



Schlussbericht 30. Juni 2009

Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung

Messungen an einer Anlage in Uttwil

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Gabathuler AG
(heute Mayer Ingenieur GmbH und Gabathuler Beratung GmbH)
Kirchgasse 23
CH-8253 Diessenhofen

Baumgartner & Partner AG
Bettlistrasse 35
CH-8600 Dübendorf

Autoren:

Hans Mayer, Gabathuler AG (heute Mayer Ingenieur GmbH)

mayer.gmbh@bluewin.ch

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG (heute Gabathuler Beratung GmbH)

gabathuler.gmbh@bluewin.ch

Thomas Baumgartner, Baumgartner & Partner AG

ba.baumgartner-partner@bluewin.ch

Versuchsanlage:

Die Autoren danken für die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen
Hanseatic Lloyd AG
Reederweg 6
CH-8592 Uttwil

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp, tkoppp@hsr.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152929 / 101494

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Ziel des Projekts ist es, Grundlagen zu erarbeiten, um Warmwasserbereitungen für Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Schulhäuser, Schwimmbäder, Hotels usw. – also Anlagen jeder Grösse – mit handelsüblichen Wärmepumpen, Wärmetauschern und Speichern zu planen, die sowohl im Winter- wie im Sommerbetrieb störungsfrei und energieeffizient arbeiten.

Bei Untersuchungen im Jahre 2007 konnten mit einem aussenliegenden Wärmetauscher und Stufenladung Warmwassertemperaturen von 54...57°C ohne Elektrozusatzheizung erzeugt und damit Arbeitszahlen von 3,15...3,33 realisiert werden.

Mit dem vorliegenden Projekt wurden nun an einer Versuchsanlage in Uttwil (Kanton Thurgau) die Möglichkeiten der Antilegionellen-Schaltung mit sekundärseitiger Laderegelung messtechnisch untersucht. Für die Messungen stand eine Wärmepumpe mit Scroll-Verdichter und Dampf-Zwischeneinspritzung zur Verfügung, die eine maximale Verflüssiger-Austrittstemperatur von 65°C ermöglicht.

Die Untersuchungen ergaben folgende Erkenntnisse:

- Bei Anlagen mit normalem Warmwasserverbrauch (z. B. Wohnungsbau) ergeben sich im unteren Teil des Speichers kalte Temperaturschichten. Hier ist deshalb eine Stufenladung auf etwa 57°C im Normalbetrieb günstiger. Damit können Arbeitszahlen um 3,33 erzielt werden (siehe Untersuchungen 2007).
- Bei Anlagen mit geringem Warmwasserverbrauch, bei denen die Abkühlung des Speichers vorwiegend durch die Zirkulation erfolgt (typisch für Bürogebäude), ist eine Schichtladung sinnvoller. Für Warmwassertemperaturen von 57°C ist eine Arbeitszahl um 2,6 und für Warmwassertemperaturen über 60°C eine Arbeitszahl um 2,5 realistisch.
- Die erste Empfehlung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) «ganzer Nutzinhalt innerhalb 24 Stunden mindestens einmal während einer Stunde auf mindestens 60°C» kann nur mit dem Antilegionellenbetrieb erfüllt werden.
- Die zweite Empfehlung des BAG «Temperatur im warm gehaltenen Teil des Verteilnetzes immer über 55°C» kann durch Antilegionellenbetrieb in Kombination mit einer Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60°C erfüllt werden. Die Temperaturdifferenz über der Zirkulation darf dabei nicht mehr als 5 K betragen und der Einschaltpunkt muss genügend hoch eingestellt werden.
- Die dritte Empfehlung des BAG «Temperatur an der Wasserentnahmestelle nicht unter 50°C» wird durch Antilegionellenbetrieb in Kombination mit Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60°C sicher erfüllt. Mit einer Stufen- oder Schichtladung auf 57°C kann die Empfehlung nur unter günstigen Verhältnissen knapp erfüllt werden.
- Fazit: Die Warmwasserbereitung mit einer Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung kann alle drei Antilegionellen-Empfehlungen des BAG erfüllen. Die sicherste Lösung ist ein Antilegionellenbetrieb in Kombination mit einer Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60°C.
- Ausreden wie «Wir wollen Energie sparen» oder «Andere halten die Vorschriften auch nicht ein» dürften im Schadenfall kaum juristischen Bestand haben. Schlussendlich ist immer der Besitzer oder Betreiber der Anlage verantwortlich. Um aber späteren Regressforderungen vorzubeugen, ist es für den Planer immer ratsam, die Risiken mit dem Auftraggeber sorgfältig abzuklären und entsprechende Massnahmen in die Planung einzubeziehen.

Abstract

The object of the project is to prepare basic documentation enabling domestic hot water heating systems to be designed for detached houses, apartment houses, school buildings, swimming pools, hotels, etc. – i.e. installations of any size – using regular commercial heat pumps, heat exchangers and storage tanks, having optimum energy performance and remaining fault-free both in winter and in summer operation.

Studies performed in 2007 demonstrated that domestic hot-water temperatures of 54 – 57°C could be achieved without auxiliary electrical heating using an external heat exchanger and with step charging, whereby seasonal performance factors of 3.15 to 3.33 were achieved.

In the present project, the advantages of anti-legionella circuits with storage control in the secondary circuit are investigated on a test installation in Uttwil (Canton of Thurgau) on the basis of measurement. The measurements were performed using a heat pump with scroll compressor and intermediate steam injection, enabling a maximum condenser exit temperature of 65°C to be achieved.

The following conclusions were reached in the studies:

■ For installations with normal domestic hot-water consumption (e.g. in residential buildings), cold water strata form in the lower part of the storage tank. In this case, therefore, step charging in normal operation up to a temperature of about 57°C is more advantageous. With this, seasonal performance factors of around 3.33 can be achieved (see 2007 studies).

