. Wie gut funktioniert die Umsetzung der Schnittstellen zwischen dem untergeordneten und dem übergeordneten MSR-System gemäss Standard-Schaltung in der Praxis?
2. Wie gut kann das Regelkonzept gemäss Standard-Schaltung bezüglich Planungsaufwand, Kosten, Betriebssicherheit und Energieeffizienz in der Praxis realisiert werden?
3. Wie gut können die Forderungen für die Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung bezüglich Planungsaufwand und Kosten in der Praxis realisiert werden?
4. Wie können die Schnittstellendefinitionen, das Regelkonzept und die Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung verbessert werden? (Auch andere oder alternative Regelkonzepte.)
5. Wie kann die Qualität von Holzheizungsanlagen durch exaktere Vorgaben verbessert werden? (Exakte Vorgaben zu Reglerparametern, Sollwerten, Führungsgrössen usw.)

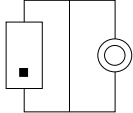
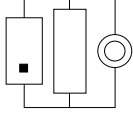
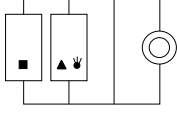
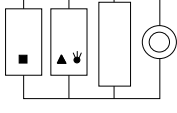
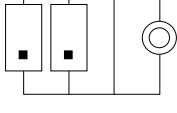
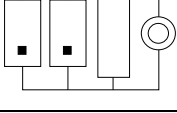
WE1	Monovalente Holzheizungsanlage ohne Speicher	
WE2	Monovalente Holzheizungsanlage mit Speicher	
WE3	Bivalente Holzheizungsanlage ohne Speicher	
WE4	Bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher	
WE5	Monovalente Zweikessel Holzheizungsanlage ohne Speicher	
WE6	Monovalente Zweikessel Holzheizungsanlage mit Speicher	

Abbildung 1: Übersicht Standardschaltungen gemäss [2]

## 2. Versuchsanlage

Die politische Gemeinde Wartau im St. Galler Rheintal umfasst eine gesamte Landfläche von 4'178 ha. Davon befinden sich 1'220 ha im Besitz der Ortsgemeinde Wartau. Der bedeutendste Anteil davon ist der Waldbesitz mit einer Fläche von 640 ha. Somit war es naheliegend, zur Beheizung der gemeindeeigenen Immobilien Holzenergie einzusetzen.

Mit dem Bau des Betagtenheims der politischen Gemeinde im Zentrum von Azmoos, dem Erweiterungsbau der Dorfkorporation und der bestehenden Schulanlage ergab sich die Gelegenheit einen Holz-Nahwärmeverbund zu erstellen, an welchem alle grösseren Wärmebezüger des Dorfkerns angeschlossen werden konnten. Der Bau der Holzheizungsanlage wurde im Rahmen des Förderprogramms «Lothar» mit einer Finanzhilfe unterstützt. Die Anlage ist seit September 2002 in Betrieb.

Die Holzheizungsanlage «Azmoos» (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3) erfüllt alle Voraussetzungen für die vorgesehenen Untersuchungen:

- Die Hydraulik entspricht exakt der Standard-Schaltung WE4 (siehe Abbildung 4)
- Das Regelkonzept wurde aufgrund der Standard-Schaltung WE4 (siehe Abbildung 5) erstellt
- Die Messdatenaufzeichnung wurde ebenfalls aufgrund der Vorgaben der Standard-Schaltung WE4 erstellt
- Zusätzlich besteht die Möglichkeit zum Vergleich mit anderen Regelkonzepten

Die beiden Kessel haben die folgenden technischen Daten:

### Holzessel:

Fabrikat	KÖB Pyrtec KPT-500-A
Feuerung	Schnitzel-Unterschubfeuerung mit Glutbettunterhaltsbetrieb
Nennleistung	450 kW

### Gaskessel:

Fabrikat	ELCOTHERM Compact R505
Nennleistung	168 kW

Der Planer (Eggenberger, Ingenieur + Planer, Buchs), der Holzesselhersteller (Köb & Schäfer KG, Wolfurt, Österreich), der Hersteller des MSR-Systems (Schneid Ges.m.b.H., Graz-Pirka, Österreich) und der Bauherr (Ortsgemeinde Wartau) waren zu einer Mitarbeit bereit, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Der reguläre Betrieb der Holzheizungsanlage darf nicht gestört werden; insbesondere wird Wert darauf gelegt, dass während der ersten Heizsaison ein Goodwill bei den Benutzern geschaffen wird
- Die gewonnenen Erkenntnisse werden den Firmen laufend mitgeteilt und stehen diesen sofort zur Verbesserung ihrer Produkte zur Verfügung
- Die Publikation der gewonnenen Erkenntnisse geschieht grundsätzlich nur nach Vernehmlassung der beteiligten Firmen
- Keine Publikation von allfälligen Problemen und Mängeln, die nichts mit dem Forschungsauftrag zum Regelkonzept innerhalb der Zentrale zu tun haben

Zwei Regelkonzepte wurden untersucht:

■ **Hauptregelgrösse = Mittelwert der Speichertemperatur:** Bei diesem Regelkonzept handelt es sich um eine vereinfachte Variante des Regelkonzepts gemäss Standard-Schaltung WE4. Anstelle des effektiven Ladezustandes wird als Ersatzgrösse der Mittelwert der 5 Speichertemperaturfühler genommen.

■ **Hauptregelgrösse = Speicherladezustand:** Dieses Regelkonzept entspricht der Standard-Schaltung WE4, die mittels 5 Temperaturfühler 5 Ladezustände erfasst. Vergleiche dazu das Regelschema in Abbildung 5.

Anlässlich der Begleitgruppensitzung vom 20.3.03 war noch ein **drittes Regelkonzept** mit einem bidirektionalen Durchflussmesser im Speicher diskutiert worden. Dieses Konzept wurde dann allerdings nicht als derart erfolgsversprechend angesehen, dass eine spezielle messtechnische Untersuchung sich lohnt.





Abbildung 2: Montage des Holzkessels, Foto [6]



Abbildung 3: Vergraben der Fernleitung, im Hintergrund das Gebäude mit der Heizzentrale, Foto [6]

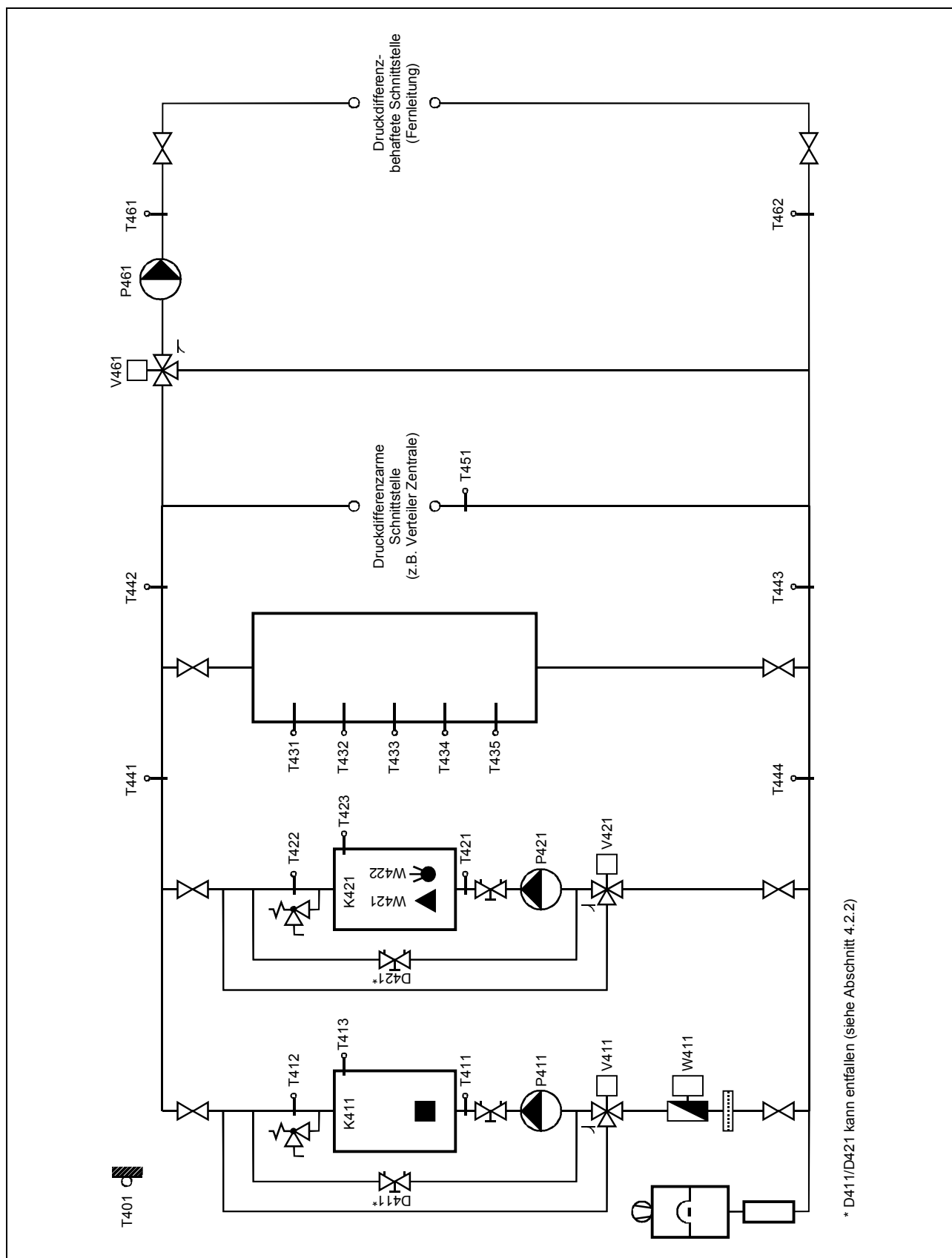


Abbildung 4: Prinzipschem WE4 gemäss [2]

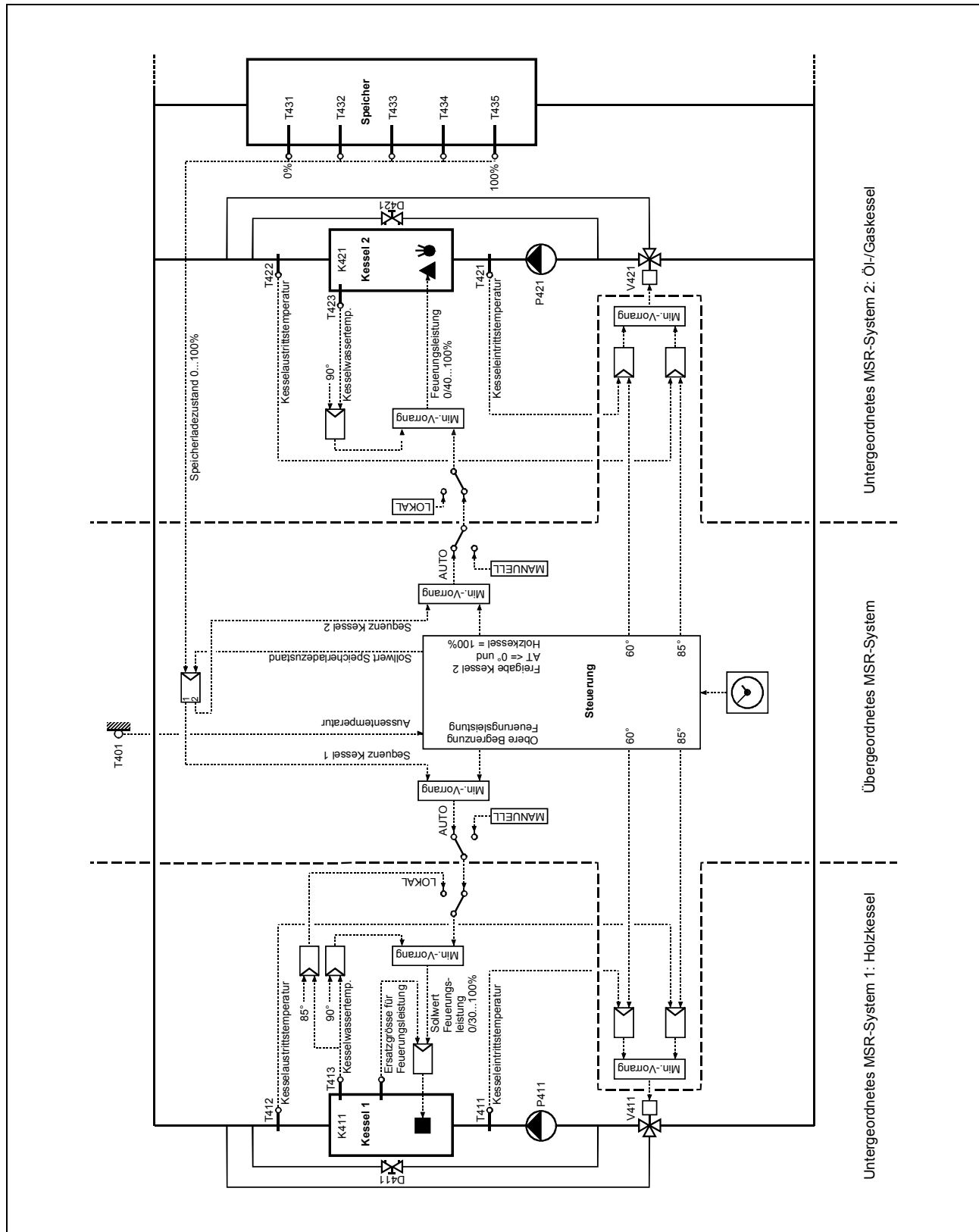


Abbildung 5: Regelschema WE4 gemäss [2]

## 3. Resultate der Messungen

### 3.1 Datenerfassung und Datenauswertung

Die zu Beginn des Projekts vorgesehene Datenerfassung per Modem konnte nicht realisiert werden. Stattdessen wurden die Daten vor Ort ausgelesen und periodisch per e-Mail übermittelt.

