

Schlussbericht Oktober 2004

Wärmepumpenanlage mit Heizkörperheizung ohne Speicher

ausgearbeitet durch
Hans Rudolf Gabathuler, 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

**Die Autoren bedanken sich
für die Mitarbeit bei:**

Daniel Trüssel
Werner Heiniger
Sacha Nebert
KWT
Kälte-Wärme-Technik AG
Hühnerhubelstrasse 79
3123 Belp

Begleitgruppe:

Dr. Thomas Afjei
FHBB
Fachhochschule beider Basel
Fichtenhaagstrasse 4
4132 Muttenz

Markus Erb
Dr. Eicher + Pauli AG
Kasernenstrasse 21
4410 Liestal

Daniel Trüssel
KWT
Kälte-Wärme-Technik AG
Hühnerhubelstrasse 79
3123 Belp

Dr. Thomas Kopp
HSR
Hochschule Rapperswil
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie
3003 Bern

Vertreten durch den Projektbe-
gleiter Dr. Thomas Kopp

www.waermepumpe.ch/fe

Zusammenfassung

Aus Forschungsprojekten des Bundesamtes für Energie sind Messdatensätze verschiedener Wärmepumpenanlagentypen vorhanden. Ein wesentlicher Anlagentyp fehlte bisher, nämlich die Wärmepumpenanlage mit Heizkörperheizung ohne Speicher. Eine solche Anlage wurde im Rahmen dieses Projekts untersucht. Mit den Messungen konnte gezeigt werden, dass eine ganz bestimmte Versuchsanlage, deren Wärmeabgabesystem eine Heizkörperheizung ist, ohne Speicher betrieben werden kann. Die Autoren sind der Meinung, dass die an der Versuchsanlage gemachten Aussagen verallgemeinert werden dürfen, wenn folgende Forderungen eingehalten werden:

- Sorgfältige Dimensionierung der Anlage, d. h. insbesondere keine unnötige Überdimensionierung der Wärmepumpe
- Nur eine einzige Heizgruppe ohne Mischventil, d. h. es ist kein Speicher zur hydraulischen Entkopplung notwendig
- Thermostatventilanteil an der Heizfläche unter 40%
- Bei Aussenluft als Wärmequelle keine Abtauung im Umkehrprozess
- Spezifischer Wasserinhalt des Wärmeabgabesystems (Heizkörper + Leitungen) mindestens 15 Liter/kW, d. h. lamellierte Heizwände oder Radiatoren, aber keine sogenannten «Niedertemperatur-Konvektoren» mit extrem kleinem Wasserinhalt
- Die Hysterese (Schaltdifferenz) des Rücklauftemperaturreglers soll auf 2 K bis 8 K einstellbar sein; Empfehlung: Grundeinstellung auf 4 K
- Eine Wiedereinschaltverzögerung von 5 Minuten sollte in der Regel genügen; eine Beeinflussung des Taktverhaltens über die Vergrößerung der Hysterese ist jedoch besser, weil dadurch ein kontinuierlicheres Regelverhalten erreicht werden kann

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

Abstract

Test data are available from Swiss Federal Office of Energy research projects for various heat pump systems. Despite that, one important installation had not till now been studied, i.e. one with radiators but no heating storage tank. The present project deals with this configuration. The measurements show that a well designed system with heat distribution based on radiators can operate satisfactorily without a storage tank. In the authors' view, the conclusions drawn from the tests are generally applicable provided the following conditions are met:

- careful dimensioning of the plant, particularly avoiding over-dimensioning the heat pump
- a single heating loop to which the heat pump is attached without use of a mixing valve, thereby avoiding the need for hydraulic decoupling via heating storage tank
- thermostatic valves for less than 40% of the heating surface
- when using ambient air as heat source, no defrosting in reverse operation mode
- specific water content of the heat distribution system (radiators+pipng) at least 15 l/kW, attainable with finned steel panel or standard radiators. So-called low temperature convectors with extremely small water capacity are unsuitable
- the switching range of the return temperature controller should be adjustable from 2 K to 8 K. Recommended setting under normal conditions: 4 K
- although it is not the primary function of the reconnection time to prevent on/off cycling, the value of five minutes chosen should generally suffice to do so. However, cycling can be avoided more effectively by increasing the switching range of the controller, which will provide smoother operation

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. Ausgangslage.....	7
2. Ziel der Arbeit	7
3. Versuchsanlage.....	7
3.1 Prinzipschema und Messstellenliste	9
3.2 Funktionsbeschreibung	10
3.2.1 Ursprüngliches Regelkonzept.....	10
3.2.2 Regelkonzept für die vorliegende Untersuchung.....	10
4. Resultate der Messungen	12
4.1 Kennlinien.....	12
4.1.1 Aussentemperatur und Raumtemperaturen	12
4.1.2 Lastkennlinie	12
4.1.3 Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturkennlinie	13
4.2 Taktverhalten an fünf typischen Tagen	14
4.2.1 Was heisst zulässiges Takten?.....	14
4.2.2 Taktverhalten in Abhängigkeit der Aussentemperatur.....	14
4.2.3 Kalter Tag – geringes Takten.....	16
4.2.4 Warmer Tag – geringes Takten	18
4.2.5 Tag um 9°C – relativ geringes Takten	20
4.2.6 Tag um 9°C – mittleres Takten	22
4.2.7 Tag um 9°C – höchstes Takten	24
4.2.8 Resümee.....	24
4.3 Diskussion	26
4.3.1 Qualitativer Zusammenhang von Puls-, Pausen- und Periodendauer	26
4.3.2 Theoretischer Zusammenhang von Puls-, Pausen- und Periodendauer	27
4.3.3 Thermostatventile	32
4.3.4 Trockenraumheizung durch Unterkühlung.....	32
5. Empfehlungen	34
5.1 Wann geht es ohne Speicher?.....	34
5.2 Wann ist ein Speicher zwingend erforderlich?.....	34
5.3 Ergänzung zu den bisherigen STASCH-Empfehlungen	35
6. Literaturverzeichnis	36

1. Ausgangslage

Aus Forschungsprojekten des Bundesamtes für Energie sind mittlerweile Messdaten von sechs Wärmepumpenanlagentypen vorhanden ([3] bis [8]), die mehr oder weniger die STASCH-Schaltungen gemäss [1] und [2] abdecken.

Aus heutiger Sicht fehlt jedoch ein wesentlicher Anlagentyp, der bisher noch nicht näher untersucht wurde, nämlich die Wärmepumpenanlage mit Heizkörperheizung ohne Speicher. Da solche Anlagen nicht erprobt sind, wurde bei STASCH für eine Heizkörperheizung grundsätzlich ein Speicher empfohlen. Es gibt jedoch Hinweise, dass eine Heizkörperheizung auch ohne Speicher betrieben werden kann.

2. Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der folgenden Fragen:

1. Können Wärmepumpenanlagen mit Heizkörperheizung (analog einer Fussbodenheizung) ohne Speicher betrieben werden?
2. Wenn ja: Welche Randbedingungen müssen erfüllt sein?

3. Versuchsanlage

Es war schwierig eine geeignete Versuchsanlage zu finden, bei der sowohl der Wärmepumpenhersteller wie der Bauherr zur Mitarbeit bereit waren. Die Anlage «Richigen» (Abbildung 1 und Abbildung 2) entsprach den gestellten Anforderungen am besten:

- Älteres Dreifamilienhaus, bei dem 1995 der Ölheizkessel durch eine Wärmepumpe mit Wassererwärmung ersetzt wurde (Erdwärmesonden)
- Häufig vorkommender Sanierungsfall, bei dem immer der Ersatz durch eine Wärmepumpe geprüft werden sollte
- Das Wärmeabgabesystem ist eine reine Heizkörperheizung mit relativ hohen Vorlauftemperaturen und mit Thermostatventilen in den südlich orientierten Räumen
- Interesse und Bereitschaft zur Mitarbeit von Seiten Wärmepumpenhersteller und Bauherr



Abbildung 1: Versuchsanlage Richigen, Ansicht von Südwesten



Abbildung 2: Versuchsanlage Richigen, Ansicht von Nordwesten

3.1 Prinzipschema und Messstellenliste

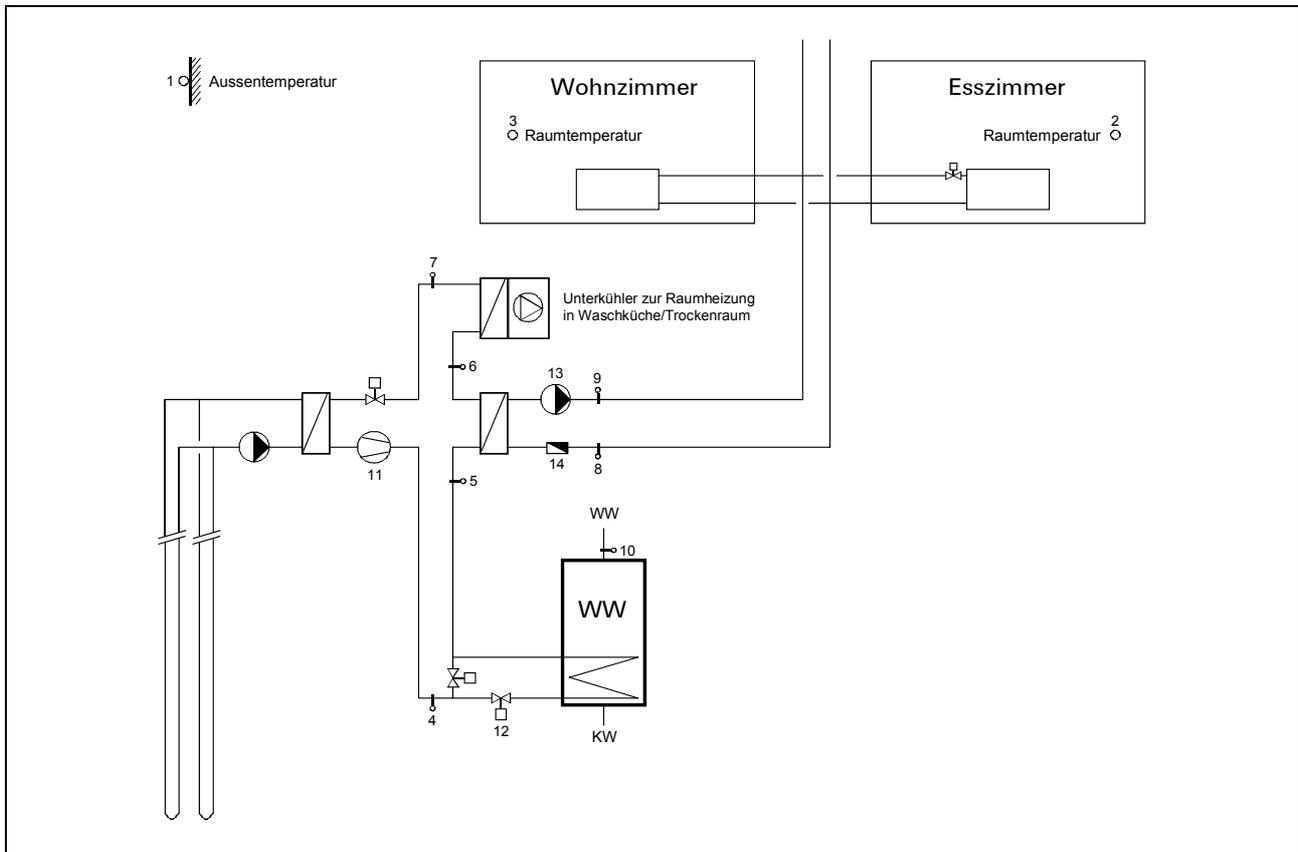


Abbildung 3: Prinzipschema der Wärmepumpenanlage in Richigen

Nr.	Messgröße	Messort	Kurzname	Messfühler Messsignal
1	Temperatur	Nordfassade: Aussenluft (ventiliert)	Aussen Nord	NTC
2	Temperatur	Raum mit Thermostatventil: Raumluft	RT mit TV	NTC
3	Temperatur	Raum ohne Thermostatventil: Raumluft	RT ohne TV	NTC
4	Temperatur	Arbeitsmittelkreis: Austritt Verdichter	Verdichter-Aus	NTC
5	Temperatur	Arbeitsmittelkreis: Eintritt Verflüssiger Heizung	Verflüssiger-Ein	NTC
6	Temperatur	Arbeitsmittelkreis: Austritt Verflüssiger Heizung	Verflüssiger-Aus	NTC
7	Temperatur	Arbeitsmittelkreis: Austritt Unterkühler	Unterkühler-Aus	NTC
8	Temperatur	Heizkreis: Rücklauf	HKH-VL	NTC
9	Temperatur	Heizkreis: Vorlauf	HKH-RL	NTC
10	Temperatur	Warmwasserspeicher	WW	NTC
11	Betriebsstunden	Arbeitsmittelkreis: Verdichter	WP-Verdichter	
12	Betriebsstunden	Arbeitsmittelkreis: Ventil Verflüssiger WW / Bypass	Ventil WW	
13	Betriebsstunden	Heizkreis: Heizungspumpe	HKH-UP	
14	Volumen	Heizkreis: Rücklauf	HKH-Durchfluss	1 Liter/Puls
-	Wärmeleistung ¹⁾	Heizkreis	HKH-Wärme	Berechnet