■ For installations with only low domestic hot-water consumption, in which the temperature reduction in the storage tank is mainly due to the recirculation system (typical for office buildings), stratified charging is preferable. For a domestic hot-water temperature of 57°C, a seasonal performance factor of around 2.6 and for domestic hot-water temperatures above 60°C, a seasonal performance factor of 2.5 is more realistic.

■ The first recommendation of the Federal Office of Public Health (BAG), which is to «heat the entire useful contents of the tank at least once within 24 hours to at least 60°C over one hour», can only be fulfilled in anti-legionella operation.

■ The second recommendation of the BAG, which is «always to maintain the temperature in the hot portion of the distribution system to above 55°C», can be fulfilled in normal operation in anti-legionella operation in combination with stratified charging to a temperature above 60°C. The temperature difference over the recirculation loop must not exceed 5 K, and the switch-on point must be set sufficiently high.

■ The third recommendation of the BAG, which is to «avoid temperatures below 50°C at the water take-off position», is reliably fulfilled in normal operation with anti-legionella operation in combination with stratified charging up to a temperature above 60°C. With step or stratified charging up to a temperature of 57°C, the recommendation can only just be fulfilled under favourable conditions.

■ Final conclusions: domestic hot-water preparation using a heat pump, and with storage control in the secondary circuit, can fulfil all three anti-legionella recommendations of the BAG. The most reliable solution in normal operation is to use anti-legionella operation in combination with stratified charging up to a temperature above 60°C.

■ Excuses such as «we only wanted to save energy» or «neither do other people fulfil the regulations» would hardly carry legal weight in the case of a claim for damages. Finally, of course, the owner or operator of the installation is always liable. To forestall subsequent recourse claims, it is always advisable for the planner to carefully establish prior agreement with the owners and to integrate suitable measures in the planning process.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zielsetzung	7
1.1	Ausgangslage.....	7
1.2	Vorgehen.....	7
2.	Versuchsanlage.....	8
2.1	Evaluation der Versuchsanlage	8
2.2	Auslegungsdaten der Versuchsanlage	9
	Wärmepumpe.....	9
	Warmwasserspeicher.....	9
	Aussenliegender Wärmetauscher	9
3.	Regelkonzept	10
3.1	Voraussetzungen	10
3.2	Hydraulische Schaltung	12
3.3	Betriebsarten	12
	Normal-Ladebetrieb.....	12
	Antilegionellen-Ladebetrieb.....	12
	Spitzenlast-Ladebetrieb	13
	Niedertarif-Ladebetrieb	13
	Wochenend-Ladebetrieb.....	13
	Notbetrieb.....	13
4.	Messkonzept	14
5.	Resultate der Messungen	16
5.1	Inbetriebnahme und erste Optimierungsversuche	16
	Stufenladung nach der Inbetriebnahme.....	16
	Schichtladung nach der Inbetriebnahme	18
	Schichtladung – Optimierungsversuch durch den Ersteller der Anlage.....	20
	Schichtladung – gezielte Anpassung der Reglerparameter.....	22
5.2	Optimierte Ladevorgänge.....	24
	Stufenladung auf 57°C	24
	Schichtladung auf 57°C.....	26
	Schichtladung auf über 60°C	28
	Antilegionellenbetrieb	30
5.3	Typische Tagesverläufe	32
	Kombination Antilegionellenbetrieb mit Stufenladung auf 57°C	32
	Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf 57°C.....	34
	Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf über 60°C.....	36
	Antilegionellenbetrieb für erhöhte Anforderungen	38
5.4	Realer Wochenbetrieb für Bürogebäude	40
5.5	Spezielle Probleme	42
	Zirkulation.....	42
	Regelgrösse bei der Schichtladung	42
6.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	44
7.	Literaturhinweise	46

1. Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Mit dem Projekt «Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe» [1] [2] wurden Empfehlungen erarbeitet, mit dem Ziel, Warmwasserbereitungen für Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Schulhäuser, Schwimmbäder, Hotels usw. – also Anlagen jeder Grösse – mit handelsüblichen Wärmepumpen, Wärmetauschern und Speichern zu planen, die sowohl im Winter- wie im Sommerbetrieb störungsfrei und energieeffizient arbeiten.

Für die Messungen in [1] [2] standen Wärmepumpen mit Scroll-Verdichter und Dampf-Zwischeneinspritzung zur Verfügung, die eine maximale Verflüssiger-Austrittstemperatur von 65°C ermöglichten. Mit den durch die Versuchsanlage gegebenen Randbedingungen konnten einige für die Praxis aufschlussreiche Resultate publiziert werden, einige Fragestellungen konnten aber nur unvollständig oder gar nicht beantwortet werden.

Mit dem aussenliegenden Wärmetauscher und Stufenladung konnten Warmwassertemperaturen von 54...57°C ohne Elektrozusatzheizung erzeugt werden. Damit konnten Arbeitszahlen von 3,15...3.33 realisiert werden. Die wesentlichen Fragen der Stufenladung mit aussenliegendem Wärmetauscher konnten damit beantwortet werden.

Aufgrund der Messdaten der Stufenladung konnte berechnet werden, dass mit einer sekundärseitigen Laderegelung Temperaturen von über 60°C möglich sind, so dass auch Anti-Legionellen-Schaltungen ohne Elektrozusatzheizung realisiert werden können. Es blieben aber noch wichtige Fragen unbeantwortet:

- Wie zuverlässig funktioniert eine sekundärseitige Laderegelung tatsächlich in der Praxis?
- Wie kann eine optimale Arbeitszahl durch Kombination von Stufen- und Schichtladung erreicht werden?
- Welches ist das optimale Regelkonzept?

Das vorliegende Projekt soll diese Fragen klären.