Zur Datenauswertung und Darstellung wurde eine Software in EXCEL erstellt, die folgende Schritte ausführt:

- Aus 7 Datenbanken insgesamt 57 Messpunkte auf Vollständigkeit überprüfen und in einem CSV-File sortiert zusammenführen (Wochenfile, Minutentakt)
- Einfügen des CSV-Files in eine Auswertemaske mit 5-Minuten-Mittelwerten bzw. 5-Minuten Summenwerten und Reduktion auf die wichtigen Grössen in Anlehnung an die Standard-Schaltungen
- Auswertung und Darstellung als Wochen-Graphiken
- Auswertung und Darstellung als Tages-Graphiken

Diese Wochen- und Tages-Graphiken können je auf 4 Seiten mit insgesamt 16 Diagrammen (mit jeweils zusammengehörenden Messgrössen) dargestellt werden. Die Darstellung als Tages-Graphik wird auch im vorliegenden Bericht verwendet (siehe beispielsweise Abbildung 9 bis Abbildung 12).

### 3.2 Hauptregelgrösse = Mittelwert der Speichertemperatur

#### Istwerterfassung

Als Ersatz für den tatsächlichen Istwert des Speicherladezustandes (siehe Abschnitt 3.3) kann die Mitteltemperatur aller Speichertemperaturfühler genommen werden. Mit 4 bzw. 9 Temperaturfühlern ist eine sehr billige hardwaremässige Mittelwertbildung mit Serie/Parallel-Schaltung möglich. Anstatt 4 bzw. 9 Analogeingängen genügt dann ein einziger Analogeingang, was natürlich oft den Einsatz einer wesentlich preisgünstigeren SPS erlaubt.

Im vorliegenden Fall «Azmoos» wurden alle 5 Temperaturen separat erfasst und die Mittelwertbildung wurde softwaremässig gemacht.

Nachteilig ist, dass die Mitteltemperatur des Speichers den tatsächlichen Speicherladezustand je nach Schichtung, Auskühlung, Rücklauftemperatur usw. unterschiedlich wiedergibt. Dies wird am einfachsten an zwei Beispielen illustriert:

**Beispiel 1 (Tabelle 6):** Wenn die Rücklauftemperatur 55°C und die Kessel-Austrittstemperatur 85°C beträgt (Auslegung), dann ergibt sich der Istwert des Speicherladezustandes entsprechend 55 (leer) – 61 – 67 – 73 – 79 – 85 (voll), und der Regelbereich beträgt 30.

Fühler (von oben nach unten)					Mittelwert
1	2	3	4	5	
55	55	55	55	55	55
85	55	55	55	55	61
85	85	55	55	55	67
85	85	85	55	55	73
85	85	85	85	55	79
85	85	85	85	85	85
Regelbereich = 30					

Tabelle 6: Beispiel 1 (Rücklauftemperatur = 55°C)

**Beispiel 2 (Tabelle 7):** In der gleichen Anlage wie in Beispiel 1 ergibt sich beispielsweise am Morgen, wenn der Rücklauf mit 25°C zurückkommt, ein anderer Istwert des Speicherladezustandes entsprechend 25 (leer) – 37 – 49 – 61 – 73 – 85 (voll), und der Regelbereich ist mit 60 plötzlich doppelt so gross.

Fühler (von oben nach unten)					Mittelwert
1	2	3	4	5	
25	25	25	25	25	25
85	25	25	25	25	37
85	85	25	25	25	49
85	85	85	25	25	61
85	85	85	85	25	73
85	85	85	85	85	85
Regelbereich = 60					

Tabelle 7: Beispiel 2 (Rücklauftemperatur = 25°C)

## Diskussion der Auswertung

Mit den Auslegedaten von Azmoos ergeben sich die Mitteltemperaturen gemäss Tabelle 8. Als Sollwert für den Mittelwert der Speichertemperatur wurde Fühler 3 gewählt, also 78°C.

Fühler (von oben nach unten)					Mittelwert
1	2	3	4	5	
60	60	60	60	60	60
90	60	60	60	60	66
90	90	60	60	60	72
90	90	90	60	60	78
90	90	90	90	60	84
90	90	90	90	90	90
Regelbereich = 30					

Tabelle 8: Auslegung Azmoos

Abbildung 9 bis Abbildung 12 zeigt die Messdaten vom Montag, dem 29. Dezember 2003, an dem die Anlage über den Mittelwert der Speichertemperatur betrieben wurde. Der Sollwert für den Mittelwert der Speichertemperatur betrug 78°C.

■ Abbildung 9a: Die Aussentemperatur war den ganzen Tag ziemlich konstant und erreichte am Nachmittag einen Höchstwert von 5°C.

■ Abbildung 9c: Zwischen 04.00 und 06.00 Uhr ist der Speicher beruhigt und etwa zur Hälfte geladen. Ab 06.00 Uhr beginnt die morgendliche Aufheizspitze. Der Istwert weicht sehr schnell vom Sollwert ab und der Speicher wird entleert. Der Sollwert der Kesselleistung steigt darauf etwa zwischen 06.00 und 09.00 Uhr auf 100% an. Dies ist genügend schnell, so dass der Speicher nie ganz entleert wird. Zwischen 09.00 und 12.00 Uhr regelt dann die Kesselleistung wieder auf etwa 50% zurück, und der Speicher ist bis abends um 22.00 Uhr beruhigt und wieder etwa zur Hälfte geladen. Ab 22.00 Uhr beginnt dann der umgekehrte Vorgang. Durch die plötzliche Reduktion der geforderten Leistung produziert der Kessel noch eine gewisse Zeit zuviel Wärme, die aber problemlos im Speicher untergebracht werden kann, ohne dass dieser «überläuft».

■ Abbildung 10b: Die Vorlauftemperatur im Wärmenetz wird durch die Vorregelung exakt auf dem Sollwert von 78°C gehalten. Die Rücklauftemperatur schwankt, entsprechend der Last, zwischen etwa 47 und 57°C.

■ Abbildung 11a: Die einzelnen Level bedeuten:

0 – 1 – 2	Holzessel Glutstock	0 – 1 – 2
4 – 5	Holzessel Störung	AUS – EIN
6 – 7	Holzessel Betrieb	AUS – EIN
8 – 9	Gaskessel Betrieb	AUS – EIN

■ Abbildung 11b: Im Widerspruch zum Regelbeschrieb in [2] wurde hier nicht auf die Kessel-Austrittstemperatur, sondern die Kessel-Eintrittstemperatur geregelt (Sollwert 85°C). Beim relativ grossen Kessel-Durchfluss der Versuchsanlage ging dies problemlos. Die Kessel-Austrittstemperatur schwankte damit um weniger als 5 K, was die Vorregelung des Wärmenetzes natürlich problemlos ausregeln konnte.

■ Abbildung 11c: Hier sieht man schön, dass der Istwert der Kesselleistung problemlos dem Sollwert der Kesselleistung folgt. Allerdings wird die Nennleistung des Holzessels von 450 kW nicht erreicht.