¹⁾ Berechnet aus Volumen (Nr. 14) und den VL-/RL-Temperaturen (Nr. 9 und 8)

Messintervall	10 sec
Aufzeichnungsintervall (Mittel- bzw. Summenwerte)	5 min

Tabelle 4: Messstellenliste; die Numerierung bezieht sich auf Abbildung 3

3.2 Funktionsbeschreibung

3.2.1 Ursprüngliches Regelkonzept

Grundsätzlich ergeben sich aus dem Prinzipschema (Abbildung 3) drei mögliche Betriebsarten:

- A Reiner Heizbetrieb: Verflüssiger Heizung – Unterkühler
- B Reiner Warmwasserbetrieb: Verflüssiger Warmwasser – Unterkühler (Heizungspumpe AUS)
- C Heizung + Warmwasser: Verflüssiger Warmwasser – Verflüssiger Heizung – Unterkühler

Das ursprüngliche Regelkonzept war eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung, Stellgröße war die Drehzahl des Scroll-Kompressors. Damit konnte die Anlage bereits seit Jahren ohne Speicher betrieben werden. Die Wassererwärmung erfolgte über drei Sollwerte:

- Sollwert reiner WW-Betrieb z. B. 55°C
- Sollwert Enthitzungsbetrieb (WW parallel mit Heizung) z. B. 60°C
- Sollwert WW-Priorität z. B. 45°C

Im Winterbetrieb wurde bei Heizbetrieb möglichst lange zusätzlich über den Verflüssiger Warmwasser enthitzt. Die Anlage lief also relativ oft in Betriebsart C. Im Sommerbetrieb erfolgte die Wassererwärmung über einen niedrigeren Sollwert für reinen Warmwasserbetrieb.

3.2.2 Regelkonzept für die vorliegende Untersuchung

Für die Messungen wurde das Regelkonzept auf eine witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung umgebaut, und die Drehzahl des Scroll-Kompressors wurde auf eine fixe Drehzahl gestellt (Frequenzumformer bis 26.2.04 auf 50 Hz und danach auf 60 Hz).

Reglereinstellungen vom 14.1.04 bis 12.3.04 (ca. 9:00 Uhr)

Raumtemperatur entsprechend:

- Normalbetrieb 22°C
- Reduzierter Betrieb 19°C

Rücklauftemperatur-Heizkurve bei Normalbetrieb:

- Bei -9°C Aussentemperatur 48°C
- Fusspunkt 21°C
- Hysterese (Schaltdifferenz) 2 K (fix programmiert)

Zeitprogramm Nachtabsenkung:

- Beginn reduzierter Betrieb 22:00
- Ende reduzierter Betrieb 06:00

Sollwerte Wassererwärmung:

- Sollwert reiner WW-Betrieb 54°C (Hysterese 7 K)
- Sollwert Enthitzungsbetrieb (WW parallel mit Heizung) 60°C (Hysterese 7 K)
- Sollwert WW-Priorität 40°C (Hysterese unbekannt)

Zeitrelais-Funktionen:

- Nach Netzausfall 50 Sekunden (fix programmiert)
- Wiedereinschaltsperr 10 Minuten (fix programmiert)

Reglereinstellungen vom 12.3.04 (ca. 9:00 Uhr) bis 2.6.04

Das Regelkonzept wurde so angepasst, dass nur reiner Heizbetrieb A und reiner Warmwasserbetrieb B in einem fixen Zeitraster möglich war: Reiner Heizbetrieb 4 mal 5 Stunden pro Tag und dazwischen, 4 mal während maximal 1 Stunde, reiner Warmwasserbetrieb. Geänderte Einstellungen sind unterstrichen.

Raumtemperatur entsprechend:

- Normalbetrieb 22°C
- Reduzierter Betrieb 15°C

Rücklauftemperatur-Heizkurve bei Normalbetrieb:

- Bei -9°C Aussentemperatur 48°C
- Fusspunkt 21°C
- Hysterese (Schaltdifferenz) 2 K (fix programmiert)

Zeitprogramm Nachtabsenkung:

- | | | | | |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| - Beginn reduzierter Betrieb | <u>03:00</u> | <u>09:00</u> | <u>15:00</u> | <u>21:00</u> |
| - Ende reduzierter Betrieb | <u>04:00</u> | <u>10:00</u> | <u>16:00</u> | <u>22:00</u> |

Sollwerte Wassererwärmung:

- Sollwert reiner WW-Betrieb 55°C (Hysterese 2 K)
- Sollwert Enthitzungsbetrieb (WW parallel mit Heizung) 60°C (Hysterese 7 K)
- Sollwert WW-Priorität 40°C (Hysterese unbekannt)

Zeitrelais-Funktionen:

- Nach Netzausfall 50 Sekunden (fix programmiert)
- Wiedereinschaltsperr 10 Minuten (fix programmiert)

Neu wurde eine externe Schaltuhr auf den Eingang «Nachtkommando» installiert:

- | | | | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| - Beginn Boilerladung «Nacht» | <u>03:00</u> | <u>09:00</u> | <u>15:00</u> | <u>21:00</u> |
| - Ende Boilerladung «Nacht» | <u>04:00</u> | <u>10:00</u> | <u>16:00</u> | <u>22:00</u> |

4. Resultate der Messungen

4.1 Kennlinien

4.1.1 Aussentemperatur und Raumtemperaturen

Die Datenaufzeichnung erfolgte vom 14. Januar bis 2. Juli 2004. Am 12. März 2004 wurde das Regelkonzept wie beschrieben geändert. Die Aussentemperatur- und Raumtemperaturverläufe zeigt Abbildung 5.

Für die Lastkennlinie (Abbildung 6) und die Temperaturkennlinien (Abbildung 7) wurde der gesamte Datensatz verwendet, für die übrigen Untersuchungen nur die Daten nach dem 12. März, weil dazu nur das geänderte Regelkonzept interessierte (reiner Heizbetrieb 4 mal 5 Stunden pro Tag und dazwischen, 4 mal während maximal 1 Stunde, reiner Warmwasserbetrieb).

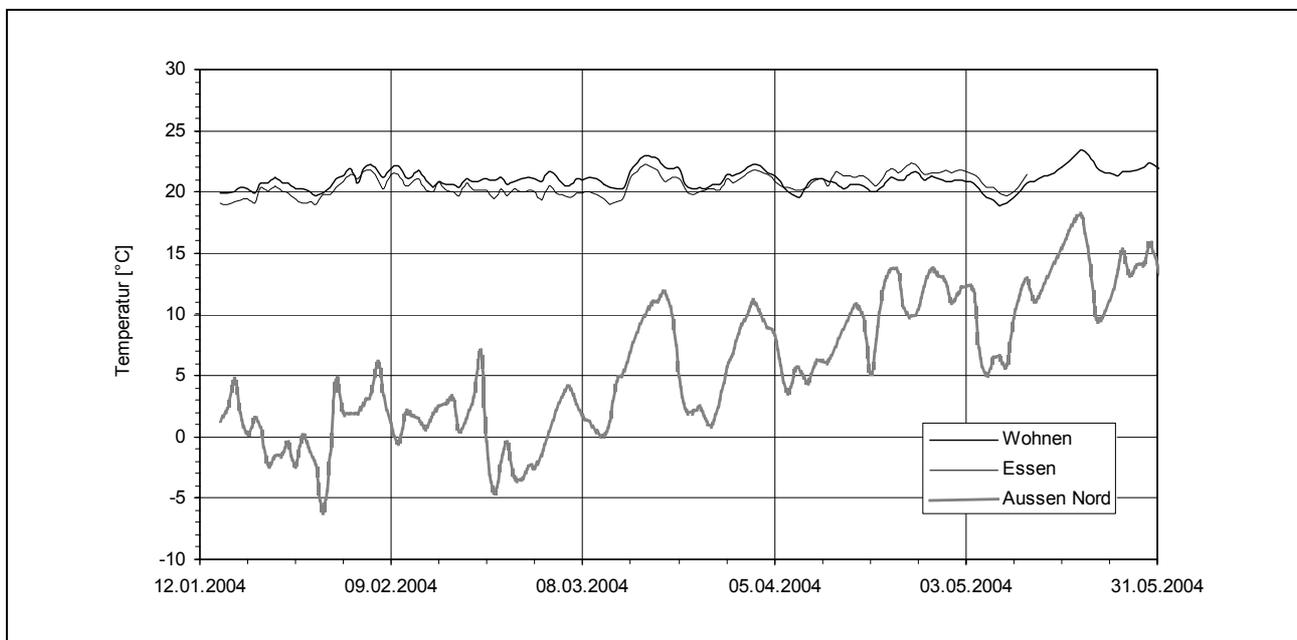


Abbildung 5: Verlauf der Aussentemperatur und der Raumtemperaturen während der ganzen Beobachtungsperiode (ohne die letzten beiden Tage)

4.1.2 Lastkennlinie

Abbildung 6 zeigt die gemessene Lastkennlinie (24-Stunden-Mittelwerte) der Anlage. Bei -10°C Aussentemperatur kann beispielsweise ein gemessener Wärmeleistungsbedarf der Anlage von gut 11 kW herausgelesen werden.

Die maximale Wärmeleistung der Wärmepumpe liegt bei tieferen Aussentemperaturen ebenfalls um 11 kW, und sie steigt bei höheren Aussentemperaturen auf etwa 14 kW an (siehe Abbildung 9 bis Abbildung 13).

Somit kann gesagt werden, dass die Wärmepumpenanlage für einen reinen Heizbetrieb – was für die vorliegende Untersuchung des Taktverhaltens relevant ist –, eher unter- als überdimensioniert ist.