1.2 Vorgehen

1. Es musste eine Versuchsanlage für das Messprojekt gefunden und für die Untersuchungen instrumentiert werden, die folgende Forderungen erfüllt:

- Wärmepumpe, die eine Verflüssigeraustrittstemperatur von 65°C ermöglicht
- Wassererwärmer mit aussenliegendem Wärmetauscher
- Sekundärseitige Laderegelung

2. Basierend auf den Untersuchungen im Projekt «Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe» [1] [2] wurde der Antilegionellen-Ladebetrieb mittels sekundärseitiger Laderegelung messtechnisch untersucht und die Fragen gemäss Abschnitt 1.1 (siehe oben) beantwortet.

3. Daraus wurden Empfehlungen erarbeitet, die folgende Forderungen erfüllen:

- Geeignete für die Planung von Warmwasserbereitungsanlagen in Einfamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern, Schulhäusern, Schwimmbädern, Hotels usw. – also Anlagen jeder Grösse
- Die Warmwasserbereitungsanlagen sollen sowohl im Winter- wie im Sommerbetrieb störungsfrei und energieeffizient arbeiten
- Die Warmwasserbereitungsanlagen sollen mit handelsüblichen Wärmepumpen, Wärmetauschern und Speichern geplant und realisiert werden können

2. Versuchsanlage

2.1 Evaluation der Versuchsanlage

Es wurden verschiedene mögliche Versuchsanlagen angeschaut. Dabei ergab sich, dass ein Neubau der Hanseatic Lloyd AG in Uttwil (Kanton St. Thurgau) die Forderungen bezüglich Baufortschritt, Steuerung/Regelung und Datenaufzeichnungsmöglichkeiten am besten erfüllte. Insbesondere hatte sich der Bauherr mit der Durchführung der Messungen einverstanden erklärt.

Einen Eindruck der gewählten Versuchsanlage gibt Abbildung 1 und Abbildung 2.

Die Warmwasserbereitungsanlage ist für eine weitere Etappe ausgelegt. Diese war zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht realisiert. Durch die damit verbundene bedeutend niedrigere Anzahl von Mitarbeitern entsprach die Auslastung der Anlage noch nicht den Planungswerten (insbesondere Küche und Kantine). Damit entsprach das Verhalten der Versuchsanlage einem typischen Bürogebäude mit geringem Warmwasserverbrauch und (im Vergleich zum Warmwasserverbrauch) hohen Zirkulationsverlusten. Durch die daraus resultierenden hohen Warmwassertemperaturen ist gerade diese Konfiguration besonders anspruchsvoll für eine Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe.



Abbildung 1: Übersicht Zentrale



Abbildung 2: Wärmepumpe (rechts) und aussenliegender Plattenwärmetauscher (links)

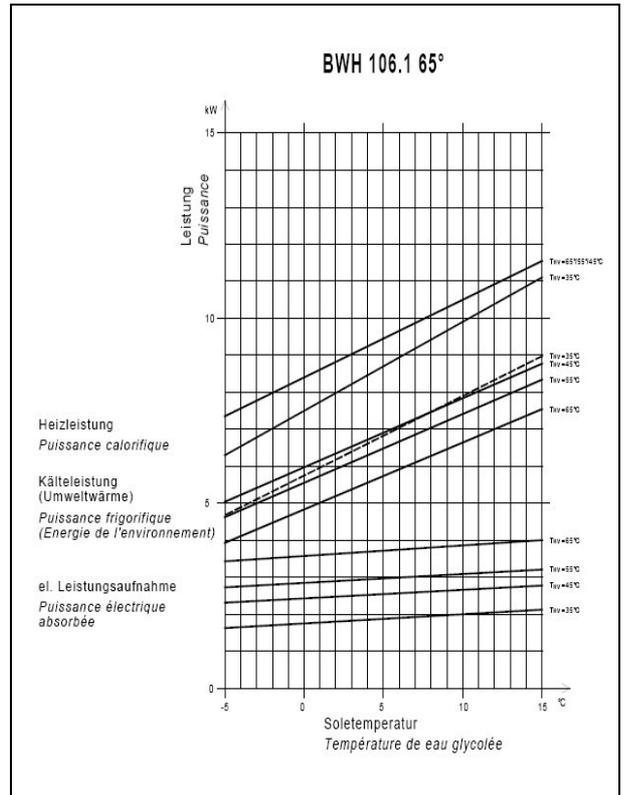


Abbildung 3: Datenblatt der Wärmepumpe (Quelle: SATAG)

2.2 Auslegungsdaten der Versuchsanlage

Wärmepumpe

Fabrikat	SATAG
Typ	BWH106.1 (Datenblatt siehe Abbildung 3)
Wärmequelle	Erdwärmesonden
Arbeitsmittel	R407C
Maximale Verflüssigeraustrittstemperatur	65°C bei 10 K Temperaturdifferenz über Verflüssiger (Scroll-Verdichter mit Dampf-Zwischeneinspritzung)
Heizleistung bei B0/W35	7,5 kW
Heizleistung bei B2/W65	8,8 kW
Heizleistung bei B15/W65	11,5 kW (zur Berechnung der spezifischen Wärmeaustauschfläche eingesetzt)

Warmwasserspeicher

Inhalt	800 dm ³
--------	---------------------

Aussenliegender Wärmetauscher

Bauart	Plattenwärmetauscher
Wärmeaustauschfläche	3,6 m ²
Spezifische Wärmeaustauschfläche	0,31 m ² /kW
Empfehlung STASCH [4] [5]	0,30 m ² /kW

3. Regelkonzept

3.1 Voraussetzungen

Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) gibt in «Legionellen und Legionellose – Modul 12 Sanitäre Installationen» [3] für «mittleres Risiko» folgende Empfehlungen:

1. *[Der ganze Nutzinhalt des Speichers] muss in der Regel innerhalb 24 Stunden mindestens einmal während einer Stunde auf mindestens 60°C aufgeheizt werden.*
2. *Die Auslegung der Sanitäreanlage erfolgt so, dass die Temperatur im warm gehaltenen Teil des Verteilnetzes (also ohne die Anschlussleitungen) immer über 55 °C liegt.*
3. *Damit wird in der Praxis gewährleistet, dass die Temperatur an der Wasserentnahmestelle nicht unter 50°C fällt*

Die Einhaltung der Empfehlungen des Bundesamtes für Gesundheit ist mit einer üblichen Wärmepumpe mit einer maximalen Verflüssiger-Austrittstemperatur von 55°C nicht realisierbar. Wie weit die Empfehlungen mit einer Wärmepumpe mit einer maximalen Verflüssiger-Austrittstemperatur von 65°C realisierbar sind, wurde 2007 in [1] [2] untersucht. Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der Messresultate dieser Untersuchungen.