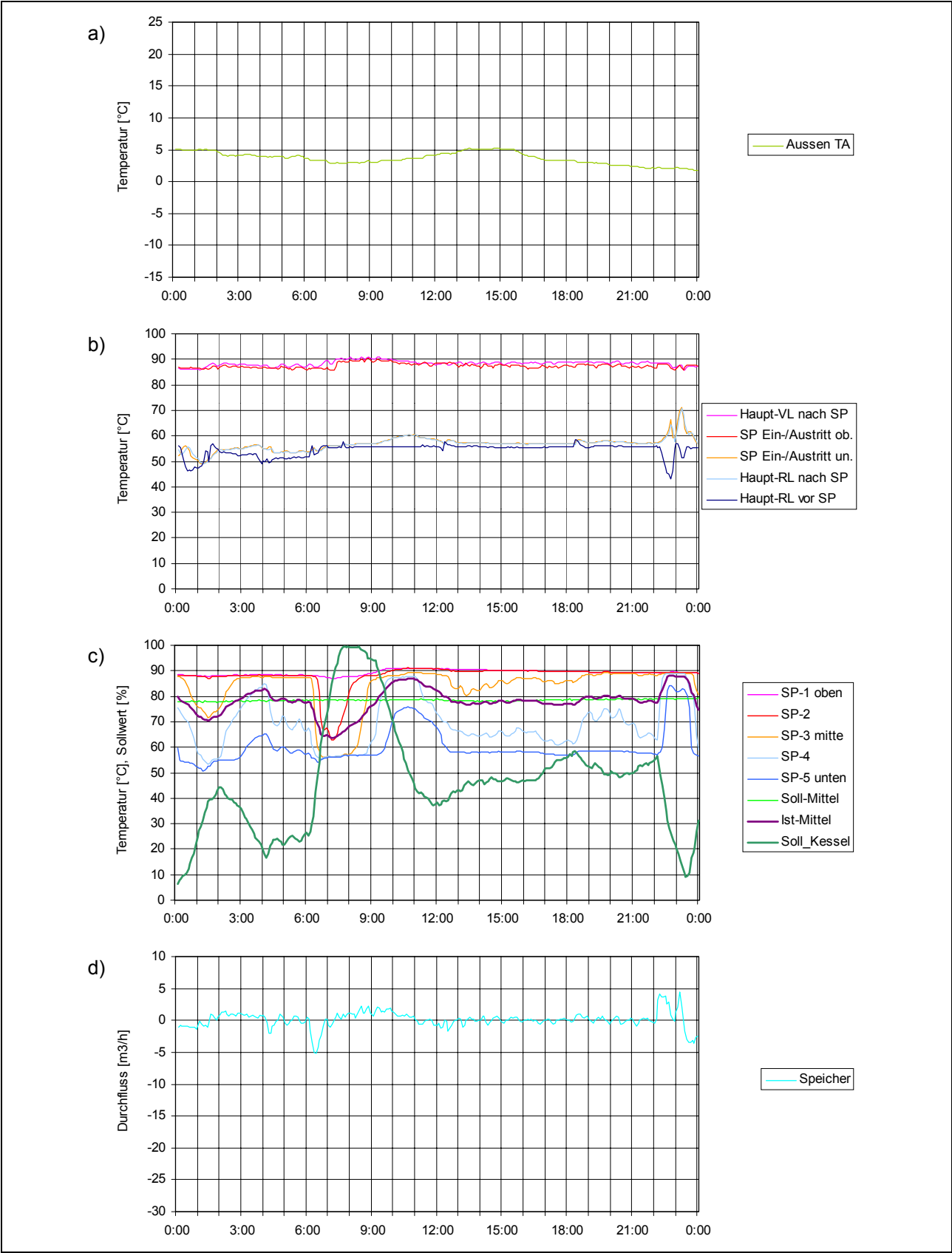


Abbildung 9: Auswertung Montag, 29.12.03, Seite 1

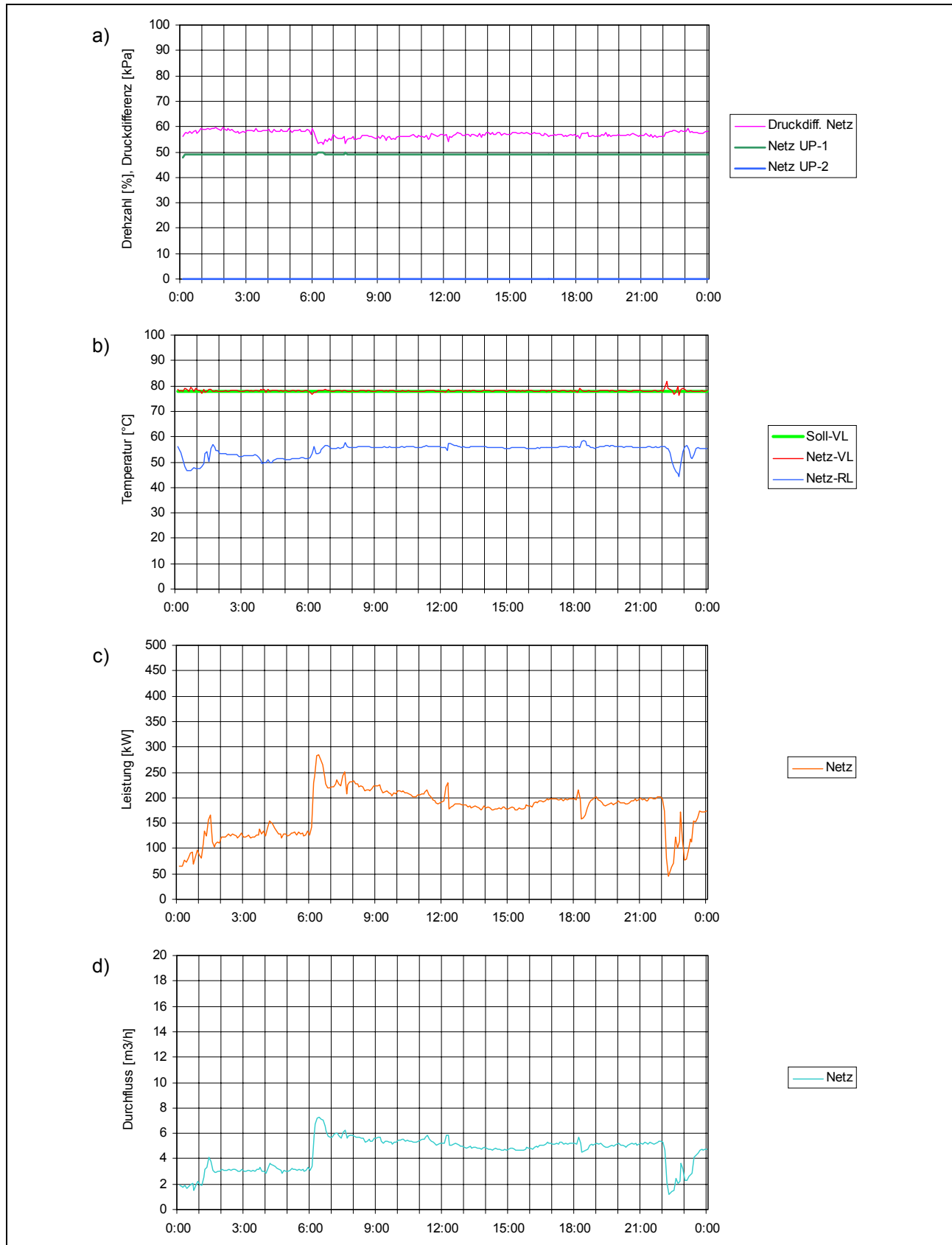


Abbildung 10: Auswertung Montag, 29.12.03, Seite 2



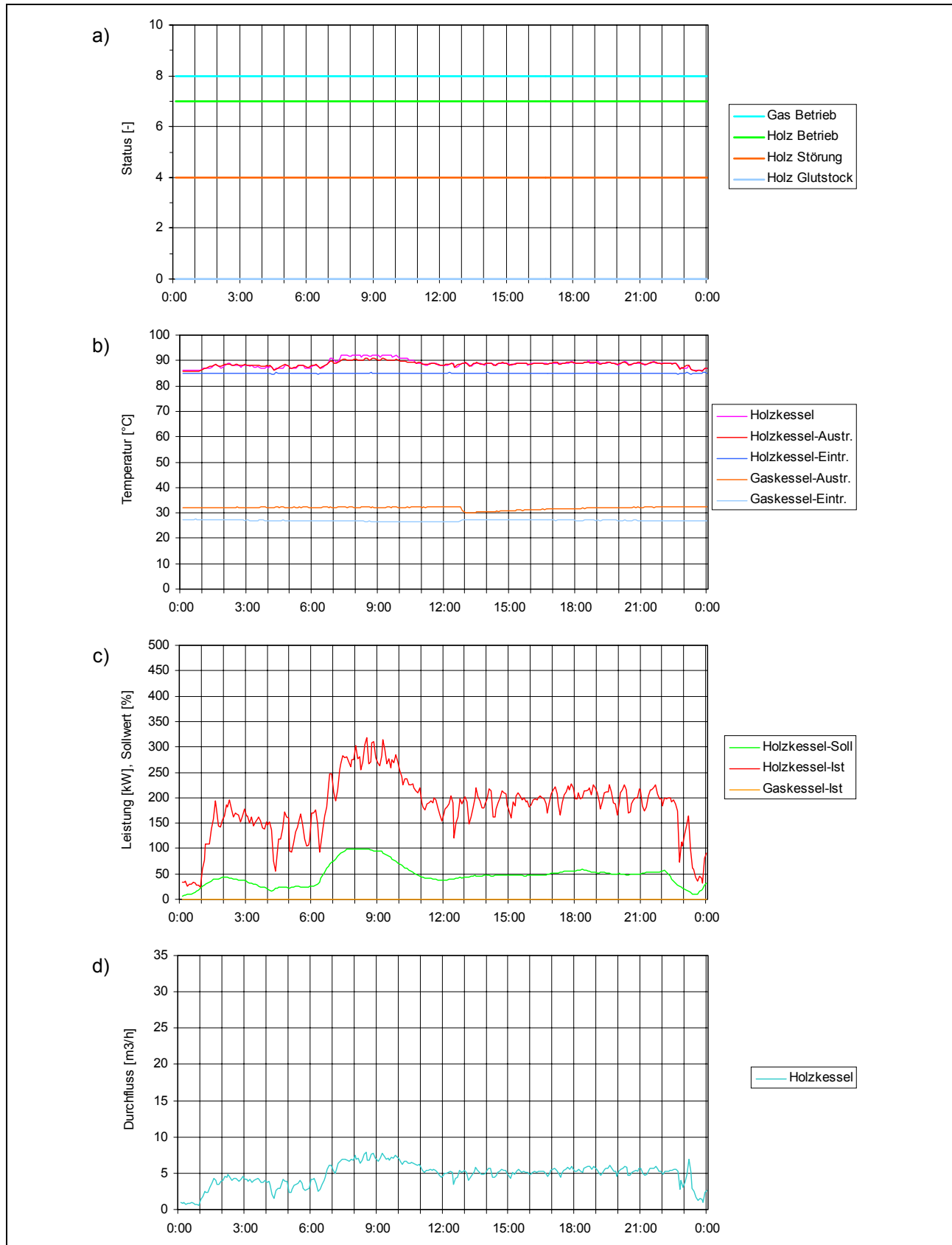


Abbildung 11: Auswertung Montag, 29.12.03, Seite 3

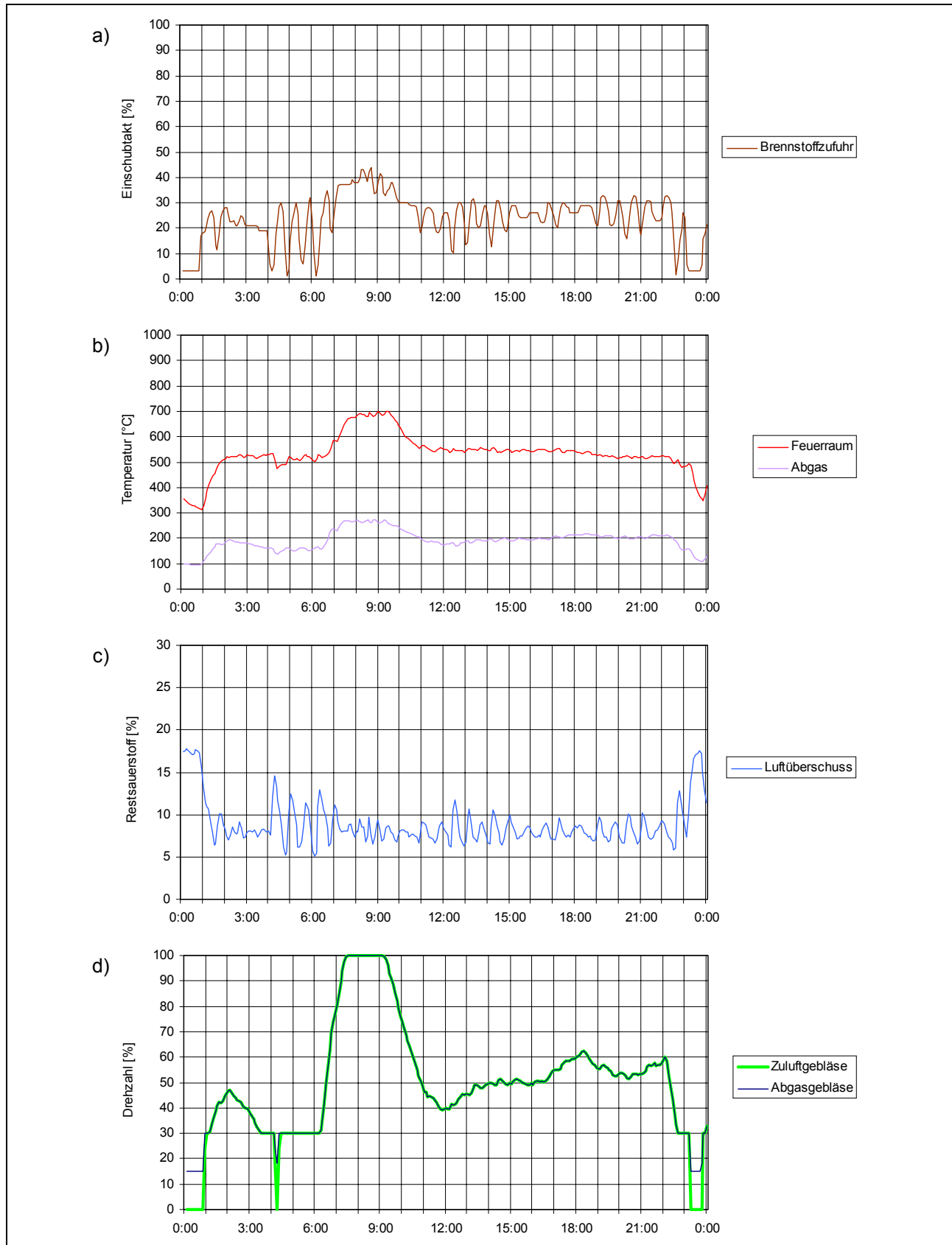


Abbildung 12: Auswertung Montag, 29.12.03, Seite 4

### 3.3 Hauptregelgrösse = Speicherladezustand

#### Istwerterfassung

Für die Standard-Schaltung WE4 wird in [2] das Regelkonzept wie folgt definiert:

*Der Ladezustand des Speichers soll über mindestens 5 Temperaturfühler erfasst werden, die gleichmässig über die Höhe des Speichers verteilt sind. Dies ergibt den Ladezustand des Speichers von 0% bis 100% (bei nur 5 Temperaturfühlern allerdings mit relativ grober Stufung von 0% – 25% – 50% – 75% – 100%). Der Ladezustand «warm»/«kalt» ist dabei bei jedem Speicherfühler wie folgt gegeben:*

- Definition:  $\text{Soll-Temperatur} = \text{Ladetemperatur-Sollwert} - \text{Sicherheitsabstand}$  z. B.  $85 - 10 = 75^\circ$
- «warm» bedeutet:  $\text{Ist-Temperatur} \geq \text{Soll-Temperatur}$  z. B.  $\geq 75^\circ$
- «kalt» bedeutet:  $\text{Ist-Temperatur} < \text{Soll-Temperatur} - \text{Hysterese}$  z. B.  $< 75 - 10 = 65^\circ$

Wenn beispielsweise Fühler 1...5 = «warm» melden, ist der Speicher vollständig gefüllt; wenn nur Fühler 1...3 = «warm» melden, ist der Speicher gut zur Hälfte gefüllt.

[...] Der Speicher [soll] durch eine stetige Regelung geladen werden. Der stetige Regler soll PI-Charakteristik haben. Infolge des I-Anteils kann damit der Speicher ohne bleibende Regelabweichung (wie es beim P-Regler der Fall wäre) auf einen vorgegebenen Wert geladen werden. Je grösser die Abweichung vom gewünschten Speicherladezustand ist, desto grösser wird die Leistungsanforderung an den Holzkessel und den Öl-/Gaskessel.