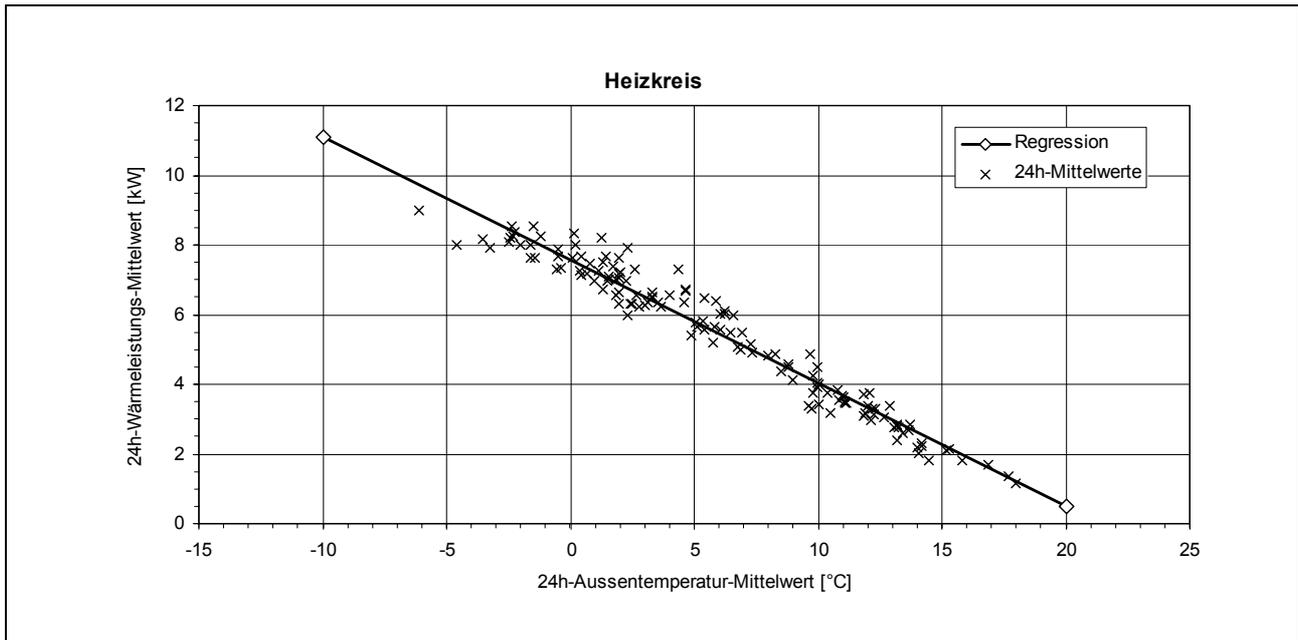


Abbildung 6: Lastkennlinie (24-Stunden-Mittelwerte über die gesamte Beobachtungsperiode)

4.1.3 Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturkennlinie

Die Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturkennlinie in Abbildung 7 ist typisch für eine ältere Heizkörperheizung, wie sie beim Ersatz eines Heizkessels durch eine Wärmepumpe vorkommt. Bei -10°C ist eine Vorlauf- bzw. Rücklauftemperatur von $49/46^{\circ}\text{C}$ erforderlich.

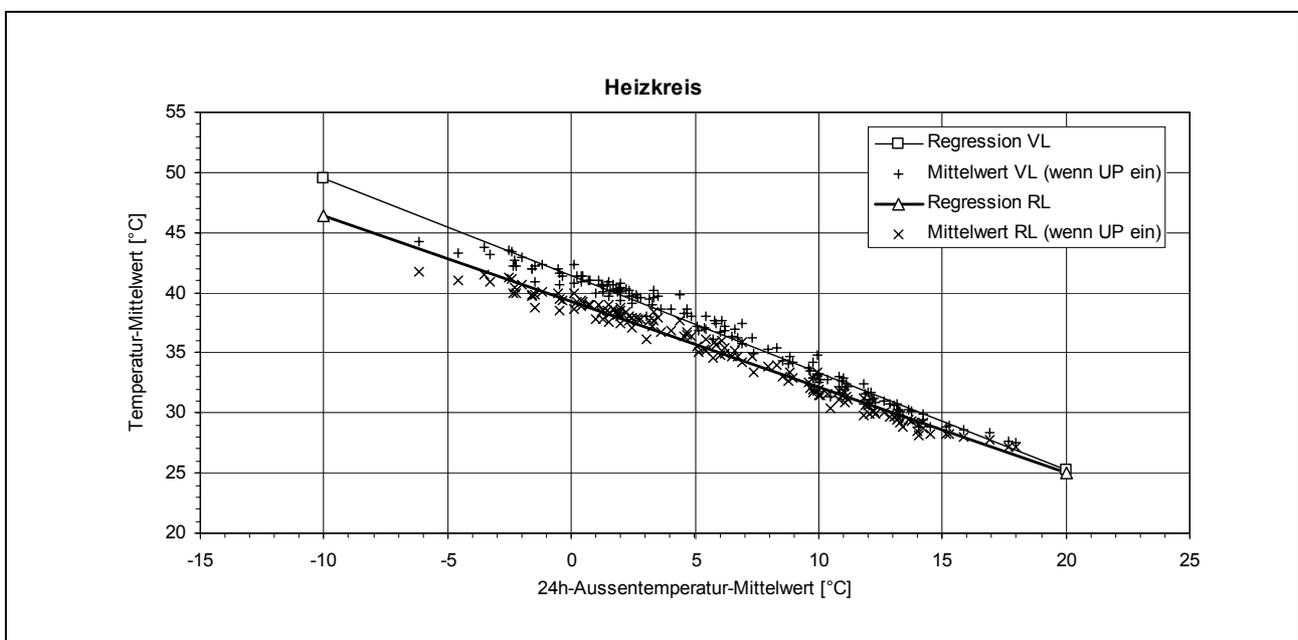


Abbildung 7: Vorlauf- und Rücklauf-Temperaturkennlinie (erstellt aus den Daten der gesamten Beobachtungsperiode)

4.2 Taktverhalten an fünf typischen Tagen

4.2.1 Was heisst zulässiges Takten?

Zuerst muss einmal geklärt werden, ab wann eine Wärmepumpe zulässig taktet. Dazu gibt es mindestens vier Möglichkeiten um entsprechende Forderungen aufzustellen:

- A Nicht mehr als drei Einschaltungen pro Stunde (so lautet die Forderung vieler Elektrizitätswerke)
- B Nicht mehr als 72 Einschaltungen pro Tag (Forderung A hochgerechnet auf einen Tag)
- C Minimale Pulslänge von 10 Minuten (halbe Periodendauer von Forderung A)
- D Minimale Pausenlänge von 10 Minuten (halbe Periodendauer von Forderung A)

Nachfolgend werden immer alle vier Forderungen auf ihre Einhaltung geprüft.

4.2.2 Taktverhalten in Abhängigkeit der Aussentemperatur

Wann taktet eine Wärmepumpenanlage am häufigsten? Die Antwort auf diese Frage gibt Abbildung 8. Hier ist die Anzahl Einschaltungen im Heizbetrieb in Abhängigkeit der mittleren Aussentemperatur (24-Stunden-Mittelwert) dargestellt.

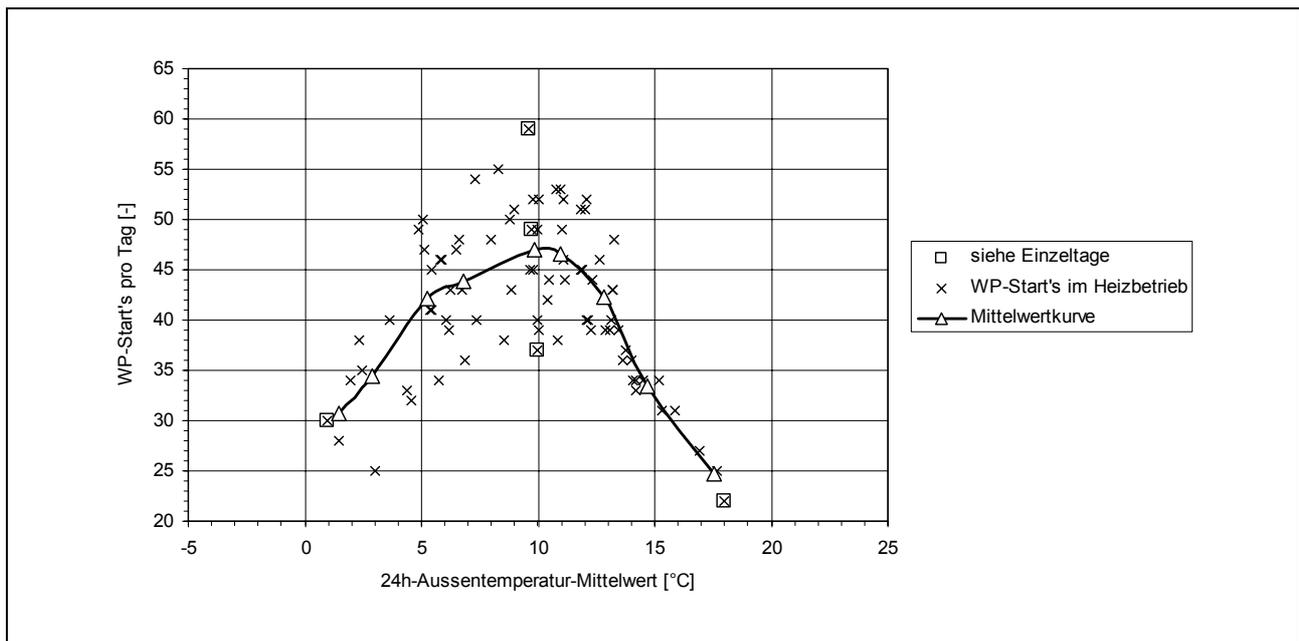


Abbildung 8: Taktverhalten (bezogen auf die Freigabezeit Heizbetrieb von 20 Stunden)

Am häufigsten taktet die Wärmepumpe bei 9°C Aussentemperatur. Darunter und darüber fällt die Anzahl der Einschaltungen stark ab. Auffallend ist allerdings, dass im Bereich um 9°C die Anzahl Einschaltungen stark streut: es ergeben sich Werte zwischen 37 und 59 Einschaltungen pro Tag.

Wie sich das Taktverhalten ergibt, soll anschliessend an fünf typischen Tagen, die in Abbildung 8 durch quadratförmige Punkte hervorgehoben sind, diskutiert werden:

- Kalter Tag mit geringem Takten (Abbildung 9)
- Warmer Tag mit geringem Takten (Abbildung 10)
- Tag mit Aussentemperatur um 9°C und relativ geringem Takten (Abbildung 11)
- Tag mit Aussentemperatur um 9°C und mittlerem Takten (Abbildung 12)
- Tag mit Aussentemperatur um 9°C und dem höchsten Takten (Abbildung 13)

Die Beurteilung des Taktverhaltens erfolgt anhand der in Abschnitt 4.2.1 «Was heisst zulässiges Talten» aufgestellten vier Forderungen. Das Resultat wird wie folgt beurteilt:

Resultat	Urteil
Forderung erfüllt	
Forderung knapp nicht erfüllt	
Forderung deutlich nicht erfüllt	

4.2.3 Kalter Tag – geringes Takten

Samstag, 27. März 2004

Die Aussentemperatur lag zwischen -2°C und 5°C .

Die Raumtemperaturen lagen in der Nacht knapp unter 20°C , am Tag stieg sie auf wenig über 22°C .

Die Wassererwärmung erfolgte zu den 4 programmierten Zeiten zu je einer Stunde. Damit lag die Warmwassertemperatur immer zwischen 47°C und 50°C .

Nach Mitternacht taktet die Wärmepumpe mit einer Pulsdauer von etwa 50 Minuten und die Pause ist immer 11 Minuten lang.

Nach der Wassererwärmung folgt um 04:00 Uhr ein 3stündiger Puls gefolgt von einer Pause von 11 Minuten.

Über Mittag von 11:00-15:00 Uhr folgen jeweils Pulse von etwa 15 Minuten und Pausen von 11 Minuten oder knapp darüber.

Am Abend werden die Pulse wieder länger und die Pausen sind wieder 11 Minuten lang.

Ursache für die häufig vorkommenden Pausen von genau 11 Minuten ist die Wiedereinschaltverzögerung, die offensichtlich auf 11 Minuten eingestellt ist (mehr dazu in Abschnitt 4.3.3 «Wiedereinschaltverzögerung»).