Variante →	1	2	3	4	5
Schaltung gemäss Abbildung 5	A1	A2	A2	A2	A2
Spezifische Wärmeaustauschfläche [m ² /kW] (Empfehlung STASCH)	0,17 (0,30)	0,32 (0,15)	0,16 (0,15)	0,16 (0,15)	0,16 (0,15)
Maximale Verflüssiger-Austrittstemperatur [°C]	63	63	63	63	66
Temperaturdifferenz Primärseite [K]	6	6	7	10	10
Temperaturdifferenz Sekundärseite [K]	–	6	9	15	15
Warmwassertemperatur [°C]	51	57	55	53	56
Arbeitszahl [-]	3,16	3,33	3,29	3,33	3,15
Elektroverbrauch [%]	105	100	101	100	106

Tabelle 4: Zusammenfassung der wichtigsten Messresultate der Untersuchungen 2007 in [1] [2]. Die Temperaturen und Temperaturdifferenzen sind gerundet.

Grundsätzlich sind zur Wassererwärmung mit einer Wärmepumpe die 3 Grundsaltungen gemäss Abbildung 5 möglich. In [1] [2] wurden nur die Grundsaltungen A1 und A2 tatsächlich an einer realisierten Anlage messtechnisch untersucht, während Grundsaltung A3 nur theoretisch abgehandelt wurde.

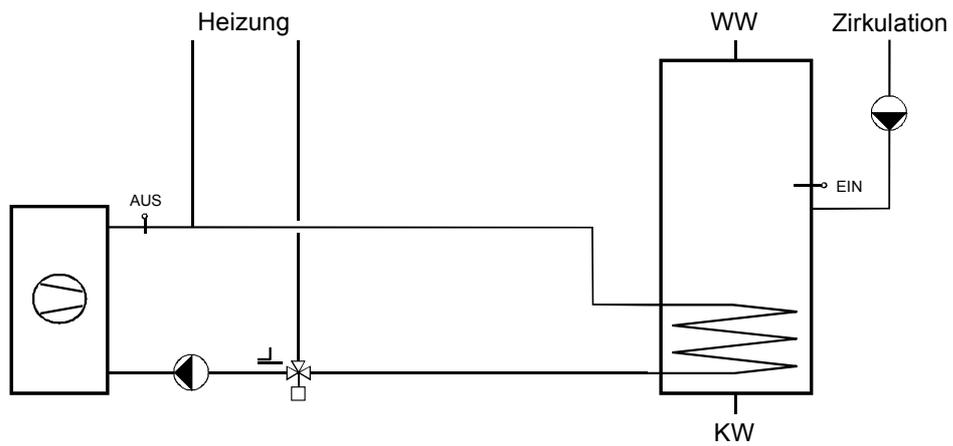
Empfehlung 1 des BAG konnte in keiner der messtechnisch untersuchten Varianten gemäss Tabelle 4 erfüllt werden. Bei den Grundsaltungen A1 und A2 ist also immer eine elektrische Zusatzheizung erforderlich.

Für die Einhaltung von **Empfehlung 2 des BAG** ist neben der Warmwassertemperatur auch das Zirkulationssystem zu berücksichtigen. Unter der Annahme einer Temperaturdifferenz über der Zirkulation von 5 K kann die Empfehlung 2 von keiner Variante erfüllt werden.

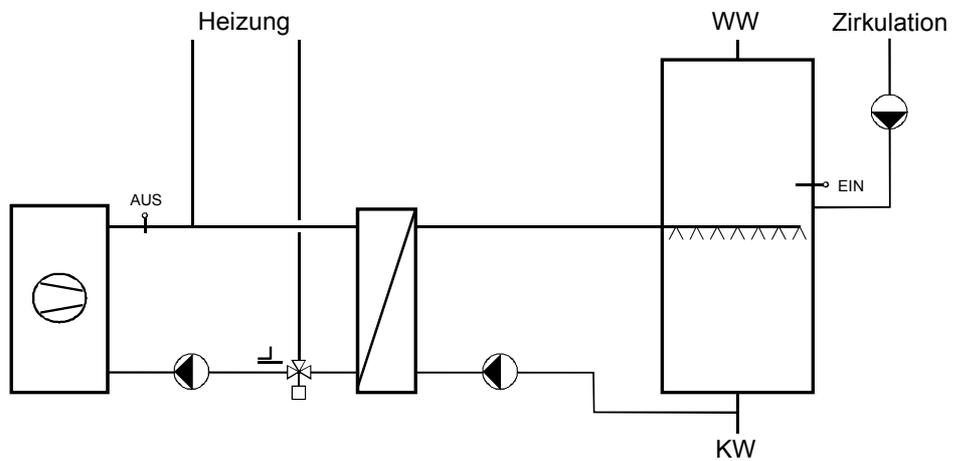
Die Varianten 2, 3 und 5 mit Warmwassertemperaturen von 55...57°C würden **Empfehlung 3 des BAG** «Temperatur an der Wasserentnahmestelle nicht unter 50°C» vielleicht unter günstigen Verhältnissen knapp erfüllen.

Im vorliegenden Projekt soll jetzt an einer tatsächlich realisierten Anlage untersucht werden, ob und wie weit mit einer sekundärseitigen Laderegelung (Grundsaltung A3 in Abbildung 5) die Empfehlungen des Bundesamtes für Gesundheit erfüllt werden können.