Für die Erfassung des Speicherladezustandes sind unterschiedliche Varianten möglich. Einige werden nachfolgend beschrieben. Dabei bedeutet:

w = Fühler meldet «warm» (Definition siehe oben)

k = Fühler meldet «kalt» (Definition siehe oben)

**Variante 1 (Tabelle 13):** Gemäss Beschreibung in [2] (siehe oben) mit Fühlerwertigkeit 0 – 25 – 50 – 75 – 100. «Alle Fühler kalt» ergibt zusätzlich die Wertigkeit -25, was unpraktisch ist, weil dadurch der Regelbereich 125 wird.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	-25
w	k	k	k	k	0
w	w	k	k	k	25
w	w	w	k	k	50
w	w	w	w	k	75
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 125					

Tabelle 13: Variante 1 (5 Stufen)

**Variante 2 (Tabelle 14):** Mit Fühlerwertigkeit 20 – 40 – 60 – 80 – 100. Für «Alle Fühler kalt» ergibt sich die Wertigkeit 0 und der Regelbereich ist 100. Die stufige Kennlinie kommt damit unter eine gedachte ideale stufenlose Kennlinie zu liegen.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	0
w	k	k	k	k	20
w	w	k	k	k	40
w	w	w	k	k	60
w	w	w	w	k	80
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 100					

Tabelle 14: Variante 2 (5 Stufen)

**Variante 3 (Tabelle 15):** Wenn am Anfang und am Schluss der Reihe eine halbe Stufe von 12,5 gemacht wird und dazwischen drei Stufen von 25, dann kommt die stufige Kennlinie exakt auf die Mitte einer gedachten idealen stufenlosen Kennlinie zu liegen.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	0
w	k	k	k	k	12,5
w	w	k	k	k	37,5
w	w	w	k	k	62,5
w	w	w	w	k	87,5
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 100					

Tabelle 15: Variante 3 (5 Stufen)

Alle drei Varianten ergeben ein stufiges Istwertsignal. Deshalb darf der (schnelle) P-Anteil des PI-Reglers nicht zu gross sein, und Störungen müssen hauptsächlich über den (langsamen) I-Anteil ausgeregelt werden.

**Variante 4 (Tabelle 26):** Eine mehr oder weniger stufenlose Kennlinie kann erreicht werden, wenn die Werte dazwischen über die Temperatur des jeweils aktiven Fühlers interpoliert werden. Damit ergibt sich zwar auch keine ideale Kennlinie – die programmierten Temperaturen stimmen nie exakt mit den tatsächlichen überein –, aber das mehr oder weniger stetige Istwertsignal erlaubt einen üblichen P-Anteil beim PI-Regler.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
< 60°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	0
60...80°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	0...20
> 80°C	60...80°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	20...40
> 80°C	> 80°C	60...80°C	< 60°C	< 60°C	40...60
> 80°C	> 80°C	> 80°C	60...80°C	< 60°C	60...80
> 80°C	> 80°C	> 80°C	> 80°C	60...80°C	80...100

Tabelle 16: Variante 4 (stufenlos)

Messungen zeigen, dass Überschneidungen der Fühlertemperaturen infolge «Wasserfalleffekten», ungenauen Fühlern, stark unterschiedlichen Fühlerzeitkonstanten usw. normalerweise nicht vorkommen. Bei einer guten Anlage kann deshalb davon ausgegangen werden, dass für die Fühlertemperaturen  $T_1 \dots T_5$  gilt:

$$T_1 \geq T_2 \geq T_3 \geq T_4 \geq T_5 \quad (T_1 \dots T_5 \text{ von oben nach unten})$$

Der jeweils aktive Fühler ist in Tabelle 26 grau hinterlegt. Es gilt folgende Regel:

- Fühler 1 aktiv, wenn alle anderen Fühlertemperaturen  $< 80^\circ\text{C}$
- Fühler 2 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_1 > 80^\circ\text{C}$
- Fühler 3 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_2 > 80^\circ\text{C}$
- Fühler 4 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_3 > 80^\circ\text{C}$
- Fühler 5 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_4 > 80^\circ\text{C}$

Die Güte der Interpolation (Glättung des Signals) ist von der Dicke der Mischzone im Speicher abhängig, und diese Dicke ist keine feste Grösse. Beim gleichen Speicher kann sie – je nach Durchflussgeschwindigkeit, Auskühlung usw. – sehr unterschiedlich sein. Grundsätzlich gilt:

- Dicke der Mischzone null (idealer Schichtspeicher) ergibt überhaupt kein Glättung, das Signal ist ebenso stufig wie in Variante 2 (Tabelle 14)
- Dicke der Mischzone zwischen null und einem Fühlerabstand ergibt eine immer besser werdende Glättung des Signals
- Dicke der Mischzone ganz wenig grösser als ein Fühlerabstand ergibt die beste Glättung
- Dicke der Mischzone deutlich grösser als ein Fühlerabstand ergibt wieder eine schlechtere Glättung

## P-Regler

Abbildung 17 bis Abbildung 20 zeigt die Messdaten vom Dienstag, dem 1. März 2005 an dem die Anlage mittels Istwerterfassung des Speicherladezustandes über fünf Speichertemperaturfühler betrieben wurde.

■ Abbildung 17a: Die Aussentemperatur sank in der Nacht bis auf  $-10^\circ\text{C}$  und erreichte am Nachmittag einen Höchstwert von  $-3^\circ\text{C}$ .

■ Abbildung 17c: Der Istwert des Speicherladezustandes ist nicht direkt dargestellt, er kann jedoch ungefähr aus dem Temperaturverlauf der Speicherfühler hergeleitet werden. Zusammen mit dem Sollwertsignal für die Feuerungsleistung kann man dann weitgehend das Regelverhalten eines P-Reglers erkennen:

- Weil das Istwertsignal des Speicherladezustandes sprunghaft erzeugt wird, macht auch der Sollwert für die Feuerungsleistung entsprechende Sprünge (abhängig vom eingestellten P-Band)
- Es ergibt sich eine «bleibende Regelabweichung» (85% Sollwert für die Feuerungsleistung wird im vorliegenden Fall nur bei vollständig geleertem und 5% Sollwert nur bei fast gefülltem Speicher erreicht)

Ein grosser Nachteil ist hier, dass bei einem P-Regler nur das P-Band eingestellt werden kann:

- Bei einem P-Band von  $< 100\%$  (Verstärkung  $> 1$ ) würde der Regler im vorliegenden Fall mit zu grossen Sprüngen reagieren
- Bei einem P-Band von  $> 100\%$  (Verstärkung  $< 1$ ) würde der Regler zwar mit kleineren Sprüngen reagieren, aber 100% Sollwert für die Feuerungsleistung könnte nicht erreicht werden

Das P-Band muss deshalb im vorliegenden Fall praktisch zwingend auf 100% eingestellt werden. Weil nur eine maximale Feuerungsleistung von 85% erreicht wurde, liegt die Vermutung nahe, dass das P-Band auf 120% (Verstärkung = 0,85) eingestellt war. Nur mit einem PI-Regler könnte das P-Band wesentlich grösser gestellt werden, z. B. auf 300% (Verstärkung = 0,33), so dass die Sprünge auf 1/3 verkleinert würden. 100% Sollwert für die Feuerungsleistung kann dann natürlich nur mit dem I-Anteil (Nachstellzeit) erreicht werden.

■ Abbildung 18b: Die Vorlauftemperatur im Wärmenetz wird durch die Vorregelung exakt auf dem Sollwert von  $82^\circ\text{C}$  gehalten. Die Rücklauftemperatur schwankt, entsprechend der Last, zwischen etwa 50 und  $60^\circ\text{C}$ .

■ Abbildung 19a: Die einzelnen Level bedeuten:

0 – 1 – 2	Holzessel Glutstock	0 – 1 – 2
4 – 5	Holzessel Störung	AUS – EIN
6 – 7	Holzessel Betrieb	AUS – EIN
8 – 9	Gaskessel Betrieb	AUS – EIN

Die kurze Störung des Holzessels, wahrscheinlich verursacht durch den Begrenzungsregler der Kesselwassertemperatur, ist für die vorliegende Betrachtung bedeutungslos.

- Abbildung 19b: Gemäss Regelbeschrieb in [2] wurde auf die Kessel-Austrittstemperatur geregelt (Sollwert 95°C). Die Regelung ist zeitweise nicht ganz stabil (04.00, 07.30 und 23.00 Uhr).
- Abbildung 19c: Hier sieht man schön, dass der Istwert der Kesselleistung problemlos dem Sollwert der Kesselleistung folgt. Allerdings wird die Nennleistung des Holzkessels von 450 kW nicht erreicht. Die starken Ausschläge der Wärmezählers um 04.00, 07.30 und 23.00 Uhr sind auf die zeitweise nicht ganz stabile Austrittstemperaturregelung zurückzuführen (siehe oben).