	Forderung	Resultat	Urteil
A	≤ 3 Starts/Std.	$\leq 2,5$ Starts/Std.	☺
B	≤ 72 Starts/Tag	30 Starts/Tag	☺
C	Puls ≥ 10 Min.	≥ 15 Minuten	☺
D	Pause ≥ 10 Min	Ohne Wiedereinschaltverzögerung hätte die Forderung nicht erfüllt werden können	☹

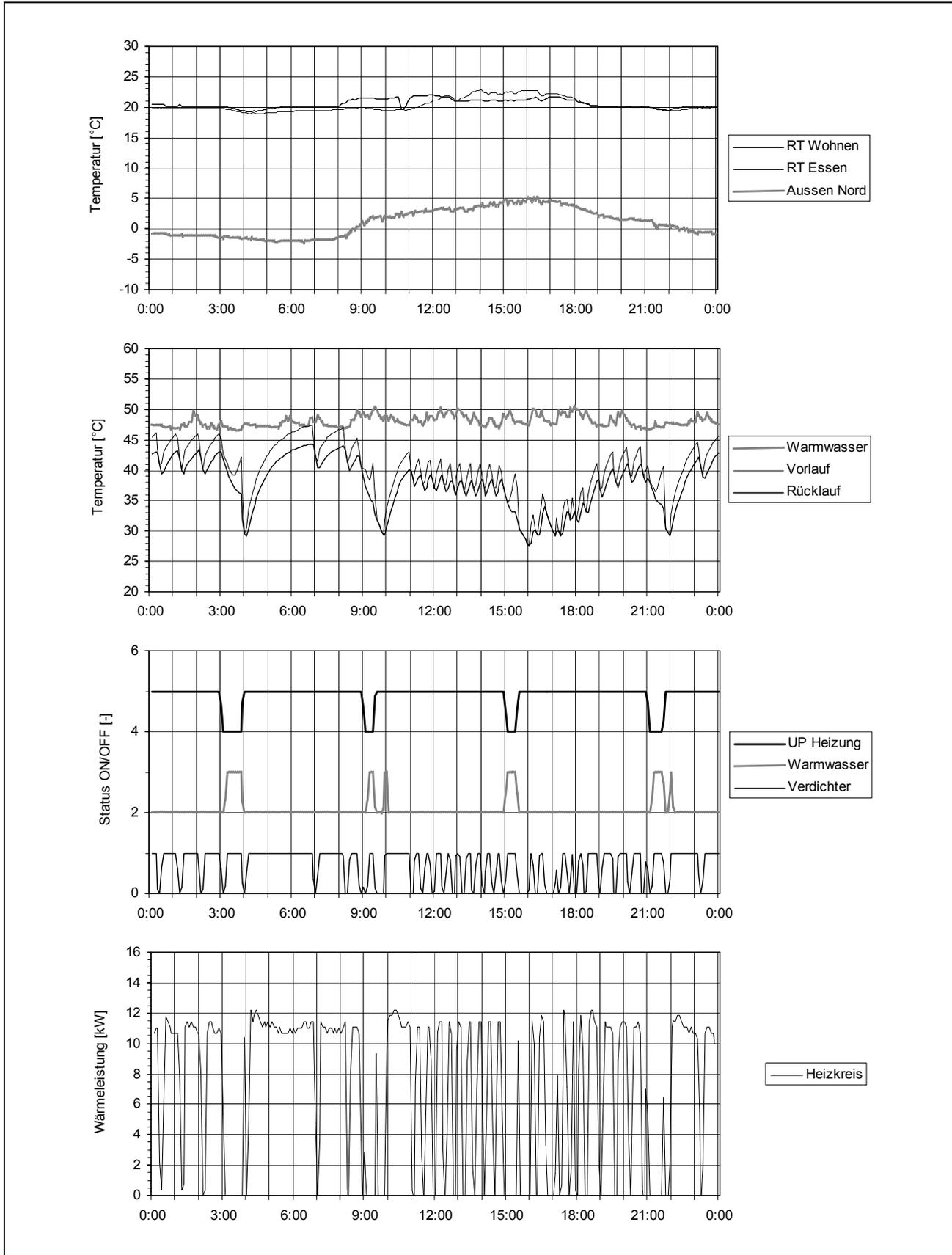


Abbildung 9: Kalter Tag mit geringem Takten (Samstag, 27. März 2004)

4.2.4 Warmer Tag – geringes Takten

Donnerstag, 20. Mai 2004

Die Aussentemperatur lag zwischen 10°C und 26°C.

Die Raumtemperatur lag in der Nacht knapp unter 22,5°C, am Tag stieg sie unter Sonneneinfluss auf 24°C.

Die Wassererwärmung erfolgte zu den 4 programmierten Zeiten zu je einer Stunde. Damit lag die Warmwassertemperatur immer zwischen 47°C und 51°C.

Nach Mitternacht taktet die Wärmepumpe mit einer Pulsdauer von etwa 6 Minuten und die Pause ist immer etwa 20 Minuten lang.

Nach der Wassererwärmung um 04:00 Uhr taktet die Wärmepumpe weiterhin mit einer Pulsdauer von etwa 5 Minuten, aber die Pause hat sich jetzt auf etwa 15 Minuten reduziert.

Während des Tages, bei Aussentemperaturen über 20°C, kommt die Wärmepumpe für die Heizung nie.

Die erwähnte Wiedereinschaltverzögerung, die auf 11 Minuten eingestellt ist, kam hier offensichtlich den ganzen Tag nie zum Eingriff.

	Forderung	Resultat	Urteil
A	≤ 3 Starts/Std.	Erfüllt, zeitweise aber nur knapp	☺
B	≤ 72 Starts/Tag	22 Starts/Tag	☺
C	Puls ≥ 10 Min.	≥ 6 Minuten	☹
D	Pause ≥ 10 Min	≥ 15 Minuten	☺

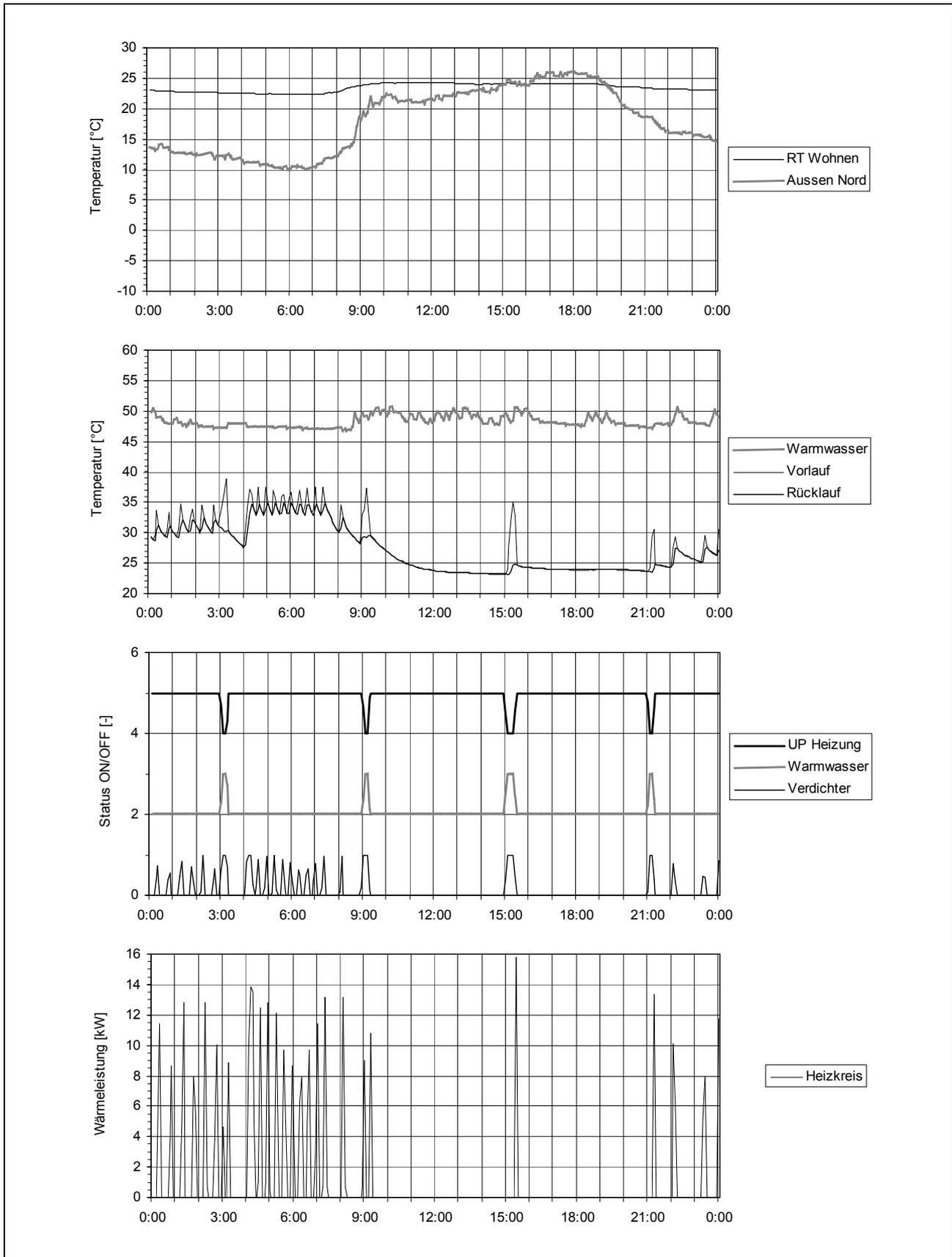


Abbildung 10: Warmer Tag mit geringem Takten (Donnerstag, 20. Mai 2004)

4.2.5 Tag um 9°C – relativ geringes Takten

Mittwoch, 17. März 2004

Die Aussentemperatur lag in der Nacht zwischen 2,5°C und 5°C, und am Tag stieg sie stark an bis auf 20°C. Dies ergab eine Tagesmitteltemperatur zwischen 9 und 10°C.

Die Raumtemperaturen lagen in der Nacht knapp um 21°C, am Tag stiegen sie unter Sonneneinfluss bis über 25°C.

Die Wassererwärmung erfolgte zu den 4 programmierten Zeiten zu je einer Stunde. Damit lag die Warmwassertemperatur immer zwischen 47°C und 50°C.

Nach Mitternacht taktet die Wärmepumpe mit einer Pulsdauer von knapp 15 Minuten und die Pause ist immer 11 Minuten lang.

Nach der Wassererwärmung folgt um 04:00 Uhr ein 1stündiger Puls gefolgt von einer Pause von 11 Minuten. Anschliessend folgen Pulse von 25 Minuten und Pausen von 11 Minuten.

Bei Aussentemperaturen über 10°C (nach 10:00 Uhr) folgen kurze Pulse (≥ 6 Minuten) mit langen bis sehr langen Pausen.

Ab 23:00 Uhr bei Aussentemperaturen unter 7°C ist wieder das gleiche Verhalten zu beobachten wie nach Mitternacht (Pausen von 11 Minuten).

Die erwähnte Wiedereinschaltverzögerung, die auf 11 Minuten eingestellt ist, kam an diesem Tag nur in der Nacht bei Aussentemperaturen unter 7°C zum Eingriff.