A1 mit Zwischenkreis über innenliegenden Wärmetauscher



A2 mit Zwischenkreis über aussenliegenden Wärmetauscher – Stufenladung



A3 mit Zwischenkreis über aussenliegenden Wärmetauscher – Schichtladung mit sekundärseitiger Laderegelung

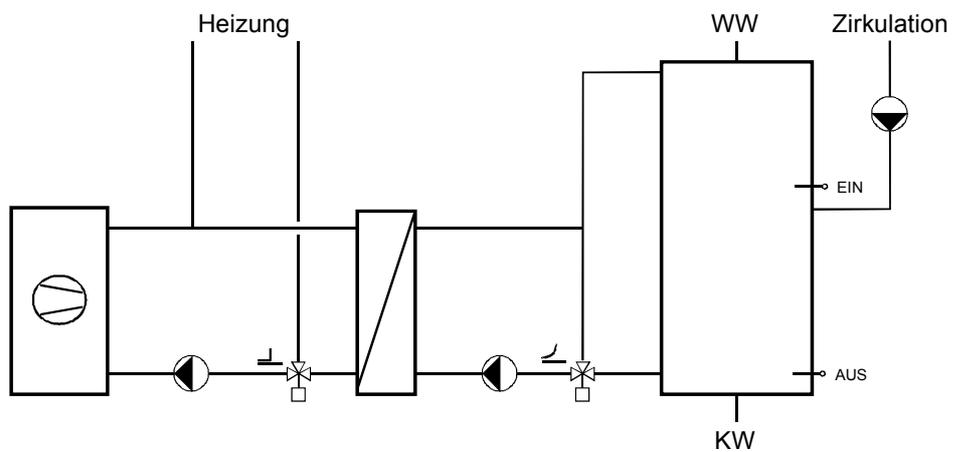


Abbildung 5: Grundsaltungen A1...A3 zur Raumheizung und Warmwasserbereitung über einen einzigen Verflüssiger

Spitzenlast-Ladebetrieb

Schichtladung mit dem maximalen oder einem reduzierten Ladetemperatur-Sollwert. Im Unterschied zum Antilegionellen-Ladebetrieb wird dabei der Speicher nicht vollständig durchgeladen.

Niedertarif-Ladebetrieb

Vollständiges Füllen des Speichers frühmorgens im Niedertarif mit Stufenladung.

Wochenend-Ladebetrieb

Temperaturhaltung mittels Stufenladung und tieferen Schaltpunkten.

Notbetrieb

Bei Ausfall der Wärmepumpe ist für den Notbetrieb ein Elektroheizeinsatz zur Warmwasserladung im oberen Drittel des Speichers vorgesehen. Dieser Elektroheizeinsatz muss mittels Handschalter freigegeben werden.

4. Messkonzept

Zur Überwachung und Betriebsoptimierung ist ein Leitsystem vorhanden. Ursprünglich war deshalb vorgesehen gewesen, die Datenaufzeichnung über dieses System zu realisieren. Um die geforderte Genauigkeit der Daten und um einen genügend dichten Aufzeichnungsintervall zu erhalten, zeigte sich jedoch, dass die Datenerfassung mit eigenen Fühlern und mit autonomen Datenlogger einfacher zu realisieren und zu kontrollieren war.

Alle Messwerte wurden im 10-Sekunden-Intervall erfasst, und aufgezeichnet wurden dann die daraus berechneten 1-Minuten-Mittelwerte.

Die vollständige Messstellenliste zeigt Tabelle 7. Die Nummern in der ersten Spalte beziehen sich auf die Positionierung der Fühler in Abbildung 8 und Abbildung 9.

Wichtiger Hinweis: Die Elektrizitätsmessung umfasst die Wärmequellenförderung, den Verdichter sowie die Umwälzpumpen UP2 und UP3 (Abbildung 8), aber nicht die Steuerung/Regelung (9 Watt). Dies gilt auch für die daraus berechneten Leistungszahlen (Momentanwert) und Arbeitszahlen (Wert über eine definierte Beobachtungszeit).

Nr.	Messgröße	Messort	Kanal	Kurzname	Messbereich	Messsignal
1	Temperatur	Wärmepumpe Verflüssiger-Austritt	1-2	Verfl.-Austr.	-35...+125°C	Pt 1000
2	Temperatur	Wärmepumpe Verflüssiger-Eintritt	1-3	Verfl.-Eintr.	-35...+125°C	Pt 1000
3	Temperatur	Wärmetauscher sekundärseitig Austritt	1-4	WT sek. Austr.	-35...+125°C	Pt 1000
4	Temperatur	Wärmetauscher sekundärseitig Eintritt	1-5	WT sek. Eintr.	-35...+125°C	Pt 1000
5	Temperatur	Ladekreis Speicher-Eintritt oben (Schichtladung)	1-6	LKEin Sp oben	-35...+125°C	Pt 1000
6	Temperatur	Ladekreis Speicher-Eintritt mitte (Stufenladung)	1-7	LKEin Sp mitte	-35...+125°C	Pt 1000
7	Temperatur	Ladekreis Speicher-Austritt unten	1-8	LKAus Sp unten	-35...+125°C	Pt 1000
8	Temperatur	Warmwasser Speicher-Austritt	1-11	WW-Austritt	-35...+125°C	Pt 1000
9	Temperatur	Zirkulation Speicher-Eintritt	1-9	Zirkulation	-35...+125°C	Pt 1000
10	Temperatur	Kaltwasser Speicher-Eintritt	1-10	Kaltwasser	-35...+125°C	Pt 1000
11	Temperatur	Speicher oben	1-12	Oben	-35...+125°C	Ni 1000
12	Temperatur	Speicher 2/3 Höhe	1-13	2/3 Höhe	-35...+125°C	Ni 1000
13	Temperatur	Speicher 1/3 Höhe	1-14	1/3 Höhe	-35...+125°C	Ni 1000
14	Temperatur	Speicher unten	1-15	Unten	-35...+125°C	Ni 1000
15	Temperatur	Wärmepumpe Verdampfer-Eintritt	1-1	Verd.-Eintr.	-35...+125°C	Pt 1000
16	Steuer-/Regelung	Ventil V1 auf Speicher oben (Umstellventil)	2-2	Umstellventil V1	0...5'	24 VDC
17	Steuer-/Regelung	Ventil V2 (Regelventil des Ladereglers)	2-1	Regelventil V2	0...100%	2...10 VDC
18	Druck	Wärmepumpe Niederdruck (ND)	1-21	WP ND	0...18 bar	4...20 mA
19	Druck	Wärmepumpe Hochdruck (HD)	1-22	WP HD	0...30 bar	4...20 mA
20	Wärme ¹⁾	Wärmepumpe	1-31	WP Wärme	max. 25 kW	10 Wh/Imp. (max. 7 Hz)
21	Elektrizität ²⁾	Wärmepumpe	2-37	WP Elektro	max. 10 kW	1 Wh/Imp. (max. 3 Hz)
22	Betriebsstunden	UP1 - Zirkulationspumpe	2-4	Zirkulation UP-4	0...5'	24 VDC
23	Betriebsstunden	UP3 - Wärmetauscher sekundärseitig	2-3	WT sek. UP-3	0...5'	24 VDC
24	Betriebsstunden	Wärmepumpe Verdichter	1-34	WP Verdichter	0...5'	230 VAC