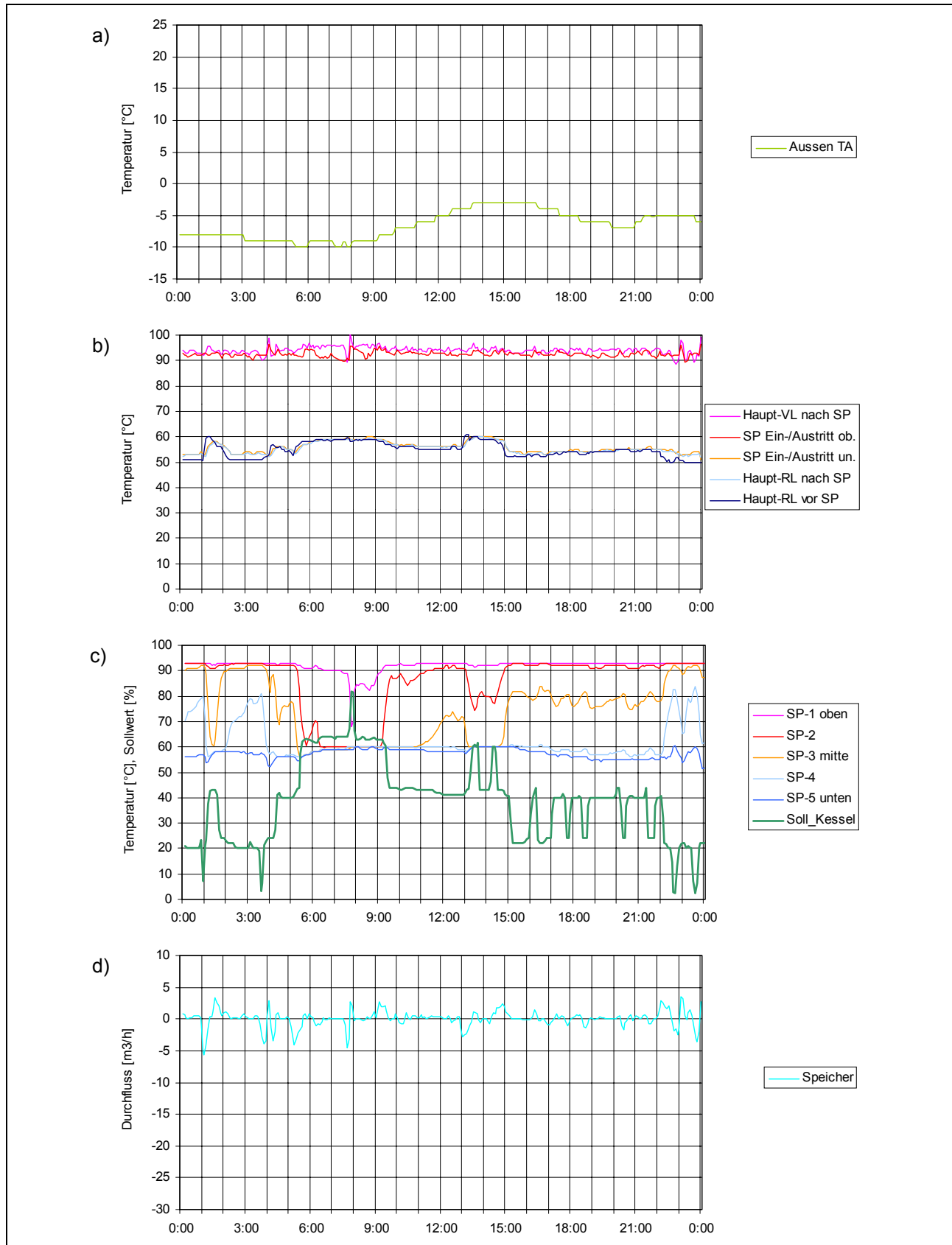


Abbildung 17: Auswertung Dienstag, 1.3.05, Seite 1

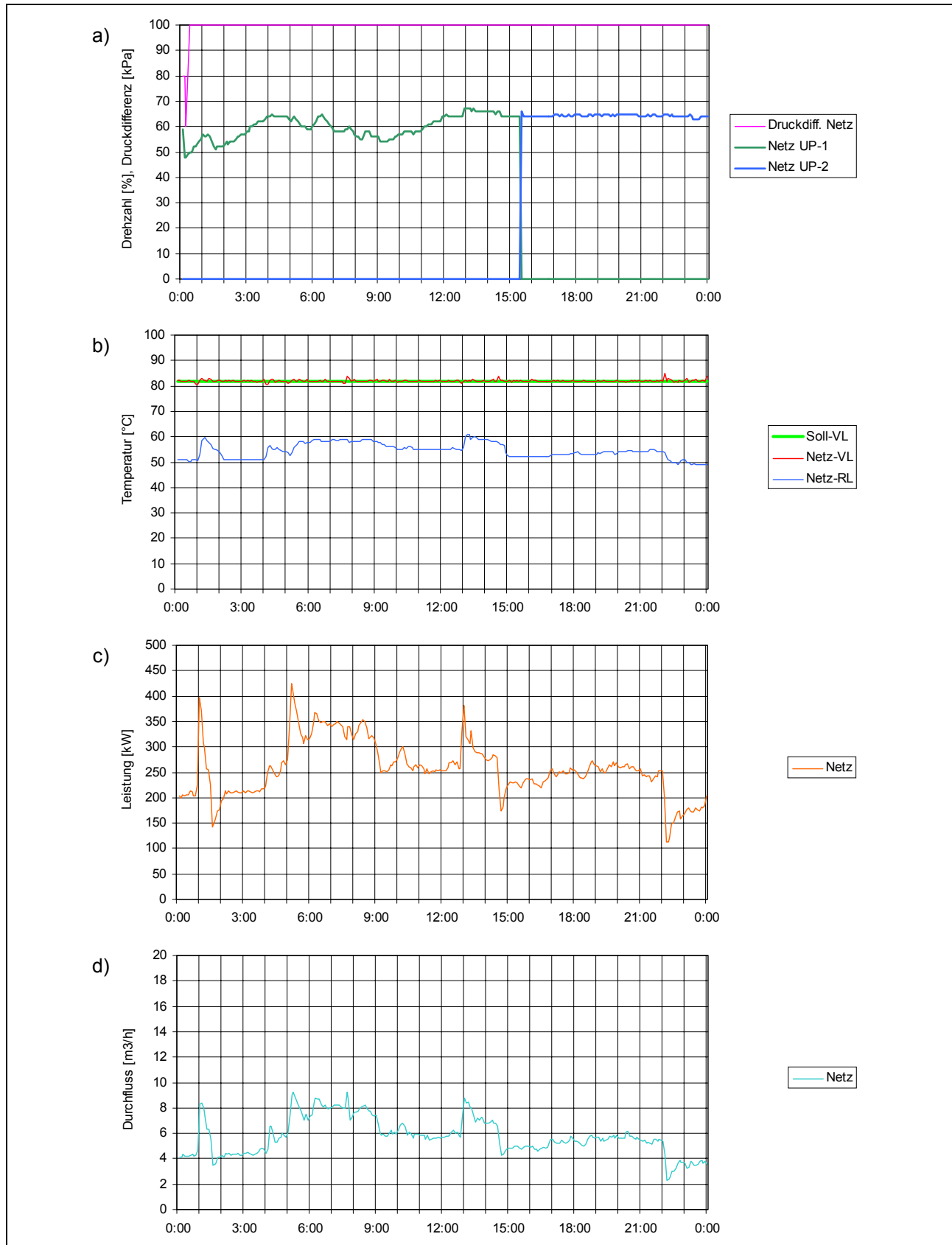


Abbildung 18: Auswertung Dienstag, 1.3.05, Seite 2



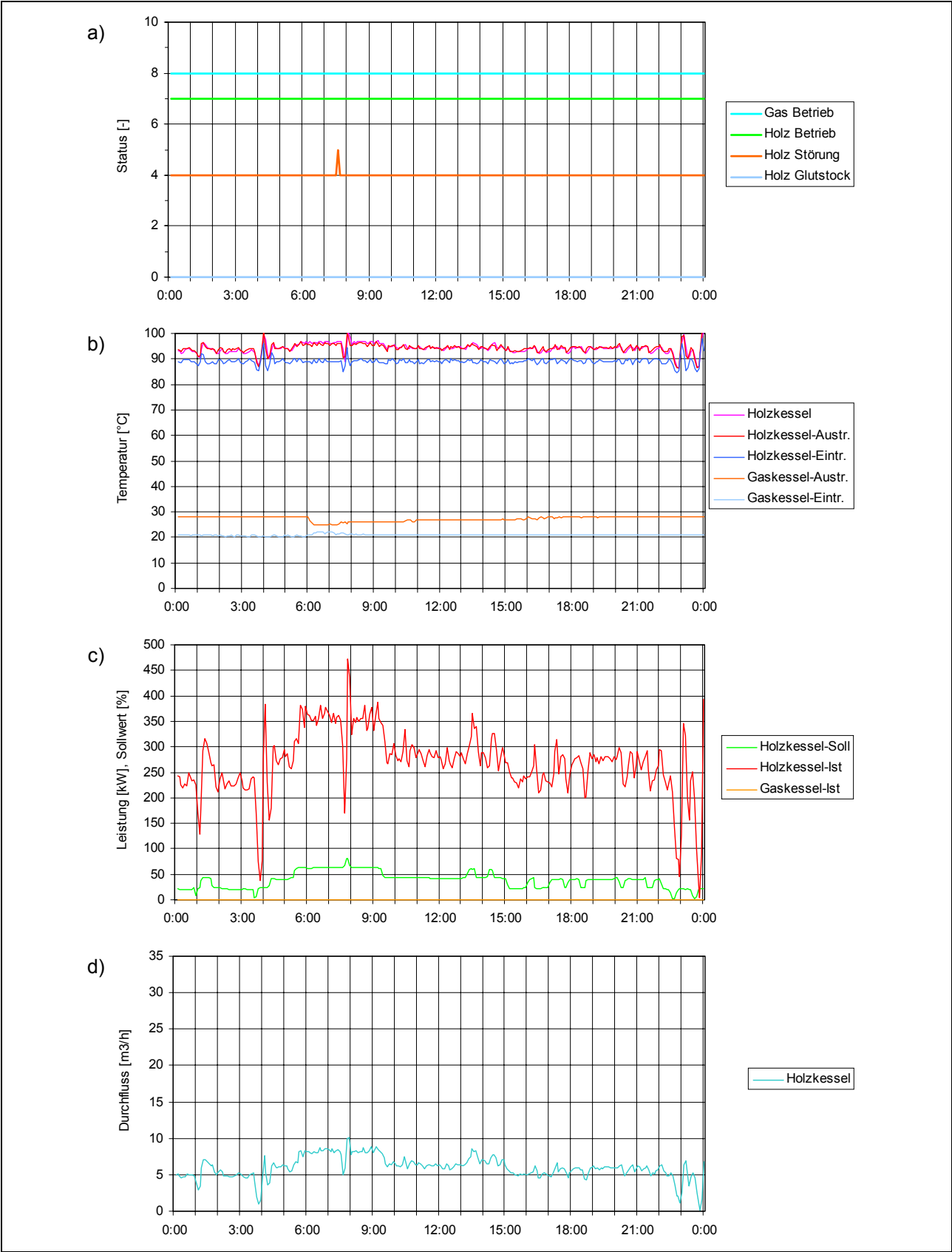


Abbildung 19: Auswertung Dienstag, 1.3.05, Seite 3

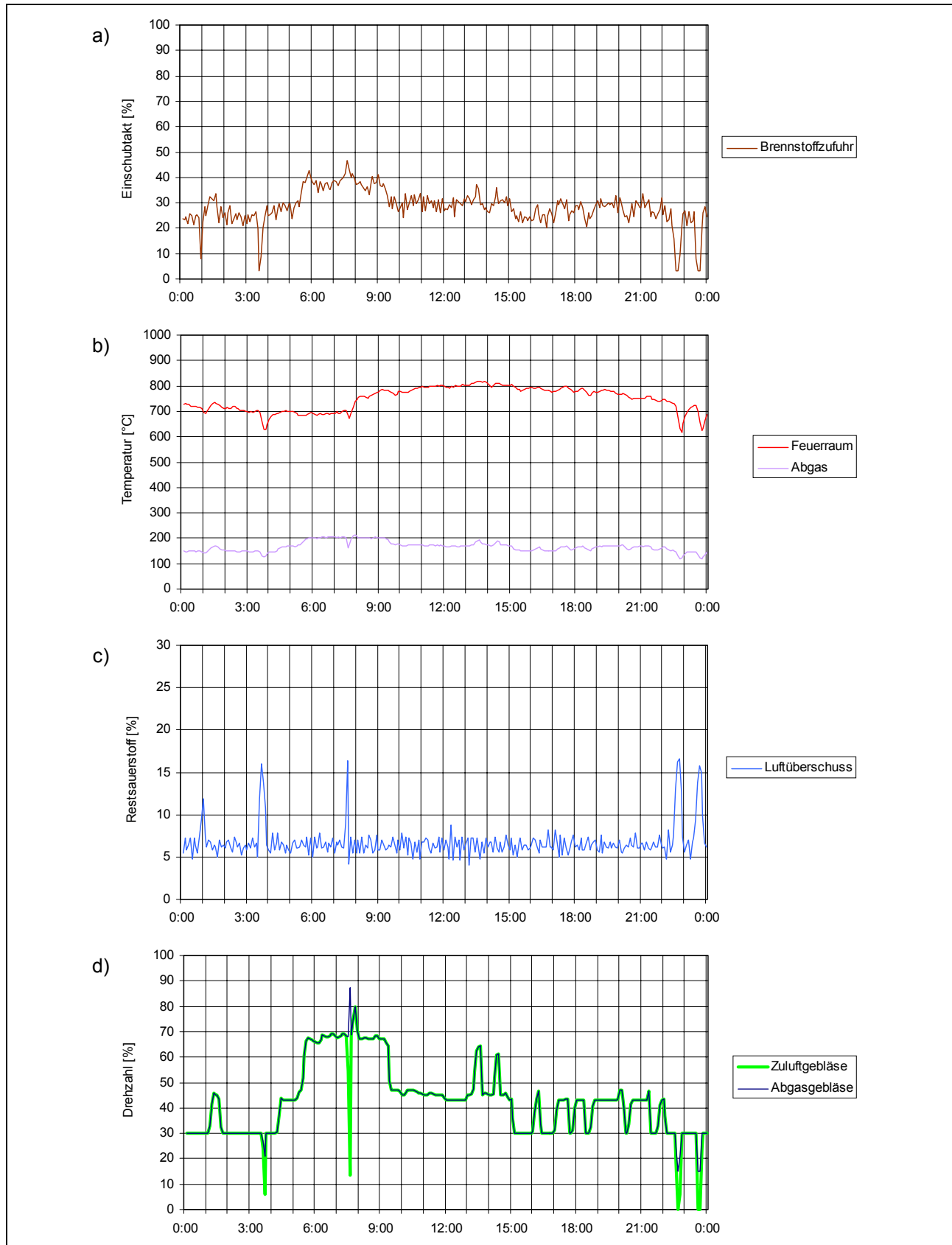


Abbildung 20: Auswertung Dienstag, 1.3.05, Seite 4

## PI-Regler

Die Diskussion des Betriebes mit P-Regler ergab, dass es ein grosser Nachteil ist, dass bei einem P-Regler nur das P-Band eingestellt werden kann:

- Bei einem P-Band von  $< 100\%$  (Verstärkung  $> 1$ ) reagiert der Regler mit zu grossen Sprüngen
- Bei einem P-Band von  $> 100\%$  (Verstärkung  $< 1$ ) reagiert der Regler zwar mit kleineren Sprüngen, aber 100% Sollwert für die Feuerungsleistung kann dann nicht erreicht werden

Nur mit einem PI-Regler kann das P-Band wesentlich grösser gestellt werden, z. B. auf 300% (Verstärkung = 0,33), so dass die Sprünge auf 1/3 verkleinert werden. 100% Sollwert für die Feuerungsleistung kann dann über den I-Anteil des PI-Reglers (Nachstellzeit) erreicht werden.

Aufgrund der Auswertung wurde vorgeschlagen, die Wertigkeit der Fühler gemäss Tabelle 21 zu wählen, und es wurde empfohlen, den PI-Regler in einem ersten Test mit folgenden Einstellungen zu betreiben:

- Sollwert Speicherladezustand = 60%
- Regelcharakteristik = PI
- P-Band = 300% (= Verstärkung 0,33)
- Nachstellzeit = 15 Minuten

Fühler					Wertig- keit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	0
w	k	k	k	k	20
w	w	k	k	k	40
w	w	w	k	k	60
w	w	w	w	k	80
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 100					

Tabelle 21: Wertigkeit der Fühler

Die exakte Programmierung der Regelstrategie WE4 als PI-Regler konnte leider nicht realisiert werden. Die Argumentation gegen den PI-Regler war sowohl beim Lieferanten des MSR-Systems wie auch beim Holzkesselhersteller, dass die Anlage mit den beiden anderen getesteten Regelkonzepten ja bestens arbeite. Ein tiefgreifendes Verständnis für die Untersuchung und die dafür notwendige Motivation konnte bei den betroffenen Firmen leider trotz Verlängerung des Projektes nicht erreicht werden.