	Forderung	Resultat	Urteil
A	≤ 3 Starts/Std.	Abends ganz knapp nicht erfüllt	☹
B	≤ 72 Starts/Tag	37 Starts/Tag	☺
C	Puls ≥ 10 Min.	≥ 6 Minuten	☹
D	Pause ≥ 10 Min	Ohne Wiedereinschaltverzögerung hätte die Forderung nicht erfüllt werden können	☹

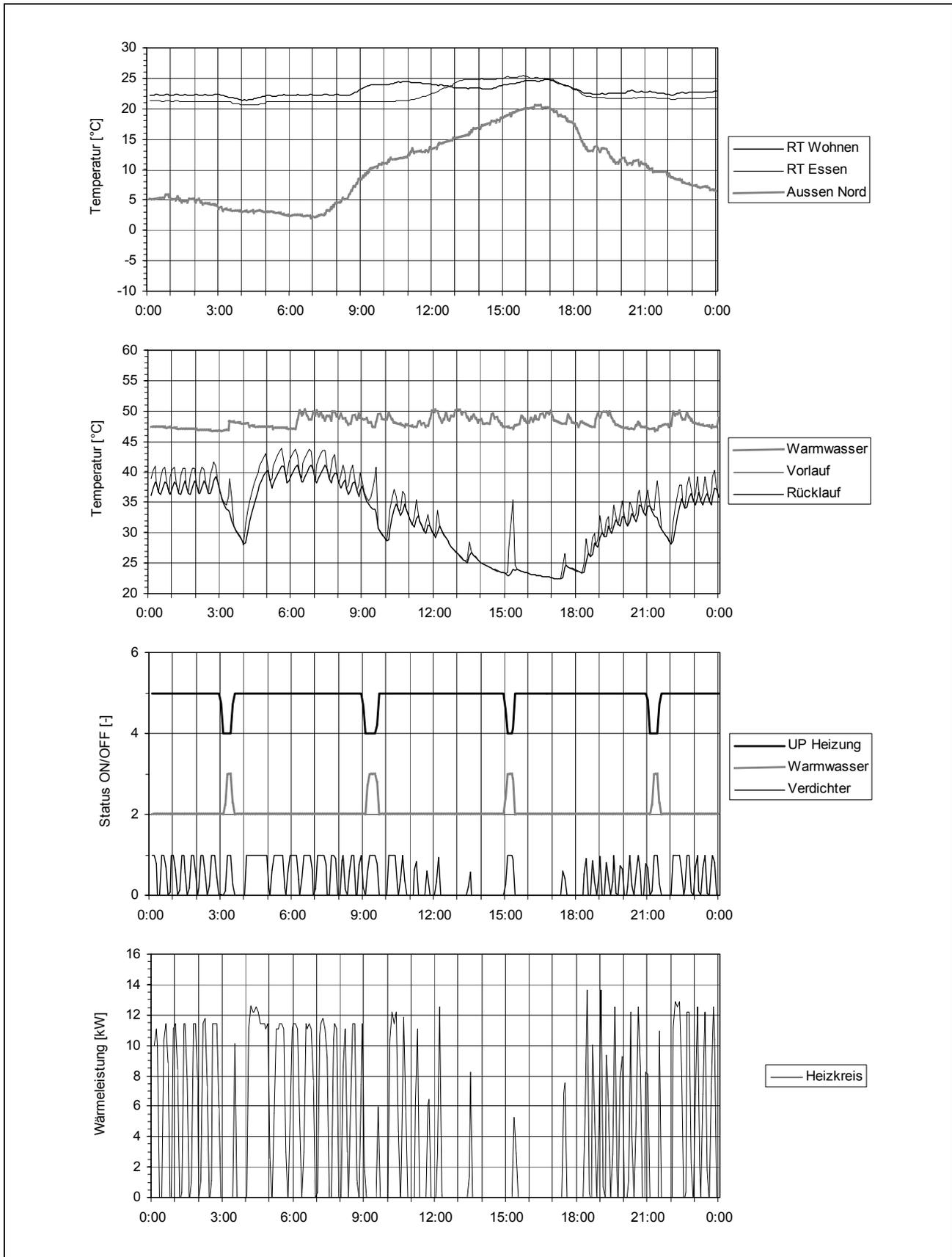


Abbildung 11: Tag mit Aussentemperatur um 9°C und relativ geringem Takten (Mittwoch, 17. März 2004)

4.2.6 Tag um 9°C – mittleres Takten

Sonntag, 23. Mai 2004

Die Aussentemperatur lag an diesem Tag zwischen 4°C und 15°C mit sprunghaftem Anstieg zwischen 08:00 und 09:00. Dies ergab wiederum eine Tagesmitteltemperatur von etwa 9°C.

Die Raumtemperatur lag im Bereich von 21°C bis 23°C.

Die Wassererwärmung erfolgte zu den 4 programmierten Zeiten zu je einer Stunde. Damit lag die Warmwassertemperatur immer zwischen 47°C und 51°C.

Zwischen Mitternacht und 09:00 Uhr taktet die Wärmepumpe mit einer Pulsdauer von 9 Minuten und Pausen von 11 Minuten.

Nach 10:00 Uhr ist die Pausenlänge immer über 11 Minuten, dies bedeutet, dass die Wiedereinschaltverzögerung bis 24:00 nie im Eingriff war

	Forderung	Resultat	Urteil
A	≤ 3 Starts/Std.	Vereinzelt knapp nicht erfüllt	☹
B	≤ 72 Starts/Tag	49 Starts/Tag	☺
C	Puls ≥ 10 Min.	≥ 9 Minuten	☹
D	Pause ≥ 10 Min	≥ 11 Minuten	☺

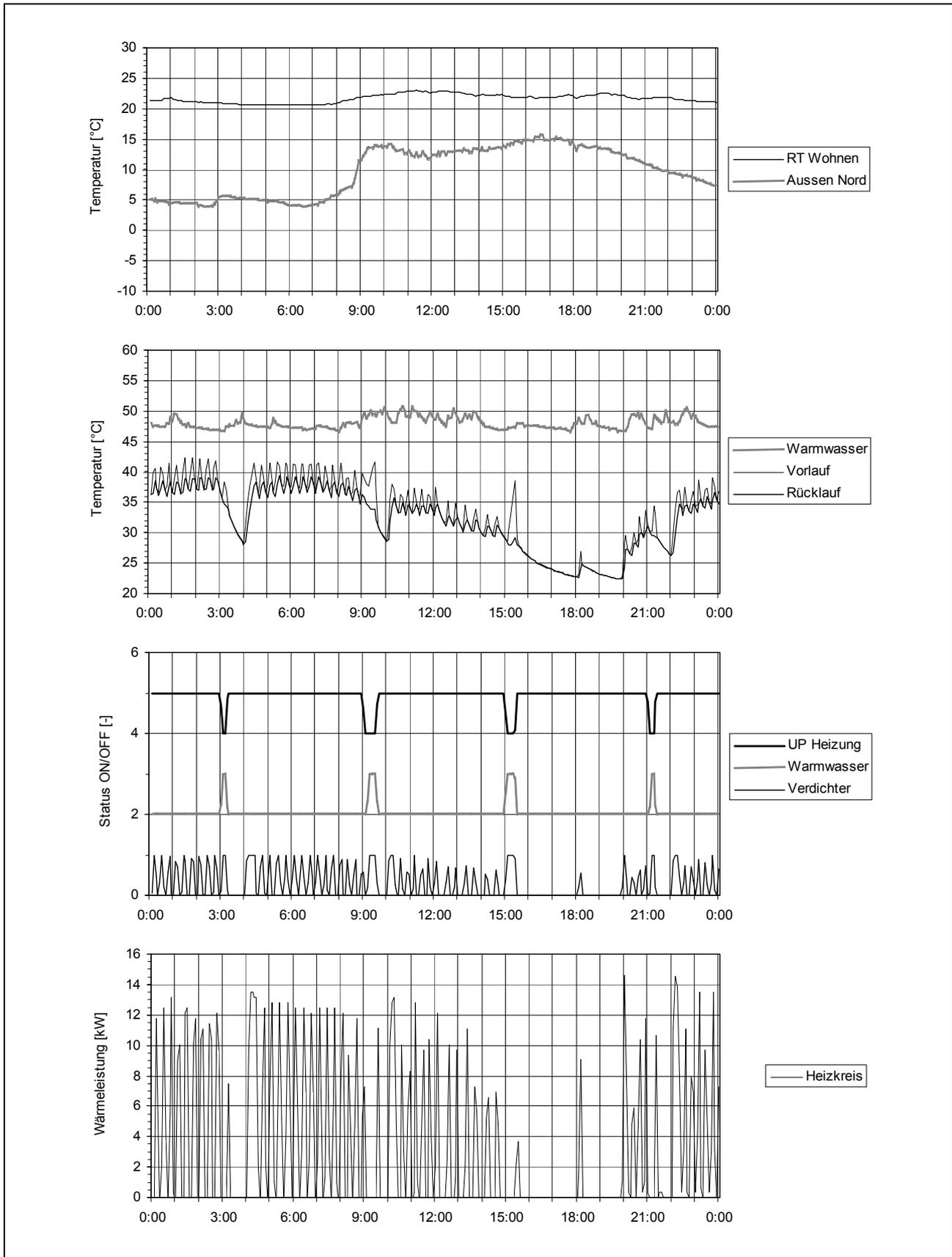


Abbildung 12: Tag mit Aussentemperatur um 9°C und mittlerem Takten (Sonntag, 23. Mai 2004)

4.2.7 Tag um 9°C – höchstes Takten

Samstag, 22. Mai 2004

Die Aussentemperatur war an diesem Tag nahezu konstant um 9°C.

Auch die Raumtemperaturen war den ganzen Tag konstant um 22°C.

Die Wassererwärmung erfolgte zu den 4 programmierten Zeiten zu je einer Stunde. Damit lag die Warmwassertemperatur immer zwischen 47°C und 51°C.

Die Wärmepumpe taktet den ganzen Tag gleichmässig mit leicht variabler Pulsdauer und einer Pausenlänge von über 11 Minuten. Erst nach 22:00 Uhr sinkt die Pausenlänge, so dass die Wiedereinschaltverzögerung zum Eingriff kommt.

	Forderung	Resultat	Urteil
A	≤ 3 Starts/Std.	Vereinzelt knapp nicht erfüllt	☹
B	≤ 72 Starts/Tag	Mit 59 Starts/Tag am schlechtesten, aber erfüllt	☺
C	Puls ≥ 10 Min.	Pulsdauer immer um 10 Minuten	☹
D	Pause ≥ 10 Min	Wiedereinschaltverzögerung kommt nur selten zum Eingriff	☹

4.2.8 Resümee

Die Resultate der fünf untersuchten Fälle können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Forderung A (≤ 3 Starts/Std.) wird in wenigen Fällen knapp nicht erfüllt
- Die Forderung B (≤ 72 Starts/Tag) wird immer erfüllt
- Die Forderungen C (Puls ≥ 10 Min.) und D (Pause ≥ 10 Min) werden häufiger nicht erfüllt als die Forderung A

Dem kann das Folgende entgegen gehalten werden:

- Die seltene knappe Nichterfüllung der Forderung A ist in der Praxis bedeutungslos.
- Eine kurze Pulslänge bei kleiner Last hat in der Praxis kaum nachteilige Folgen; zudem ergibt sich durch die Totzeit der Regelstrecke eine natürliche Begrenzung bei etwa 5 Minuten (wird weiter hinten behandelt, siehe Abbildung 15).
- Eine zu kurze Pausenlänge kann hingegen ernsthafte technische Probleme ergeben, wenn sich die Arbeitsmittelseite nicht genügend «beruhigen» kann. Mit der Wiedereinschaltverzögerung kann dem jedoch – wie auf der Versuchsanlage geschehen – entgegen gewirkt werden.