¹⁾ Wärmehähler mit Impulsausgang für Energie

²⁾ Elektrozähler (Privatzähler) mit Impulsausgang für Energie

Tabelle 7: Messstellenliste Daten-Logger

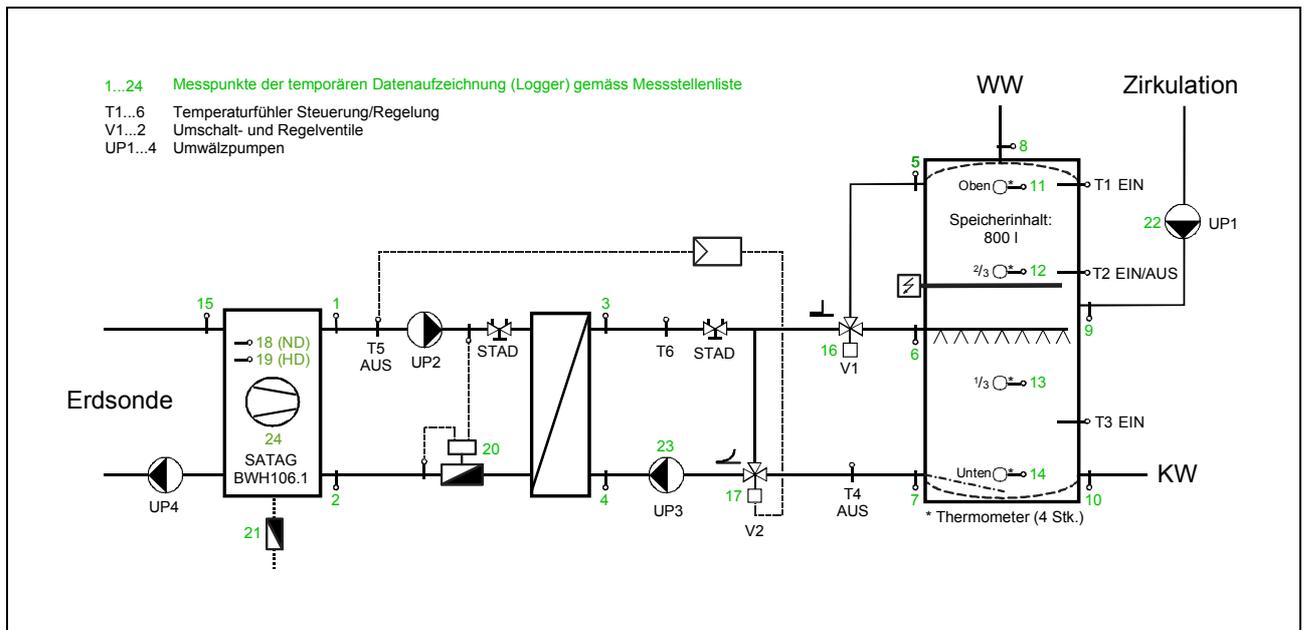


Abbildung 8: Prinzipschema zur Messstellenliste

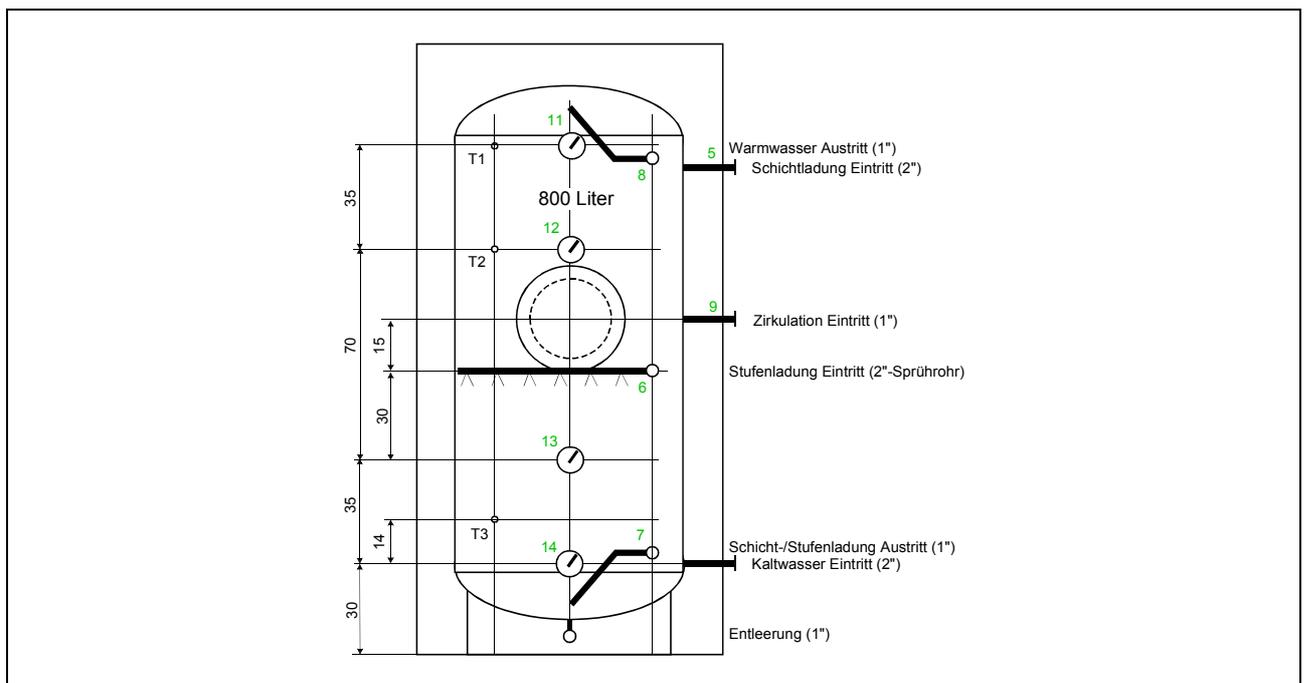


Abbildung 9: Warmwasserspeicher mit Messstellen gemäss Messstellenliste

5. Resultate der Messungen

5.1 Inbetriebnahme und erste Optimierungsversuche

Hier werden die Messdaten der Ladevorgänge für Stufenladung und Schichtladung vorgestellt, wie sie bei der Inbetriebnahme angetroffen wurden. Erste Optimierungsversuche durch den Ersteller der Anlage führten noch nicht zum