## 3.4 Folgeschaltung

Wie beispielsweise aus Abbildung 17a (Aussentemperatur) und Abbildung 19c (Holzkessel-Leistung) ersichtlich ist, genügte selbst bei sehr tiefen Aussentemperaturen der Holzkessel allein. Der Gaskessel wurde nur im Sommerbetrieb (anstelle des Holzkessels) und im Notbetrieb (Holzkessel auf Störung) gebraucht. Somit konnte die Folgeschaltung nicht untersucht werden.

Versuche die Holzkesselleistung zu begrenzen und so die Folgeschaltung zu zwingen, den Gaskessel zuzuschalten führten leider zu keinen realitätsnahen Ergebnissen.

## 4. Schlussfolgerungen

### 4.1 Beantwortung der Fragen aus dem ersten Kapitel

Im ersten Kapitel «Ziel der Arbeit» wurden Fragen formuliert, die durch das vorliegende Messprojekt geklärt werden sollten. Im Folgenden wird versucht, diese Fragen zusammenfassend zu beantworten.

#### *1. Wie gut funktioniert die Umsetzung der Schnittstellen zwischen dem untergeordneten und dem übergeordneten MSR-System gemäss Standard-Schaltung in der Praxis?*

Von der Homepage [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch) kann die «Empfehlung Standard-Schnittstellen» [7] heruntergeladen werden. Darin sind Standard-Schnittstellen zwischen dem übergeordneten MSR-System und den untergeordneten MSR-Systemen der Kessel in Holzheizwerken definiert.

Wie oft heute Schnittstellen exakt gemäss Empfehlung realisiert werden, ist nicht bekannt. Rückfragen von Herstellern bei den Autoren zeigen jedoch, dass die Empfehlung beachtet wird und dass sich keine nennenswerten Probleme ergeben. Einziger Diskussionspunkt ist hier, dass einige wenige Kesselhersteller kein externes Sollwertsignal für die Feuerungsleistung (vom übergeordneten Regelsystem kommend) verarbeiten können und damit auch die Schnittstellen nicht anbieten können.

Von der genannten Homepage kann auch die «Herstellerliste» [8] heruntergeladen werden. Dies ist eine Liste der Holzkessel- und Regelgerätehersteller, die nach eigenen Angaben die Standard-Schnittstellen anbieten können und somit auch in der Lage sind, ein externes Sollwertsignal für die Feuerungsleistung zu verarbeiten. Fast alle führenden Holzkesselhersteller sind heute auf der Liste aufgeführt.

Die Versuchsanlage «Azmoos» wurde bereits vor der Veröffentlichung der Standard-Schnittstellen geplant und ausgeführt. Die Umsetzung der Schnittstellen war aber trotzdem problemlos, weil der Holzkesselhersteller (Köb & Schäfer KG, Wolfurt, Österreich) und der Hersteller des MSR-Systems (Schneid Ges.m.b.H., Graz-Pirka, Österreich) schon zuvor andere Anlagen mit ähnlichen Schnittstellen zusammen gebaut hatten.

#### *2. Wie gut kann das Regelkonzept gemäss Standard-Schaltung bezüglich Planungsaufwand, Kosten, Betriebssicherheit und Energieeffizienz in der Praxis realisiert werden?*

Die Versuchsanlage «Azmoos» wurde zunächst nicht mit der Regelstrategie gemäss Standard-Schaltung WE4 betrieben, sondern statt des effektiven Speicherladezustandes wurde als Ersatzgrösse der Mittelwert der Speichertemperatur verwendet (siehe Abschnitt 3.2). Dieses Regelkonzept arbeitete zufriedenstellend. Insbesondere das ziemlich gut geglättete Istwertsignal (keine Sprünge) war praktisch bei der Reglereinstellung, weil damit mit üblichen Regelparametern gearbeitet werden konnte. (Hier sollte noch darauf hingewiesen werden, dass bei dieser Regelstrategie noch auf die Kesseleintrittstemperatur anstatt auf die Kesselaustrittstemperatur geregelt wurde; dies störte allerdings kaum, da die Temperaturdifferenz über dem Kessel sehr klein war.)

Die exakte Programmierung der Regelstrategie WE4 gemäss [2] konnte leider nur als P-Regler, aber nicht als PI-Regler realisiert werden. Die Argumentation gegen den PI-Regler war sowohl beim Lieferanten des MSR-Systems wie auch beim Holzkesselhersteller, dass die Anlage mit den beiden anderen getesteten Regelkonzepten ja bestens arbeite. Ein tiefergreifendes Verständnis für die Untersuchung und die dafür notwendige Motivation konnte bei den betroffenen Firmen leider trotz Verlängerung des Projektes nicht erreicht werden.

Da die Anwendung der Regelstrategie WE4 gemäss [2] in zahlreichen anderen Anlagen längst Realität ist, wurden die in diesen Anlagen gemachten Erfahrungen zusammen mit den im vorliegenden Projekt gemachten Erfahrungen in einem Merkblatt zusammengefasst (siehe Anhang). Dieses Merkblatt ist bereits von der Website [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch) herunterladbar. Neu wurde auf der Website auch eine Liste häufig gestellter Fragen FAQ's eingerichtet. Diese Massnahmen sollten in Zukunft helfen, den beteiligten Firmen von Anfang an das Regelkonzept und insbesondere die Istwerterfassung klar zu machen.

Allgemein darf heute sicher gesagt werden: Wenn das Prinzip des Regelkonzepts einmal begriffen, eine erste Anlage programmiert, in Betrieb gesetzt und optimiert ist, dann ist der Planungsaufwand für weitere Anlagen gering (sowohl auf der Planer- wie auf der Regelgeräteherstellerseite), und die Betriebssicherheit und Energieeffizienz wird entsprechend gut sein.

### 3. *Wie gut können die Forderungen für die Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung bezüglich Planungsaufwand und Kosten in der Praxis realisiert werden?*

Während die Forderung nach einer automatischen Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung zu Beginn der «Lothar»-Finanzhilfe noch oft weitgehend auf Unverständnis stiess, hat sich dies heute wesentlich geändert. Praktisch jeder Regelgerätehersteller bietet heute Lösungen mit automatischer Datenaufzeichnung an. Billiglösungen sind hier natürlich nicht zu haben. Die Meinung, dass eine Betriebsoptimierung – und damit die Mehrkosten für eine automatische Messdatenaufzeichnung – unabdingbar notwendig ist, hat sich heute weitgehend durchgesetzt.

Während heute die Messdatenaufzeichnung zu akzeptablen Mehrkosten eigentlich kein Problem mehr sein sollte, sieht es bei den Hilfsprogrammen zur Darstellung und Interpretation der Messdaten noch gar nicht gut aus. Hauptsächliche Problempunkte sind hier:

- Unübersichtlichkeit: oft viel zu viele Kurven mit unterschiedlichen Massstäben in einem Diagramm
- Unpraktische Beschriftung: richtig wäre z. B. 20-30-40-50...°C oder 0-6-12-18-24 Uhr
- Keine logischen Gruppen: richtig wären zusammengehörende Messwerte in einem Diagramm
- Keine Regression der Messwerte möglich: z. B. Vorlauftemperatur in Funktion der Aussentemperatur (Heizkurve), Leistung in Funktion der Aussentemperatur (Lastkennlinie)
- Keine Summenhäufigkeit: z. B. Summenhäufigkeit der Leistung in Funktion der Anzahl Heiztage (Jahresdauerlinie)
- Keine automatische Berechnung und Darstellung wichtiger Kennzahlen: z. B. Tages-Nutzungsgrade (Hinweis: Die Methode zur Tages-Nutzungsgrad-Berechnung sollte noch vertieft untersucht werden)

Auf jeden Fall sollte gefordert werden, dass die Messdaten als CSV-File abgelegt und periodisch ausgelesen werden können. Die Erfahrung zeigt nämlich, dass durch das Auslesen der Daten als CSV-File und die Auswertung in EXCEL ein erfahrener Planer die obgenannten Problempunkte umgehen kann.

### 4. *Wie können die Schnittstellendefinitionen, das Regelkonzept und die Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung verbessert werden? (Auch andere oder alternative Regelkonzepte.)*

**Schnittstellendefinitionen:** Da sich bislang keine Widersprüche zu den im Internet publizierten Schnittstellendefinitionen ergeben haben (Download von [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch)), ergeben sich auch keine Verbesserungsvorschläge.

**Messdatenerfassung:** Die wichtigsten Problempunkte wurden in Frage 3 dargelegt. Der vorliegende Untersuchungsbericht wurde via CSV-Files in EXCEL ausgewertet und kann somit als Beispiel für eine gute Datenauswertung angesehen werden.

**Regelkonzept:** Die Probleme mit der Umsetzung des Regelkonzepts wurden in Frage 2 beschrieben. Als Sofortmassnahme wurde, wie gesagt, ein Merkblatt mit Varianten zur Erfassung des Speicherladezustandes ins Internet gestellt (Download von [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch)).

**Alternative Regelkonzepte:** In Abschnitt 3.2 wurde das alternative Regelkonzept mit dem Mittelwert der Speichertemperatur als Hauptregelgrösse messtechnisch untersucht. Die Resultate waren in der vorliegenden Versuchsanlage «Azmoos» gut. Der grosse Vorteil dieses Regelkonzepts ist es, dass mit einer hardwaremässigen Mittelwertbildung gearbeitet werden kann, die nur einen einzigen Analogeingang benötigt. Dieses Regelkonzept sollte deshalb vor allem geprüft werden, wenn zuwenig Analogeingänge zur Verfügung stehen. Bedingung für eine Mittelwertbildung, die den Speicherladezustand genügend gut wiedergibt, ist eine gute Schichtung und eine möglichst geringe Schwankung der Rücklauftemperatur. Ausserdem ist es wichtig, dass die Kesselaustrittstemperatur geregelt wird.

5. *Wie kann die Qualität von Holzheizungsanlagen durch exaktere Vorgaben verbessert werden? (Exakte Vorgaben zu Reglerparametern, Sollwerten, Führungsgrößen usw.)*

Die vorliegende Untersuchung basiert auf Messdaten einer einzigen Anlage. Allgemeingültige exakte Vorgaben sind nicht möglich, da andere Anlagen unterschiedlich sein können. Als Anhaltswerte für eine erste Einstellung können jedoch folgende Werte angenommen werden:

- Sollwert Speicherladezustand = 50%
- Regelcharakteristik = PI
- P-Band = 300% (= Verstärkung 0,33)
- Nachstellzeit = 10...20 Minuten

## 4.2 Offene Fragen

### Allgemeine Situation nach der Einführung von «QM Holzheizwerke»

Im Rahmen der «Lothar»-Finanzhilfe wurde im Jahre 2000 eine erste Generation von Standard-Schaltungen – die sogenannten «Standardlösungen» – eingeführt. Dabei zeigte sich, dass viele Planer die Schaltungen regelungstechnisch nur unbefriedigend umsetzen konnten. Auch die Anforderungen an die Datenaufzeichnung zur Betriebsoptimierung stiessen oft auf Unverständnis – wozu eine Betriebsoptimierung gut sein soll, war für viele Planer nicht einsehbar. Unklar ist dabei, ob die betroffenen Planer tatsächlich den hohen Anforderungen nicht gewachsen waren, oder ob sie einfach den Aufwand für eine gründliche Betrachtung gescheut hatten.

Regelgeräte- und Kesselhersteller begrüßten deshalb die Einführung der erweiterten «Standard-Schaltungen» [2] im Rahmen des Qualitätsmanagementsystems «QM Holzheizwerke» (siehe hauptsächlich [1]), das 2004 in der Schweiz, Baden-Württemberg, Bayern und Österreich eingeführt wurde.

Leider ist die Verbreitung der Standard-Schaltungen heute (anfangs 2005) noch zu gering, als dass sich die Kosten für das Regelsystem wesentlich reduziert hätten. Eine merkliche Kostenreduktion wird sich erst mit einer besseren Verbreitung der Standard-Schaltungen ergeben. Zusätzliche Umsetzungsschwierigkeiten ergaben sich auch aus dem Umstand, dass einige wenige Kesselhersteller kein externes Sollwertsignal für die Feuerungsleistung (vom übergeordneten Regelsystem kommend) verarbeiten können. Damit die Zielsetzung der Standard-Schaltungen erfüllt werden kann, ist deshalb noch eine längere Einführungszeit notwendig. Die Verbreitung und das Verständnis der Standard-Schaltungen muss sowohl bei den Planern wie auch bei den Regelgeräte- und Kesselherstellern weiter gefördert werden.

### Situation nach Abschluss des Messprojektes «Azmoos»

Nach Abschluss des Messprojektes Azmoos muss leider gesagt werden, dass einige Fragen nur unvollständig geklärt werden konnten. Die wichtigsten verbleibenden Problempunkte sind:

- Die Programmierung der Regelstrategie WE4 gemäss [2] konnte nur als P-Regler, aber nicht als PI-Regler realisiert werden.
- Die Folgeschaltung konnte nicht realitätsnah untersucht werden, weil selbst bei sehr tiefen Aussentemperaturen der Holzkessel allein genügte. Der Gaskessel wurde nur im Sommerbetrieb (anstelle des Holzkessels) und im Notbetrieb (Holzkessel auf Störung) gebraucht.