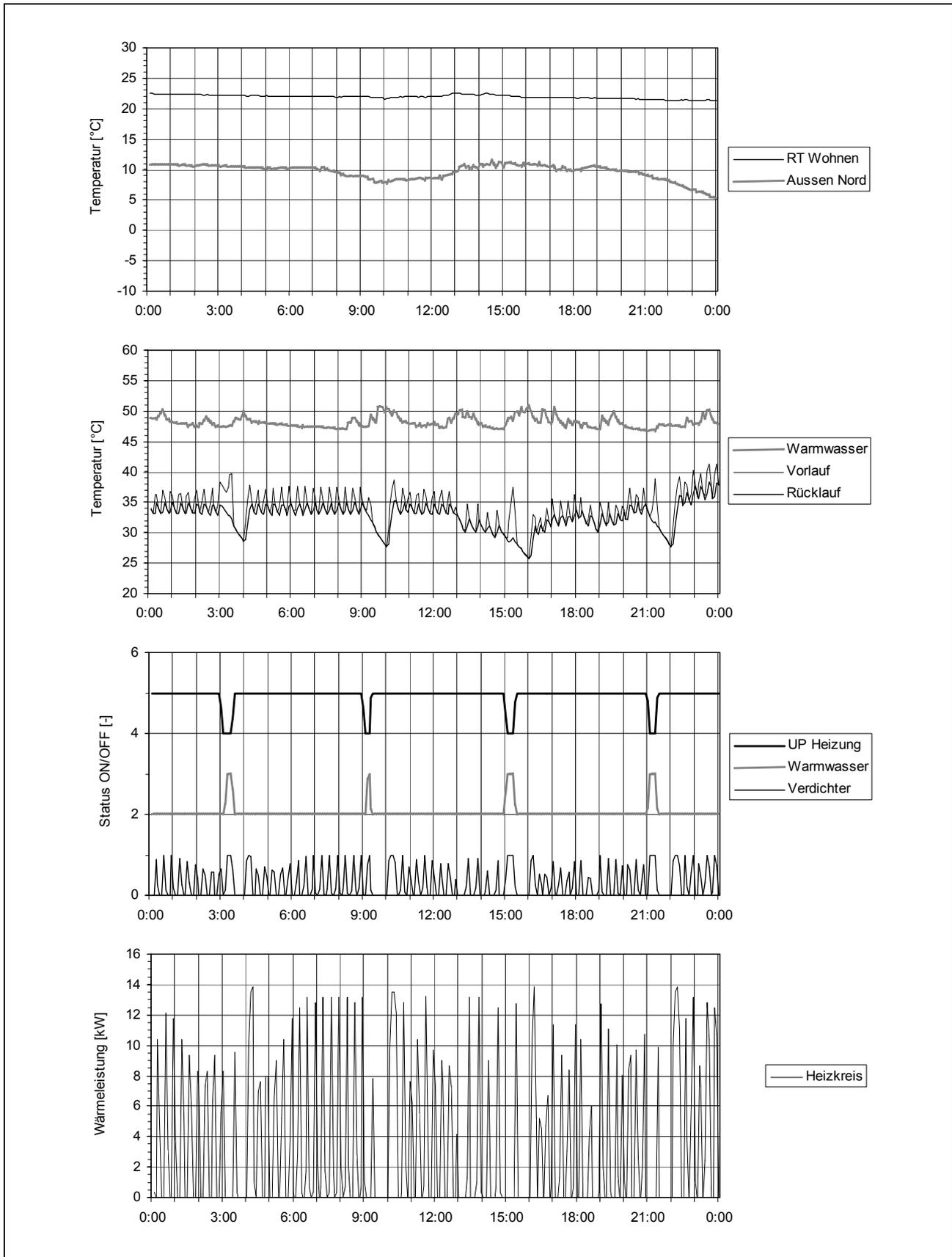


Abbildung 13: Tag mit Aussentemperatur um 9°C und dem höchsten Takten (Samstag, 22. Mai 2004)

4.3 Diskussion

4.3.1 Qualitativer Zusammenhang von Puls-, Pausen- und Periodendauer

Abbildung 14 zeigt die Puls-, Pausen- und Periodendauer in Abhängigkeit der Aussentemperatur (Tagesmittelwerte) wie sie im Betrieb an der Versuchsanlage auftraten.

Als erstes soll nun diskutiert werden, wie diese Kurven rein qualitativ beeinflusst werden können:

- Eine Vergrößerung der Hysterese schiebt alle Kurven nach oben.
- Eine Vergrößerung des Wasserinhaltes der Anlage durch einen Speicher bewirkt ebenfalls eine gleichzeitige Verlängerung von Puls-, Pausen- und Periodendauer.
- Eine Vergrößerung der Wärmepumpenleistung verkürzt die Pulsdauer und schiebt damit diese Kurve nach unten.
- Eine Auslegung der Wärmepumpenleistung auf beispielsweise -13°C anstatt -8°C Aussentemperatur hat zur Folge, dass die maximale Pulsdauer von 24 h (bei reinem Heizbetrieb) erst bei -13°C anstatt schon bei -8°C Aussentemperatur erreicht wird. Dies hat aber auch die nachteilige Auswirkung, dass die Pulsdauer in Richtung Heizgrenze kürzer wird.
- Eine Wiedereinschaltverzögerung der Wärmepumpe erzwingt eine minimale Pausendauer. An der Versuchsanlage war eine Wiedereinschaltverzögerung von 11 Minuten in Funktion (siehe Abschnitt 4.3.3 «Wiedereinschaltverzögerung»).
- Mit einer Ausschaltverzögerung der Wärmepumpe könnte noch zusätzlich eine minimale Pulsdauer erzwungen werden. An der Versuchsanlage war keine Ausschaltverzögerung in Funktion.

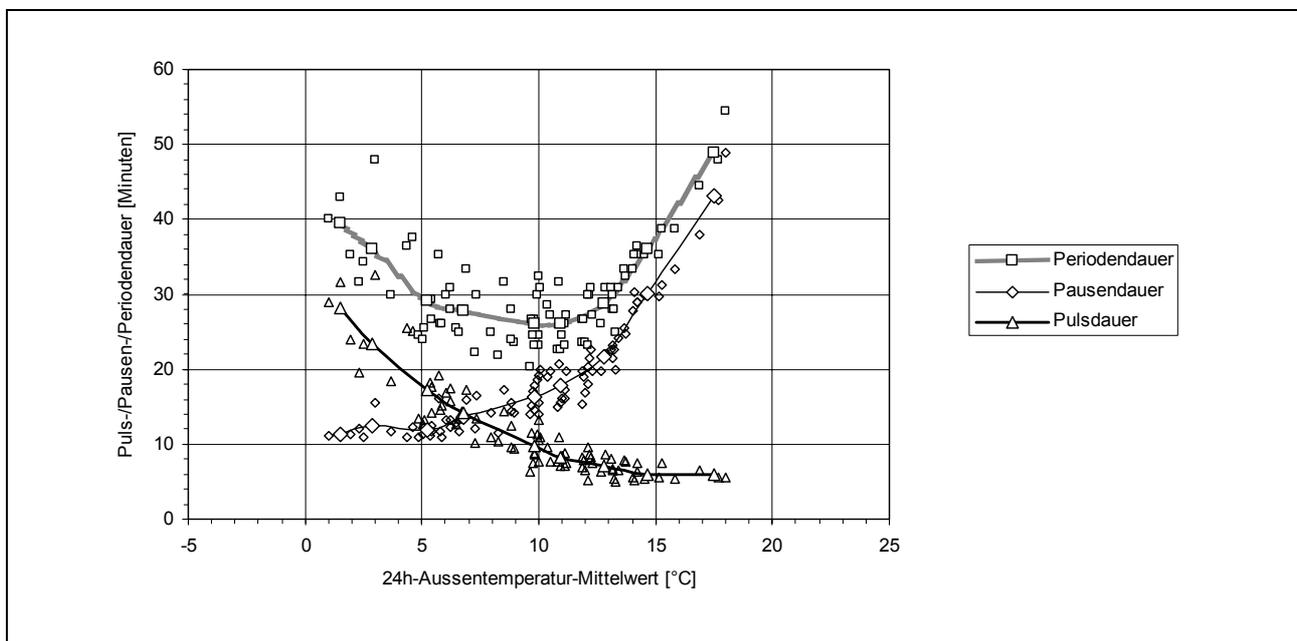


Abbildung 14: Puls-, Pausen- und Periodendauer in Abhängigkeit der Aussentemperatur (Tagesmittelwerte)

4.3.2 Theoretischer Zusammenhang von Puls-, Pausen- und Periodendauer

Der auf der Versuchsanlage eingesetzten Rücklauftemperaturregler war fix auf eine Hysterese (Schaltdifferenz) von 2 K eingestellt und konnte nicht verändert werden. Dies war insofern kein Nachteil, als dass in der Praxis kaum eine Wärmepumpenanlage mit einer kleineren Hysterese betrieben wird. Somit lief die Versuchsanlage bezüglich der Beeinflussung des Taktverhaltens durch die Hysterese praktisch unter Worst-case-Bedingungen.

Dies ist wichtig zu wissen, weil die Versuchsanlage einerseits eher zu knapp dimensioniert ist und andererseits mit Erdsonden als Wärmequelle arbeitet. Bei überdimensionierten Anlagen und/oder Anlagen mit Außenluft als Wärmequelle müsste im Bereich des höchsten Taktens (um 9°C Aussentemperatur) mit einer anderthalbfachen und im Extremfall bis zu doppelt so grossen Wärmeleistung der Wärmepumpe gerechnet werden.

Was bedeutet dies für die Verallgemeinerung der bisher gemachten Aussagen?

Allgemein kann die Aufheizkurve als Verzögerungsglied erster Ordnung beschrieben werden (siehe [9]):

$$x = X_h \left(1 - e^{-t/T_1}\right) + x_A$$

Die Abkühlkurve ergibt sich dann wie folgt:

$$x = X_h \cdot e^{-t/T_2} + x_A$$

Legende:

x = Regelgrösse (hier die Rücklauftemperatur)

t = Zeit

T_1 = Aufheiz-Zeitkonstante

T_2 = Abkühl-Zeitkonstante

x_A = Anfangstemperatur

x_E = Endtemperatur

$X_h = x_E - x_A$ = Stellwirkung

Dies ist der Temperaturverlauf, wenn kein Regler korrigierend eingreift. Der Zweipunktregler bewirkt nun aber, dass die Rücklauftemperatur entsprechend den beiden Kurven in einem durch den Regler begrenzten Bereich um den Sollwert schwankt.

Vereinfachend kann eine Regelstrecke höherer Ordnung als die Serienschaltung eines Totzeitgliedes mit der Totzeit T_t und eines Verzögerungsgliedes erster Ordnung mit der Zeitkonstante T beschrieben werden.

Aus den Messdaten konnten diese Grössen für die reale Regelstrecke abgeschätzt werden. Weil die Schwankungsbreite mit zunehmender Last ansteigt, muss die Aufheizzeitkonstante grösser sein als die Abkühlzeitkonstante (vergleiche dazu das Verhalten in Abbildung 15):

- Aufheizzeitkonstante T_1 ca. 30 Minuten
- Abkühlzeitkonstante T_2 ca. 20 Minuten
- Totzeit T_t ca. 5 Minuten (im Bereich des Aufzeichnungsintervalls)

In Abbildung 15 sind drei typische Fälle für unterschiedliche Last dargestellt:

(1) Taktverhalten bei mittlerer Last etwa entsprechend der Versuchsanlage:

Hysterese	2	K (36°C – 34°C)
Stellwirkung	30	K (50°C – 20°C)
Aufheizzeitkonstante	30	min
Abkühlzeitkonstante	20	min
Totzeit	3,3	min
Resultierende Pulsdauer	11,8	min
Resultierende Pausendauer	8,2	min
Resultierende Periodendauer	20	min

→ Die Schwankungsbreite ist grösser als die Hysterese

→ Der Sollwert liegt etwa in der Mitte

(2) Taktverhalten bei kleiner Last etwa entsprechend der Versuchsanlage

Hysterese	2	K (26°C – 24°C)
Stellwirkung	30	K (50°C – 20°C)
Aufheizzeitkonstante	30	min
Abkühlzeitkonstante	20	min
Totzeit	3,3	min
Resultierende Pulsdauer	6,8	min
Resultierende Pausendauer	19,2	min
Resultierende Periodendauer	26	min

→ Die Schwankungsbreite ist grösser als die Hysterese, aber insgesamt kleiner als bei (1)

→ Der Sollwert wird an den unteren Rand geschoben

(3) Taktverhalten bei grösserer Last etwa entsprechend der Versuchsanlage:

Hysterese	2	K (46°C – 44°C)
Stellwirkung	30	K (50°C – 20°C)
Aufheizzeitkonstante	30	min
Abkühlzeitkonstante	20	min
Totzeit	3,3	min
Resultierende Pulsdauer	30,8	min
Resultierende Pausendauer	5,7	min
Resultierende Periodendauer	36,5	min