gewünschten Erfolg. Erst eine gezielte Optimierung der Reglerparameter des PID-Reglers führte zu einem einigermaßen brauchbaren Resultat.

Stufenladung nach der Inbetriebnahme

Datum der Messung	24.10.2008
Art der Ladung	Stufenladung (Voll-Ladung des Speichers)
Ladung EIN	T2 < 50°C
Ladung AUS	T5 > 61,5°C
Speichertemperatur am Ende der Ladung	54,5...53,0°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,45 (Momentanwert 2,5...2,4)

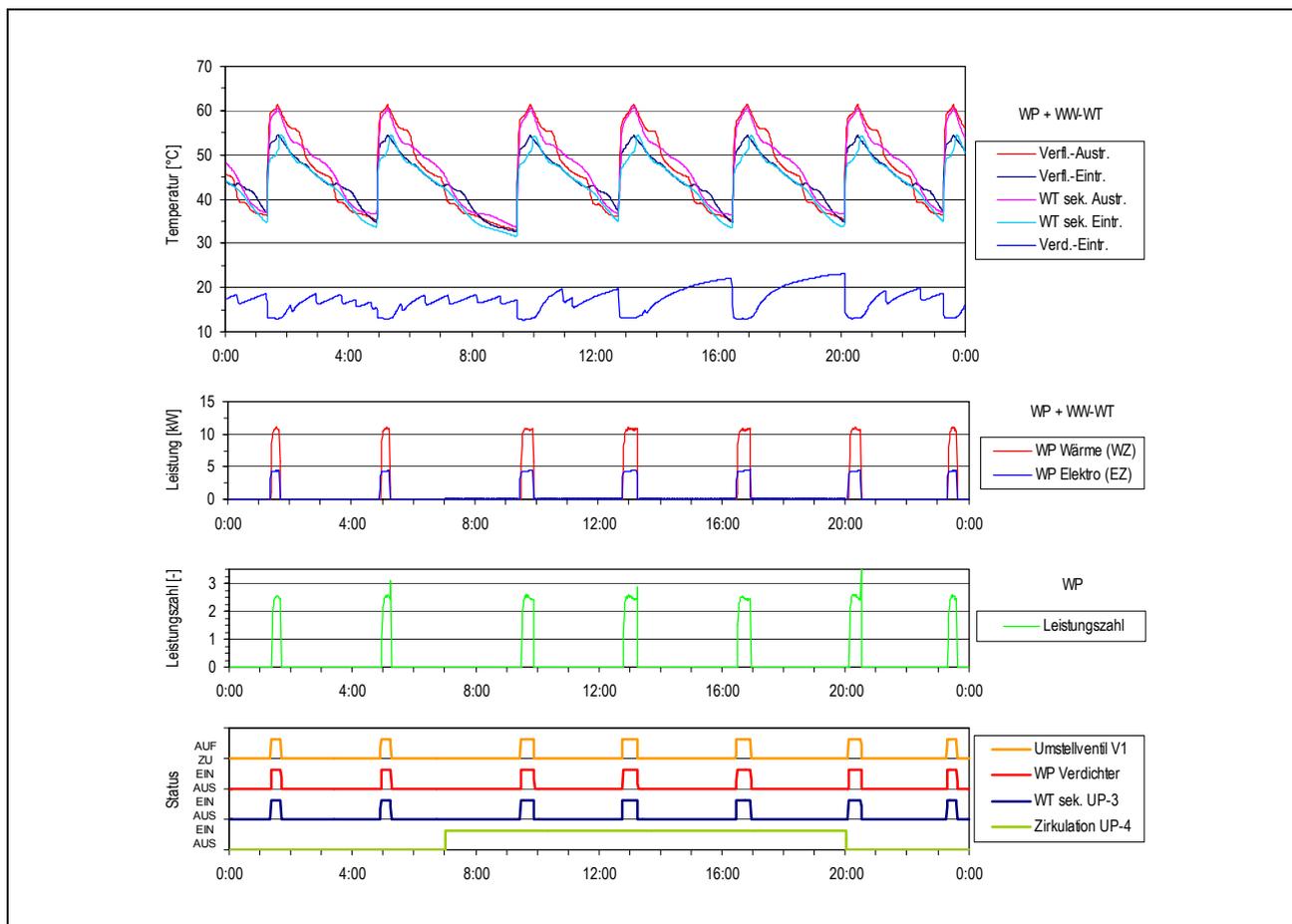


Abbildung 10: Stufenladung am 24.10.2008 nach der Inbetriebnahme (Teil 1); Hinweis: hier fehlen noch die Arbeitsmitteldrücke, weil die Druckfühler noch nicht installiert waren