Generell gilt:

- Mängel werden üblicherweise nur beanstandet, wenn die Vorlauftemperatur im Wärmenetz zusammenbricht. Dies war in der Versuchsanlage «Azmoos» kaum je der Fall: Auch bei «missglückten» Tests von Regelstrategien brach die Vorlauftemperatur dank der Vorregulierung nicht ein, was für die grosse Fehlertoleranz der Standard-Schaltung spricht.

- Untersuchungen an realen Versuchsanlagen sind aufwendig. Verschiedene Varianten und unterschiedliche Reglerparameter, Sollwerte usw. können nur mit grossen Zeitaufwand untersucht werden. Mit Hilfe von Simulationen könnten reale Messungen sinnvoll ergänzt werden.

**Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass noch zahlreiche Fragen offen sind. Deshalb werden im Folgenden zwei Projektvorschläge als sinnvolle Ergänzung zum vorliegenden Projekt formuliert – ein Messprojekt für die Standard-Schaltung WE3 und ein Projekt zur Simulation der Standard-Schaltungen WE3 und WE4.**

### 4.3 Projektvorschlag 1: Messprojekt für Standard-Schaltung WE3

## Zielsetzung

Nachdem in Azmoos eine Anlage mit Speicher untersucht worden ist, soll in einem weiteren Messprojekt eine Anlage ohne Speicher untersucht werden. Dabei sollen alle Varianten von Regelkonzepten untersucht werden, die in den Standard-Schaltungen [2] beschrieben sind, sowie eine vereinfachte Folgeschaltung ohne übergeordnetes MSR-System, welche oft durch die Holzkesselhersteller angewendet wird.

## Schaltung

Hydraulisch entspricht die Standard-Schaltung ohne Speicher WE3 (Abbildung 4) exakt der Standard-Schaltung mit Speicher WE4 (Abbildung 22). Einziger Unterschied: der Speicher ist bei WE3 nur als Bypass mit Wasserinhalt gegen null vorhanden. Damit ist WE3 regelungstechnisch wesentlich anspruchsvoller als WE4.

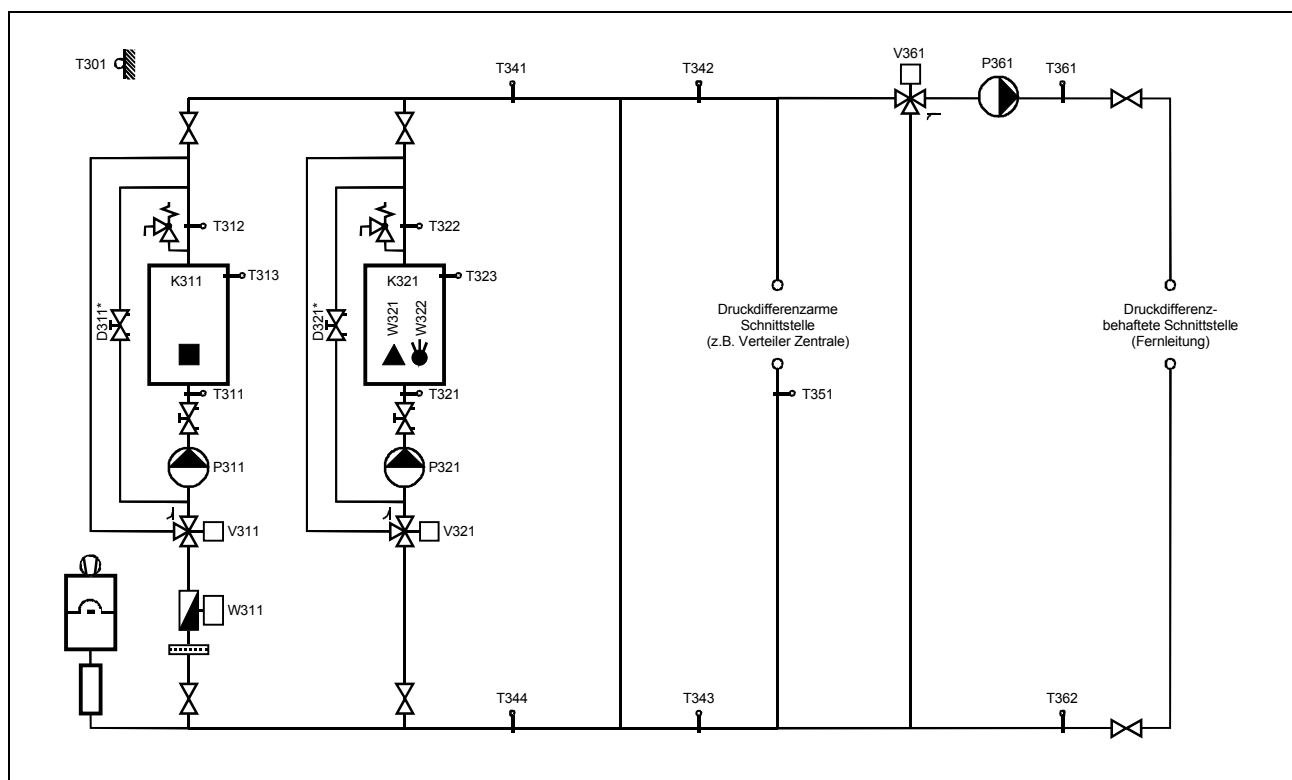


Abbildung 22: Bivalente Holzheizungsanlage ohne Speicher WE3

Hauptregelgrösse kann bei WE3 nur die Hauptvorlauftemperatur sein. Diese kann jedoch an zwei Messorten erfasst werden: vor dem Bypass bei T341 oder nach dem Bypass bei T342.

Solange der Bypass von oben nach unten durchflossen wird, liefern beide Messorte den gleichen Messwert. Sobald jedoch der Durchfluss auf der Kesselseite kleiner wird als derjenige auf der Verbraucherseite, wird der Bypass von unten nach oben durchflossen und T342 ist dann tiefer als T341. Dieser Betrieb entspricht im Prinzip dem Betrieb eines Speichers mit Wasserinhalt gegen null. Damit sind unterschiedliche Regelkonzepte möglich, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

### Regelkonzept WE3.1: Hauptvariante WE3 gemäss [2]

Die Hauptvariante WE3 sieht wie folgt aus:

- Hauptregelgrösse ist die Hauptvorlauftemperatur, Messort vor dem Bypass bei T341
- Stellgrösse ist eine Sequenz der Sollwerte für die Feuerungsleistungen der beiden Kessel
- Verzicht auf die Regelung der Kesselaustrittstemperaturen (die Regelventile in den Kesselkreisen werden nur zur Rücklaufhochhaltung gebraucht)
- Die Kesselwassertemperaturen der beiden Kessel werden durch die internen Regler nur nach oben begrenzt

Bei Normalbetrieb stehen die Regelventile der Kessel auf Durchgang. Damit steht im Kesselkreis normalerweise der grösstmögliche Durchfluss zur Verfügung. Nur bei extremen Laständerungen greift die Rücklaufhochhaltung ein und reduziert den Durchfluss. Im Normalbetrieb wird somit der Bypass immer von oben nach unten durchflossen.

Beim Zuschalten von Kessel 2 hat dieser, sobald er die minimal zulässige Eintrittstemperatur erreicht hat, den vollen Volumenstrom bei Minimalleistung und damit eine kleinere Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt als Kessel 1 mit Vollast. Diese Abweichung bewirkt ein «Floaten» der Kesselwassertemperaturen: Die Temperatur von Kessel 1 (Vollast) ist höher und diejenige von Kessel 2 (Teillast) tiefer als die Hauptvorlauftemperatur. Dies ist bei der Auslegung zu berücksichtigen, damit die Begrenzung der Kesselwassertemperatur von Kessel 1 genügend hoch eingestellt werden kann.

Da die Regelventile in den Kesselkreisen nur zur Rücklaufhochhaltung benötigt werden, kann beim Folgekessel auf das Regelventil verzichtet werden, wenn keine Rücklaufhochhaltung erforderlich ist.

#### **Nachteil:**

«Floaten» der Kesselwassertemperaturen. d. h. beim Holzkessel muss nach oben eine Temperaturreserve bestehen (z. B. Sollwert Hauptvorlauftemperatur 85°C, Begrenzung Kesselwassertemperatur Holzkessel 95...105°C)

### Regelkonzepte WE3.2 und WE3.3: Weitere zulässige Varianten für WE3 gemäss [2]

In der Standard-Schaltung WE3 werden noch zwei weitere zulässige Varianten beschrieben, die angewendet werden können,

- wenn kein Floaten zulässig ist, weil nach oben keine Temperaturreserve besteht,
- wenn ein bestehender, überdimensionierter Kessel 2 eingebunden werden muss, dessen Steuerung/Regelung möglichst wenig verändert werden soll.

Diese zwei Varianten entsprechen grundsätzlich der zuvor beschriebenen Hauptvariante, wobei jedoch Kessel 2 anders geregelt wird:

- Variante 1: Zusätzliche Austrittstemperaturregelung beim Kessel 2 (Sollwert etwas tiefer als der Sollwert der Hauptvorlauftemperatur)
- Variante 2: Stellgrösse für Kessel 2 ist der Hub des Dreiwegeventils im Kesselkreis

Es muss angegeben werden, ob der Messort bei T341 oder bei T342 gewählt wird. Solange der Bypass im Normalbetrieb immer von oben nach unten durchflossen wird, liefert T341 den sichereren Messwert, weil hier der Fühler sicher immer gut umströmt ist. Wenn die Messung bei T342 erfolgen soll, um auch eine Zirkulation des Bypasses von unten nach oben zu berücksichtigen, muss beachtet werden, dass hier die Mes-



sung im «toten Wasser» erfolgt. In diesem Falle sollte für T342 zusammen mit T344 ein Maximalvorrang vorgesehen werden (sobald T342 keinen gültigen Wert liefert, wird auf T344 umgeschaltet).

**Nachteile:**

- Für den Folgekessel ist zwingend ein Regelventil im Kesselkreis notwendig, auch dann, wenn dieser keine Rücklaufhochhaltung benötigen würde
- Falls der Messort der Hauptregelgrösse bei T342 gewählt wird, ist eine Fühlerumschaltung T342/T344 mit Maximalvorrang notwendig

**Regelkonzept WE3.4: Anhang 2 gemäss [2]**

Das Hydraulikschema von Anhang 2 ist identisch mit demjenigen der Standard-Schaltung WE3. Im Gegensatz zu WE3 arbeitet die Schaltung aber ohne externes Sollwertsignal für die Feuerungsleistung. Stattdessen werden die Sollwerte der Kesselwassertemperaturen durch das übergeordnete MSR-System vorgegeben.

Kurze Funktionsbeschreibung:

- Hauptregelgrösse ist die Hauptvorlauftemperatur, Messort nach dem Bypass bei T342 mit Maximalvorrang bei T344 (sobald T342 keinen gültigen Wert liefert, wird auf T344 umgeschaltet)
- Stellgrössen sind die Hübe der Regelventile in den Kesselkreisen als Sequenz Holzkessel – Öl-/Gaskessel (mit Minimalbegrenzung der Kesseleintrittstemperatur zur Rücklaufhochhaltung)
- Die Kesselwassertemperaturen der beiden Kessel werden durch die internen Regler geregelt; die Sollwerte werden durch das übergeordnete MSR-System vorgegeben

Wenn die von den Kesseln produzierte Leistung mit der von den Verbrauchern geforderten Leistung übereinstimmt, ist der Durchfluss im Bypass null (der Miniaturspeicher «Bypass» wird weder gefüllt noch entleert).

Dieses Regelkonzept bedingt zwingend, dass die Hauptvorlauftemperatur nach dem Bypass bei T342 gemessen wird. Dieser Fühler befindet sich im «toten Wasser», solange keine Leistung angefordert wird. Dieses Problem kann durch eine Fühlerumschaltung mit Maximalvorrang auf einen zweiten Fühler im Rücklauf bei T344 gelöst werden.

Die Reglerparameter des Hauptreglers sind praktisch die gleichen wie bei WE3. Zusätzlich ist das I-Glied in der Regelstrecke, bedingt durch die Laufzeit des Regelventils (im Vergleich zu den übrigen Zeitkonstanten jedoch relativ klein).

**Nachteile:**

- Für den Folgekessel ist zwingend ein Regelventil im Kesselkreis notwendig, auch dann, wenn dieser keine Rücklaufhochhaltung benötigen würde
- Fühlerumschaltung T342/T344 mit Maximalvorrang zwingend notwendig

**Regelkonzept WE3.5: Vereinfachte Folgeschaltung ohne übergeordnetes MSR-System**

Diese Lösung wird oft als kostengünstige Variante eingesetzt, da kein übergeordnetes MSR-System erforderlich ist.