→ Die Schwankungsbreite ist wesentlich grösser als die Hysterese und auch insgesamt ist sie grösser als bei (1)

→ Der Sollwert wird an den oberen Rand geschoben

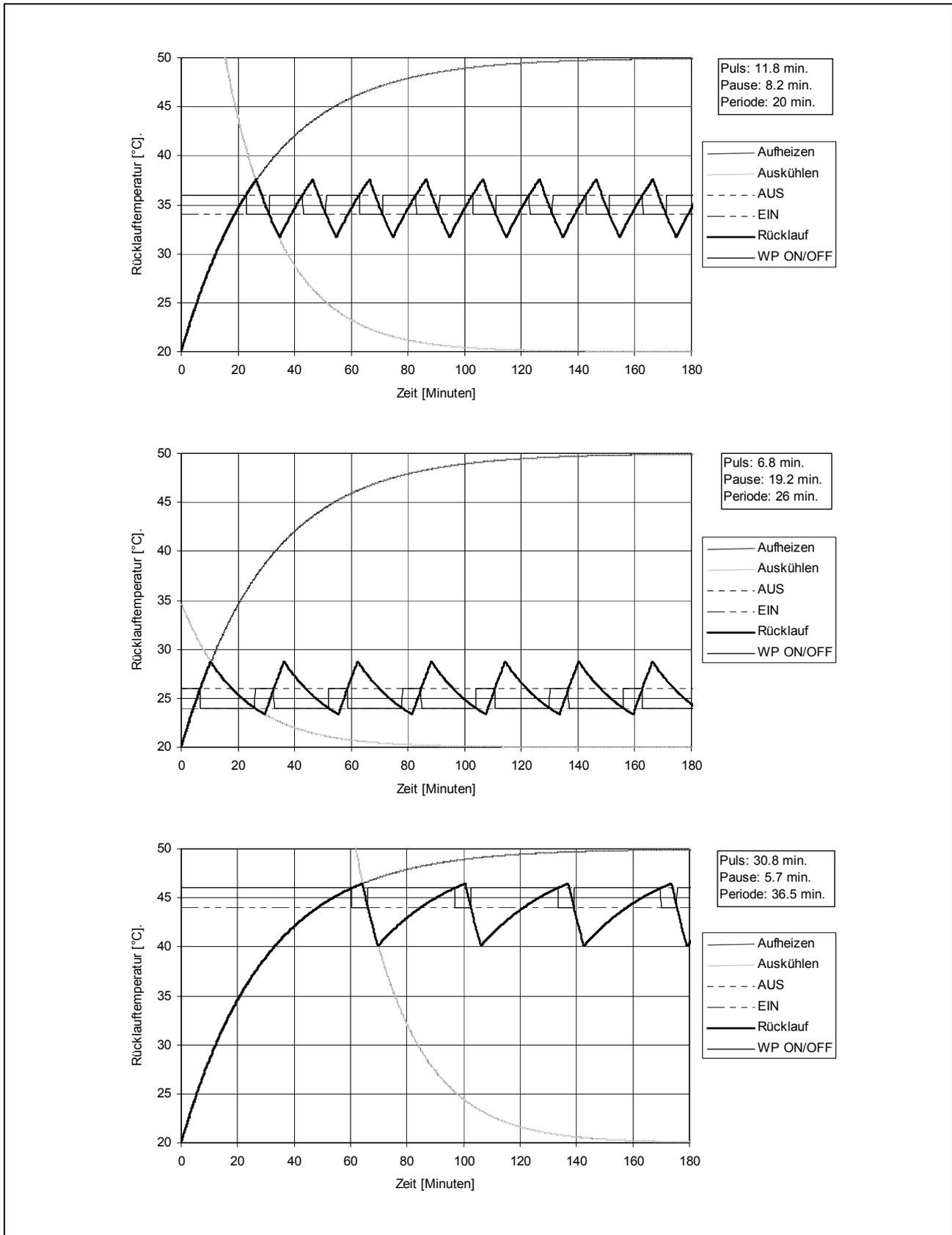


Abbildung 15: Zweipunktregelung der Rücklauftemperatur; Verhalten bei unterschiedlicher Last

In Abbildung 16 sind drei weitere typische Fälle dargestellt, wobei hier bei gleicher Last die Aufheizzeitkonstante und die Hysterese variiert wird:

(4) Taktverhalten bei mittlerer Last etwa entsprechend der Versuchsanlage:

Hysterese	2	K (36°C – 34°C)
Stellwirkung	30	K (50°C – 20°C)
Aufheizzeitkonstante	30	min
Abkühlzeitkonstante	20	min
Totzeit	3,3	min
Resultierende Pulsdauer	11,8	min
Resultierende Pausendauer	8,2	min
Resultierende Periodendauer	20	min

→ Identisch mit (1) in Abbildung 15

(5) Hypothetisches Taktverhalten der Versuchsanlage bei mittlerer Last mit halber Aufheizzeitkonstante (entspricht näherungsweise der doppelten Wärmepumpenleistung):

Hysterese	2	K (36°C – 34°C)
Stellwirkung	30	K (50°C – 20°C)
Aufheizzeitkonstante	15	min
Abkühlzeitkonstante	20	min
Totzeit	3,3	min
Resultierende Pulsdauer	7,7	min
Resultierende Pausendauer	9,7	min
Resultierende Periodendauer	17,4	min

→ Eine Halbierung der Aufheizzeitkonstante ergibt eine verhältnismässig geringe Verkürzung der Periodendauer um Faktor $17,4 / 20 = 0,87$

(6) Hypothetisches Taktverhalten der Versuchsanlage bei mittlerer Last mit halber Aufheizzeitkonstante (entspricht näherungsweise der doppelten Wärmepumpenleistung) und doppelter Hysterese:

Hysterese	4	K (37°C – 33°C)
Stellwirkung	30	K (50°C – 20°C)
Aufheizzeitkonstante	15	min
Abkühlzeitkonstante	20	min
Totzeit	3,3	min
Resultierende Pulsdauer	9,5	min
Resultierende Pausendauer	12	min
Resultierende Periodendauer	21,5	min

→ Eine Halbierung der Aufheizzeitkonstante verbunden mit einer Verdoppelung der Hysterese ergibt eine geringe Verlängerung der Periodendauer um Faktor $21,5 / 20 = 1,08$

Somit kann angenommen werden, dass bei überdimensionierten Anlagen und/oder Anlagen mit Aussenluft als Wärmequelle mit einer Verdoppelung der Hysterese auf 4 K eher ein besseres Taktverhalten erreicht werden kann als auf der Versuchsanlage. Für den zukünftigen Betrieb von Wärmepumpenanlagen mit Heizkörperheizung ohne Speicher muss deshalb gefordert werden, dass die Hysterese auch auf grössere Werte als 2 K einstellbar ist (z. B. einstellbar von 2 K bis 8 K).

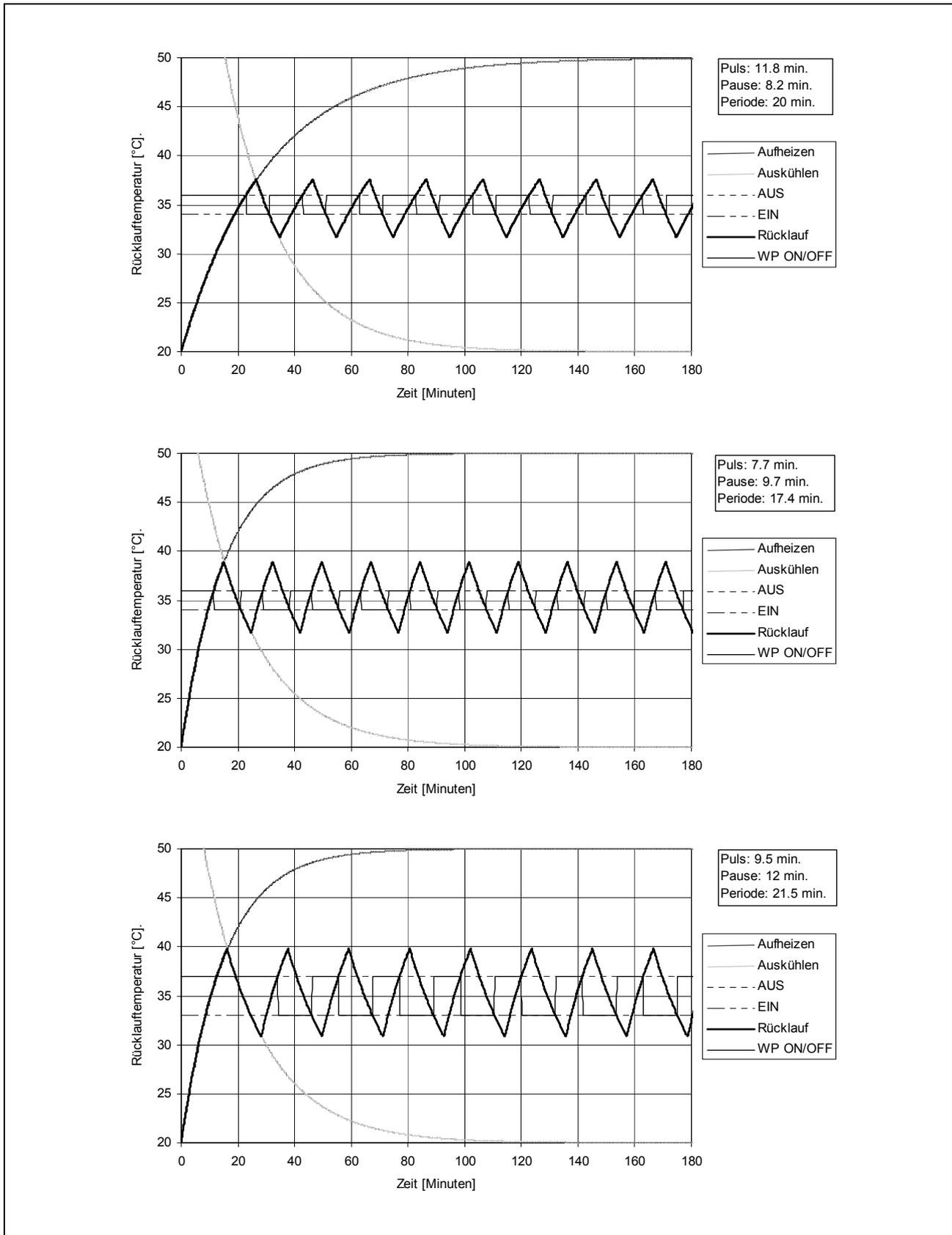


Abbildung 16: Zweipunktregelung der Rücklauftemperatur; Verhalten, wenn die Aufheizzeitkonstante und die Hysterese variiert wird

4.3.3 Wiedereinschaltverzögerung

Auf der Versuchsanlage war eine Wiedereinschaltverzögerung von 11 Minuten fix programmiert und konnte nicht beeinflusst werden. Dies ist in Abbildung 14 an der Begrenzung der Kurve für die Pausendauer bei 11 Minuten gut erkennbar. Die Wiedereinschaltverzögerung soll dafür sorgen, dass sich die Arbeitsmittelseite der Wärmepumpe «beruhigen» kann und so bei einer allzu schnellen Wiedereinschaltung der Verdichter nicht überlastet wird und keine Störung entstehen kann.

Was bedeutet dies für die Verallgemeinerung der bisher gemachten Aussagen?

Die Wiedereinschaltverzögerung beeinflusst das Regelverhalten und sollte deshalb möglichst wenig zum Eingriff kommen. Eine Beeinflussung über die Vergrößerung der Hysterese ist besser, weil dadurch ein kontinuierlicheres Regelverhalten erreicht werden kann. Eine Wiedereinschaltverzögerung von 5 Minuten sollte in der Regel genügen.