Das Hydraulikschema ist identisch mit demjenigen der Standard-Schaltung WE3. Im Gegensatz zu WE3 arbeitet die Schaltung jedoch ohne ein übergeordnetes MSR-System. Regelgrösse ist die Kesselwassertemperatur T313, und Stellgrösse ist die Feuerungsleistung des Holzkessels. Der Ölkessel wird freigegeben, wenn der Sollwert der Feuerungsleistung des Holzkessels während einer bestimmten Zeit auf 100% bleibt und die Solltemperatur nicht mehr gehalten werden kann; die Sperrung des Ölkessels erfolgt, wenn der Sollwert der Feuerungsleistung während einer bestimmten Zeit wieder unter einen vorgegebenen Wert sinkt und die Solltemperatur wieder erreicht ist. Der Öl-/Gaskessel wird über sein eigenes internes MSR-System betrieben.

**Nachteil:**

Der Öl-/Gaskessel wird nur freigegeben und gesperrt, aber nicht wirklich geregelt. Deshalb besteht die Gefahr, dass der Öl-/Gaskessel zuviel Leistung bringt und damit den Holzkessel zum Zurückregeln zwingt und es so zu einem Hin- und Herschalten der beiden Kessel kommt.

**Bemerkung:**

Bei den Regelkonzepten WE3.1 bis WE3.4 wird der Holzkessel durch die Sequenz-Regelung zwingend auf 100% gehalten und die fehlende Leistung wird allein mit dem Öl-/Gaskessel durch Zweipunktregelung (bzw. durch Modulation) hinzugefügt. Erst wenn die Sequenz-Regelung den Öl-Gaskessel während einer bestimmten Zeit nicht mehr gebraucht hat, wird dieser wieder gesperrt.

## 4.4 Projektvorschlag 2: Simulation der Standard-Schaltungen WE3 und WE4

### Zielsetzung

1. Erstellen eines Modells für die beiden Standard-Schaltungen WE3 und WE4 in Matlab/Simulink.
2. Validierung des Modells mit realen Messdaten der Messprojekte «Azmoos» (vorliegendes Projekt) und des in Abschnitt 4.3 beschriebenen Projektes.
3. Simulation verschiedener Schaltungen und Varianten und Optimierung der Parameter.

### Regelkonzepte

Untersucht werden sollen alle Regelkonzepte gemäss Projektvorschlag in Abschnitt 4.3 (WE3), sowie alle Regelkonzepte, die im vorliegenden Projekt mehr oder weniger vollständig untersucht wurden (WE4).

■ Bivalente Holzheizungsanlage ohne Speicher WE3:

- Regelkonzept WE3.1: Sequenz gemäss Standardschaltung WE3, Hauptvariante (Dreiwegeventile nur zur Rücklaufhochhaltung)
- Regelkonzept WE3.2: Sequenz gemäss Standardschaltung WE3, Variante mit zusätzlicher Austrittstemperaturregelung beim Öl-/Gaskessel
- Regelkonzept WE3.3: Sequenz gemäss Standardschaltung WE3, Variante mit Stellgrösse Öl-/Gaskessel = Hub Dreiwegeventil im Kesselkreis
- Regelkonzept WE3.4: Gemäss Standardschaltung Anhang 2
- Regelkonzept WE3.5: Vereinfachte Folgeschaltung ohne übergeordnetes MSR-System

■ Bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher WE4:

- Regelkonzept WE4.1: Hauptregelgrösse = Mittelwert der Speichertemperatur
- Regelkonzept WE4.2: Hauptregelgrösse = Speicherladezustand, Istwert in 5 Stufen
- Regelkonzept WE4.3: Hauptregelgrösse = Speicherladezustand, Istwert interpoliert über fünf Speichertemperaturen

## Simulation des Wärmenetzes

Die Simulation des Wärmenetzes soll durch ein möglichst einfaches Modell erfolgen, welches das Lastverhalten einer realen Anlage abbildet (mit Hilfe von Messdaten der Versuchsanlage «Azmoos» oder gemäss Projektvorschlag in Abschnitt 4.3). Die Vorlauftemperatur T332 bzw. T342 ist durch die Simulation der Wärmeerzeugung gegeben (die druckdifferenzarme Schnittstelle wird weggelassen). Damit ergibt sich als Schnittstelle zwischen Wärmeerzeugung und Wärmenetz:

→ Vorlauftemperatur T332 bzw. T342

← Durchfluss an der Schnittstelle

← Rücklauftemperatur T333 bzw. T343

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] Ruedi Bühler, Hans Rudolf Gabathuler, Andres Jenni: Q-Leitfaden. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2004. (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 1)
- [2] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer: Standard-Schaltungen – Teil I. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2004. (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 2)
- [3] Andres Jenni, Hans Peter Schaffner, Bernhard Pex: Muster-Ausschreibung Holzkessel. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2004. (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 3)
- [4] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Planungshandbuch. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2004. (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 4)
- [5] Standard-Schaltungen – Teil II. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., erscheint im Frühjahr 2005. (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 5)
- [6] Energie Schweiz und Holzenergie Schweiz: Nahwärmeverbund Azmoos - Ortsgemeinde Wartau. Informationsblatt. Zürich: Holzenergie Schweiz, 2002.
- [7] Empfehlung Standard-Schnittstellen. Standard-Schnittstellen zwischen dem übergeordneten MSR-System und den untergeordneten MSR-Systemen der Kessel in Holzheizwerken. Download von [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch) (aktuelle Version vom 1. Juni 2004).
- [8] Herstellerliste. Liste der Holzkessel- und Regelgerätehersteller, die nach eigenen Angaben die Standard-Schnittstelle anbieten können. Download von [www.qmholzheizwerke.ch](http://www.qmholzheizwerke.ch) (wird laufend aktualisiert).

## Anhang: Merkblatt

## Zweck

Dieses Merblatt gibt ergänzende Hinweise, wie die Erfassung des Speicherladezustandes gemäss [1] realisiert werden kann.

[1] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer: Standard-Schaltungen – Teil I. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2004. (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 2)

## Regelkonzept

Für die Standard-Schaltung WE4 wird in [1] das Regelkonzept wie folgt definiert:

*Der Ladezustand des Speichers soll über mindestens 5 Temperaturfühler erfasst werden, die gleichmässig über die Höhe des Speichers verteilt sind. Dies ergibt den Ladezustand des Speichers von 0% bis 100% (bei nur 5 Temperaturfühlern allerdings mit relativ grober Stufung von 0% – 25% – 50% – 75% – 100%). Der Ladezustand «warm»/«kalt» ist dabei bei jedem Speicherfühler wie folgt gegeben:*

- Definition: Soll-Temperatur = Ladetemperatur-Sollwert – Sicherheitsabstand z. B.  $85-10=75^{\circ}$
- «warm» bedeutet: Ist-Temperatur  $\geq$  Soll-Temperatur z. B.  $\geq 75^{\circ}$
- «kalt» bedeutet: Ist-Temperatur  $<$  Soll-Temperatur – Hysterese z. B.  $< 75-10=65^{\circ}$

Wenn beispielsweise Fühler 1...5 = «warm» melden, ist der Speicher vollständig gefüllt; wenn nur Fühler 1...3 = «warm» melden, ist der Speicher gut zur Hälfte gefüllt.

[...] Der Speicher [soll] durch eine stetige Regelung geladen werden. Der stetige Regler soll PI-Charakteristik haben. Infolge des I-Anteils kann damit der Speicher ohne bleibende Regelabweichung (wie es beim P-Regler der Fall wäre) auf einen vorgegebenen Wert geladen werden. Je grösser die Abweichung vom gewünschten Speicherladezustand ist, desto grösser wird die Leistungsanforderung an den Holzkessel und den Öl-/Gaskessel.

## Varianten zur Realisierung der Erfassung des Speicherladezustandes

Für die Erfassung des Speicherladezustandes sind unterschiedliche Varianten möglich. Einige werden nachfolgend beschrieben. Dabei bedeutet:

w = Fühler meldet «warm» (Definition siehe oben)

k = Fühler meldet «kalt» (Definition siehe oben)

**Variante 1 (Tabelle 13):** Gemäss Beschreibung in [1] (siehe oben) mit Fühlerwertigkeit 0 – 25 – 50 – 75 – 100. «Alle Fühler kalt» ergibt zusätzlich die Wertigkeit -25, was unpraktisch ist, weil dadurch der Regelbereich 125 wird.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	-25
w	k	k	k	k	0
w	w	k	k	k	25
w	w	w	k	k	50
w	w	w	w	k	75
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 125					

Tabelle 23: Variante 1 (5 Stufen)

**Variante 2 (Tabelle 14):** Mit Fühlerwertigkeit 20 – 40 – 60 – 80 – 100. Für «Alle Fühler kalt» ergibt sich die Wertigkeit 0 und der Regelbereich ist 100. Die stufige Kennlinie kommt damit unter eine gedachte ideale stufenlose Kennlinie zu liegen.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	0
w	k	k	k	k	20
w	w	k	k	k	40
w	w	w	k	k	60
w	w	w	w	k	80
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 100					

Tabelle 24: Variante 2 (5 Stufen)

**Variante 3 (Tabelle 15):** Wenn am Anfang und am Schluss der Reihe eine halbe Stufe von 12,5 gemacht wird und dazwischen drei Stufen von 25, dann kommt die stufige Kennlinie exakt auf die Mitte einer gedachten idealen stufenlosen Kennlinie zu liegen.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
k	k	k	k	k	0
w	k	k	k	k	12,5
w	w	k	k	k	37,5
w	w	w	k	k	62,5
w	w	w	w	k	87,5
w	w	w	w	w	100
Regelbereich = 100					

Alle drei Varianten ergeben ein stufiges Istwertsignal. Deshalb darf der (schnelle) P-Anteil des PI-Reglers nicht zu gross sein, und Störungen müssen hauptsächlich über den (langsamen) I-Anteil ausgeregelt werden.

Tabelle 25: Variante 3 (5 Stufen)

**Variante 4 (Tabelle 26):** Eine mehr oder weniger stufenlose Kennlinie kann erreicht werden, wenn die Werte dazwischen über die Temperatur des jeweils aktiven Fühlers interpoliert werden. Damit ergibt sich zwar auch keine ideale Kennlinie – die programmierten Temperaturen stimmen nie exakt mit den tatsächlichen überein –, aber das mehr oder weniger stetige Istwertsignal erlaubt einen üblichen P-Anteil beim PI-Regler.

Fühler (von oben nach unten)					Wertigkeit
1	2	3	4	5	
< 60°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	0
60...80°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	0...20
> 80°C	60...80°C	< 60°C	< 60°C	< 60°C	20...40
> 80°C	> 80°C	60...80°C	< 60°C	< 60°C	40...60
> 80°C	> 80°C	> 80°C	60...80°C	< 60°C	60...80
> 80°C	> 80°C	> 80°C	> 80°C	60...80°C	80...100

Tabelle 26: Variante 4 (stufenlos)

Messungen zeigen, dass Überschneidungen der Fühlertemperaturen infolge «Wasserfalleffekten», ungenauen Fühlern, stark unterschiedlichen Fühlerzeitkonstanten usw. normalerweise nicht vorkommen. Bei einer guten Anlage kann deshalb davon ausgegangen werden, dass für die Fühlertemperaturen  $T_1...T_5$  gilt:

$$T_1 \geq T_2 \geq T_3 \geq T_4 \geq T_5 \quad (T_1...T_5 \text{ von oben nach unten})$$

Der jeweils aktive Fühler ist in Tabelle 26 grau hinterlegt. Es gilt folgende Regel:

- Fühler 1 aktiv, wenn alle anderen Fühlertemperaturen < 80°C
- Fühler 2 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_1 > 80^\circ\text{C}$
- Fühler 3 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_2 > 80^\circ\text{C}$
- Fühler 4 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_3 > 80^\circ\text{C}$
- Fühler 5 aktiv, wenn Fühlertemperatur  $T_4 > 80^\circ\text{C}$

Die Güte der Interpolation (Glättung des Signals) ist von der Dicke der Mischzone im Speicher abhängig, und diese Dicke ist keine feste Grösse. Beim gleichen Speicher kann sie – je nach Durchflussgeschwindigkeit, Auskühlung usw. – sehr unterschiedlich sein. Grundsätzlich gilt:

- Dicke der Mischzone null (idealer Schichtspeicher) ergibt überhaupt kein Glättung, das Signal ist ebenso stufig wie in Variante 2 (Tabelle 14)
- Dicke der Mischzone zwischen null und einem Fühlerabstand ergibt eine immer besser werdende Glättung des Signals
- Dicke der Mischzone ganz wenig grösser als ein Fühlerabstand ergibt die beste Glättung
- Dicke der Mischzone deutlich grösser als ein Fühlerabstand ergibt wieder eine schlechtere Glättung