4.3.3 Thermostatventile

Die Versuchsanlage war in den südseitigen Räumen mit Thermostatventilen ausgerüstet. Diese waren so eingestellt, dass sie bei starkem Raumtemperaturanstieg infolge von Sonneneinstrahlung auch tatsächlich zum Eingriff kamen. Der Rücklauftemperaturregler war so eingestellt, dass sich unter normalen Bedingungen eine Raumtemperatur von 20...21°C ergab.

Simulationen von STASCH (siehe [1] und [2]) haben ergeben, dass sich bis 40% Thermostatventilanteil an der Heizfläche keine hydraulischen Probleme ergeben sollten. Der Thermostatventilanteil in der Versuchsanlage dürfte in der Grössenordnung dieses Wertes gelegen haben. Trotzdem reduzierte sich der Durchfluss der Gesamtanlage nie um mehr als etwa 10%. Diese kaum merkbare hydraulische Beeinflussung dürfte einerseits auf die optimale Einstellung des Rücklauftemperaturreglers zurückzuführen sein. Andererseits handelt es sich bei der Versuchsanlage um ein älteres Haus ohne übermässig grosse Fensterflächen.

4.3.4 Trockenraumheizung durch Unterkühlung

Die Versuchsanlage war mit einem Unterkühler zur Beheizung des Trockenraumes ausgerüstet (Abbildung 17). Dieser Unterkühler war während der gesamten Beobachtungsperiode in Betrieb. Deshalb sollte noch diskutiert werden, ob dadurch wirklich keine unzulässige Beeinflussung der Messresultate gegeben war.



Abbildung 17: Unterkühler zur Beheizung des Trockenraums

Eine unzulässige Beeinflussung kann dann ausgeschlossen werden, wenn der Unterkühler tatsächlich nur in einem Temperaturbereich zur Unterkühlung des Arbeitsmittels eingesetzt wurde, der nicht mehr zur Heizung genutzt werden konnte.

Abbildung 18 zeigt die Arbeitsmitteltemperaturen am 27. März 2004. Dies ist der gleiche Tag wie in Abbildung 9 dargestellt; die übrigen Messwerte (insbesondere die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen) können dort nachgesehen werden.

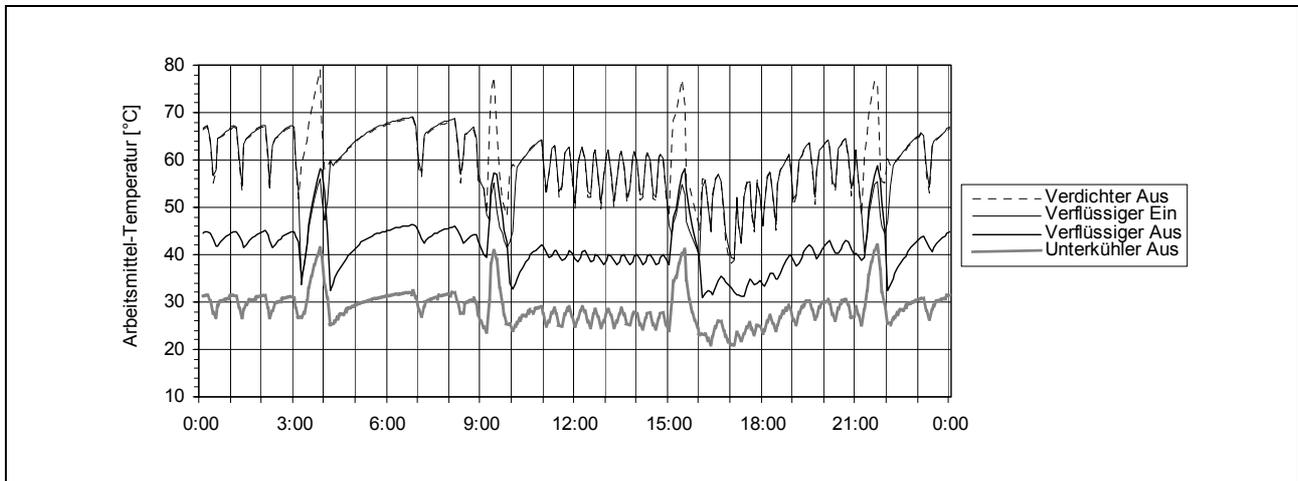


Abbildung 18: Trockenraumheizung durch Unterkühlung am 27. März 2004; Arbeitsmitteltemperaturen (übrige Temperaturen siehe Abbildung 9)

Als typische Kennwerte ergeben sich etwa für den Verflüssiger für die Heizung (kurz vor 03:00 Uhr):

- Primärseite (Arbeitsmittel) 67/45°C
- Sekundärseite (Heizung) 46/43°C

Und für den Unterkühler:

- Primärseite (Arbeitsmittel) 45/31°C
- Sekundärseite (Luft Trockenraum) unbekannt (Raumtemperatur unter 20°C)

Damit ergeben sich für den Verflüssiger Heizung folgende Temperaturdifferenzen:

- Grosse Temperaturdifferenz $67 - 46 = 21 \text{ K}$
- Kleine Temperaturdifferenz $45 - 43 = 2 \text{ K}$
- Logarithmische Temperaturdifferenz $(21 - 2) / \ln(21 / 2) = 8,1 \text{ K}$

Da nicht angenommen werden kann, dass die kleine Temperaturdifferenz noch unter 2 K gedrückt werden kann, ist die gestellte Forderung unter den hier gegebenen Randbedingungen erfüllt.

5. Empfehlungen

5.1 Wann geht es ohne Speicher?

Mit den Messungen konnte gezeigt werden, dass eine ganz bestimmte Versuchsanlage, nämlich die Erdsonden-Wärmepumpenanlage in Richigen, deren Wärmeabgabesystem eine Heizkörperheizung ist, ohne Speicher betrieben werden kann.

Im Weiteren wurde dann die Frage diskutiert, ob sich diese Aussage verallgemeinern lässt. Gilt die Aussage auch,

- wenn es sich um eine Aussenluft-Wärmepumpenanlage handelt,
- wenn die Anlage überdimensioniert ist,
- wenn die Heizkörperheizung aus Heizkörpern mit kleinerem Wasserinhalt besteht,
- wenn die witterungsgeführte Rücklauftemperaturregelung anders eingestellt wird,
- wenn mehr Thermostatventile im Eingriff sind usw.?

Auf der einen Seite zeigte sich, dass die Versuchsanlage bezüglich Hysterese unter Worst-case-Bedingungen betrieben wurde. Auf der anderen Seite zeigte sich aber auch, dass teilweise auch noch mit ungünstigeren Randbedingungen als auf der Versuchsanlage gerechnet werden muss:

- Bis zu doppelter Wärmeleistung infolge Überdimensionierung oder bei Aussenluft als Wärmequelle
- Keine Wiedereinschaltverzögerung, die korrigierend eingreift

Die Diskussion hat dann gezeigt, dass eine doppelt so grosse Wärmepumpenleistung durch eine Verdoppelung der Hysterese mehr als kompensiert werden kann. Im Falle der Versuchsanlage kann also davon ausgegangen werden, dass das Taktverhalten eher besser, aber sicher nicht schlechter würde,

- wenn die Wärmepumpenleistung bei 9°C Aussentemperatur doppelt so hoch würde (26 kW anstatt 13 kW)
- und dies durch eine doppelt so grosse Hysterese kompensiert würde (4 K anstatt 2 K), was bei dieser Anlage sicher problemlos möglich wäre.

5.2 Wann ist ein Speicher zwingend erforderlich?

In den folgenden Fällen geht es bestimmt nicht ohne Speicher:

- Wenn der Speicher zur hydraulischen Entkopplung gebraucht wird. Dies ist vor allem der Fall, wenn mehrere geregelte Heizgruppen mit Mischventilen angeschlossen werden müssen.
- Wenn die Anlage zu viele Thermostatventile hat. Die Forderung von STASCH (siehe [1] und [2]) «Thermostatventilanteil an der Heizfläche unter 40%» scheint zweckmässig.
- Aussenluft-Wärmepumpen gibt es mit Abtauung im Umkehrprozess. Das heisst, dass das Heizwasser als Wärmequelle für die Abtauung gebraucht wird. Es ist anzunehmen, dass dazu der geringe Wasserinhalt einer Heizkörperheizung nicht ausreicht.
- Fraglich sind wahrscheinlich auch Niedertemperatur-Heizkörperheizungen mit sehr tiefen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen und sogenannten «Niedertemperatur-Konvektoren» mit extrem kleinem Wasserinhalt. Eine übliche Heizkörperheizung weist etwa folgenden Wasserinhalt auf:

– Spezifischer Wasserinhalt (Heizkörper + Leitungen)	15 Liter/kW
– bei Übertemperatur (mittlere Heizwassertemperatur – Raumtemperatur)	30 K

5.3 Ergänzung zu den bisherigen STASCH-Empfehlungen

Zusammenfassend sind die Autoren der Meinung, dass folgende Empfehlungen in Ergänzung zu den bisherigen STASCH-Empfehlungen gemäss [1] und [2] abgegeben werden können:

Ergänzung zu den bisherigen STASCH-Empfehlungen [1] und [2]

Wärmepumpenanlagen mit einer Heizkörperheizung als Wärmeabgabesystem können ohne Speicher betrieben werden, wenn folgende Forderungen erfüllt sind:

- Sorgfältige Dimensionierung der Anlage gemäss STASCH, d. h. insbesondere keine unnötige Überdimensionierung der Wärmepumpe.
- Nur eine einzige Heizgruppe ohne Mischventil, d. h. es ist kein Speicher zur hydraulischen Entkopplung notwendig.
- Thermostatventilanteil an der Heizfläche unter 40%.
- Bei Aussenluft als Wärmequelle keine Abtaugung im Umkehrprozess.
- Spezifischer Wasserinhalt des Wärmeabgabesystems (Heizkörper + Leitungen) mindestens 15 Liter/kW, d. h. lamellierte Heizwände oder Radiatoren, aber keine sogenannten «Niedertemperatur-Konvektoren» mit extrem kleinem Wasserinhalt.
- Die Hysterese (Schaltdifferenz) des Rücklauftemperaturreglers soll auf 2 K bis 8 K einstellbar sein. Empfehlung: Grundeinstellung auf 4 K.
- Eine Wiedereinschaltverzögerung von 5 Minuten sollte in der Regel genügen. Eine Beeinflussung des Taktverhaltens über die Vergrösserung der Hysterese ist jedoch besser, weil dadurch ein kontinuierlicheres Regelverhalten erreicht werden kann.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer, Thomas Afjei: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen. Teil 1: STASCH-Planungshilfen. Bern: Bundesamt für Energie, 2002.
- [2] Thomas Afjei et. al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen. Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen. Bern: Bundesamt für Energie, 2002.
- [3] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer: Messdaten von sieben Wärmepumpenanlagen in der Schweiz. Bern: Bundesamt für Energie, 2004.
- [4] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer, Esfandiar Shafai, Roger Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 1. Bern: Bundesamt für Energie, 1999.
- [5] G. Reiner et al.: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Phase 1 bis 3: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation. Bern: Bundesamt für Energie, 1998.
- [6] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer, Esfandiar Shafai, Roger Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 2: Implementierung in handelsübliche Regler und Erprobung in einem Wohnhaus. Bern: Bundesamt für Energie, 2002.
- [7] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer, Juraj Cizmar, Erich Zahnd: Messungen an Retrofit-Wärmepumpen. Phase 2. Bern: Bundesamt für Energie, 2002.
- [8] Siedlung Chräbsbach, Oberseen, Haus Uetz. Messresultate des Pilot- und Demonstrationsprogrammes von Energie 2000. Aarau: Infoenergie, 1999.
- [9] Regelungstechnik in der Versorgungstechnik. Herausgegeben vom Arbeitskreis der Dozenten für Regelungstechnik. Karlsruhe: Müller, 1983.