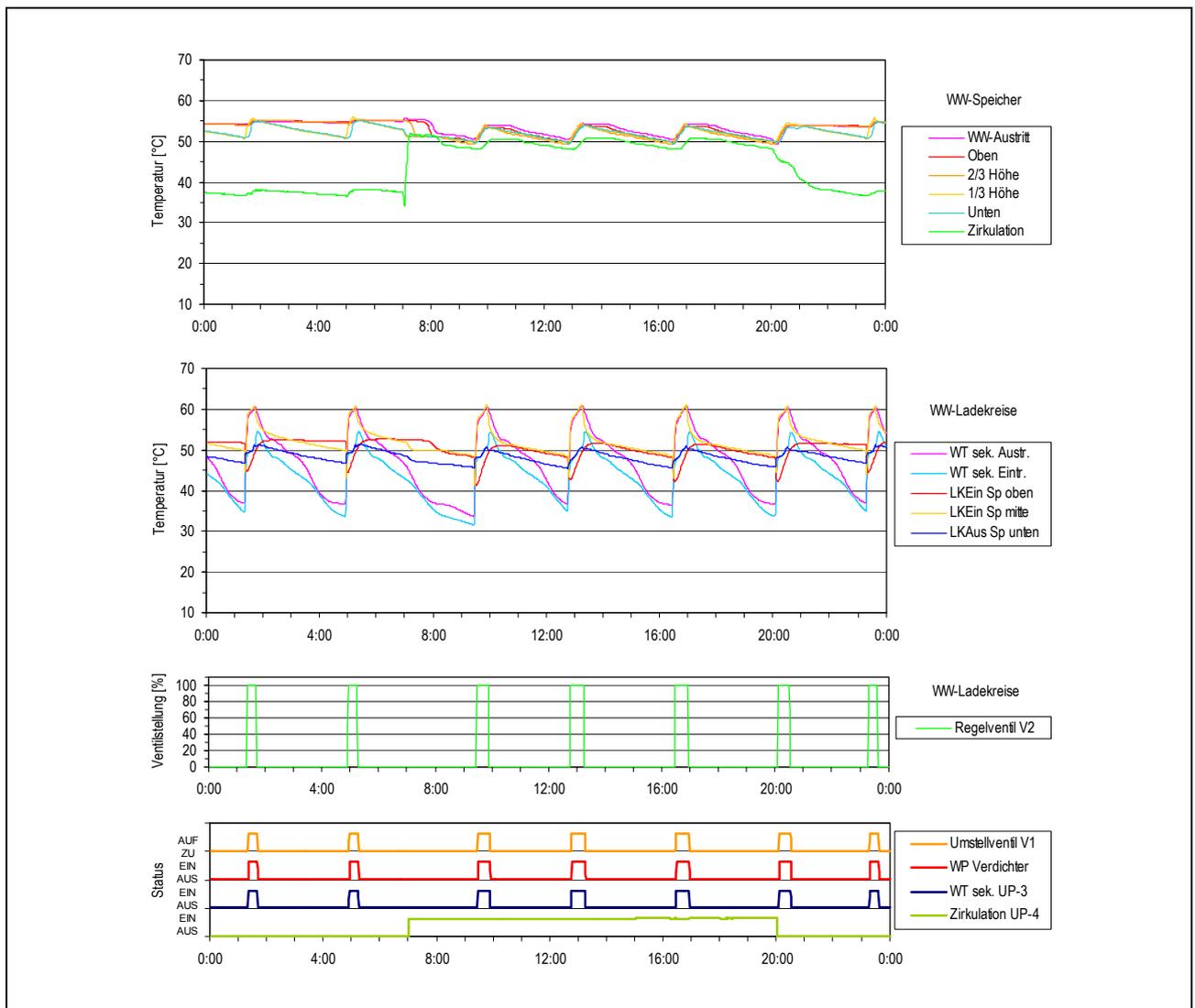


Abbildung 11: Stufenladung am 24.10.2008 nach der Inbetriebnahme (Teil 2)

In Abbildung 10 und Abbildung 11 ist dokumentiert, wie der Ersteller der Anlage die Stufenladung bei der Inbetriebnahme eingestellt hatte:

- Obwohl die Verflüssigeraustrittstemperatur auf über 61,5°C ansteigt, kommt die Warmwassertemperatur nur auf maximal 54,5°C
- Mit 7 mal pro Tag wird die Wärmepumpe relativ häufig ein- und ausgeschaltet

Fazit: Mit dieser Einstellung für die Stufenladung würden viele Anlagen für die ganze Lebensdauer der Anlage weiterbetrieben, weil die Warmwassertemperatur für den Benutzer immer befriedigend hoch ist und auch die Gefahr einer Hochdruckstörung gering ist. Eine sorgfältige Betriebsoptimierung ist also immer notwendig!

Schichtladung nach der Inbetriebnahme

Datum der Messung	7.11.2008
Art der Ladung	Schichtladung (Teilladung des Speichers)
Regelgröße	T6 (sekundäre Austrittstemperatur Wärmetauscher)*
Sollwert	55°C
Ladung EIN	T1 < 47,5°C*
Ladung AUS	T2 > 54°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	55,5...45°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,45

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

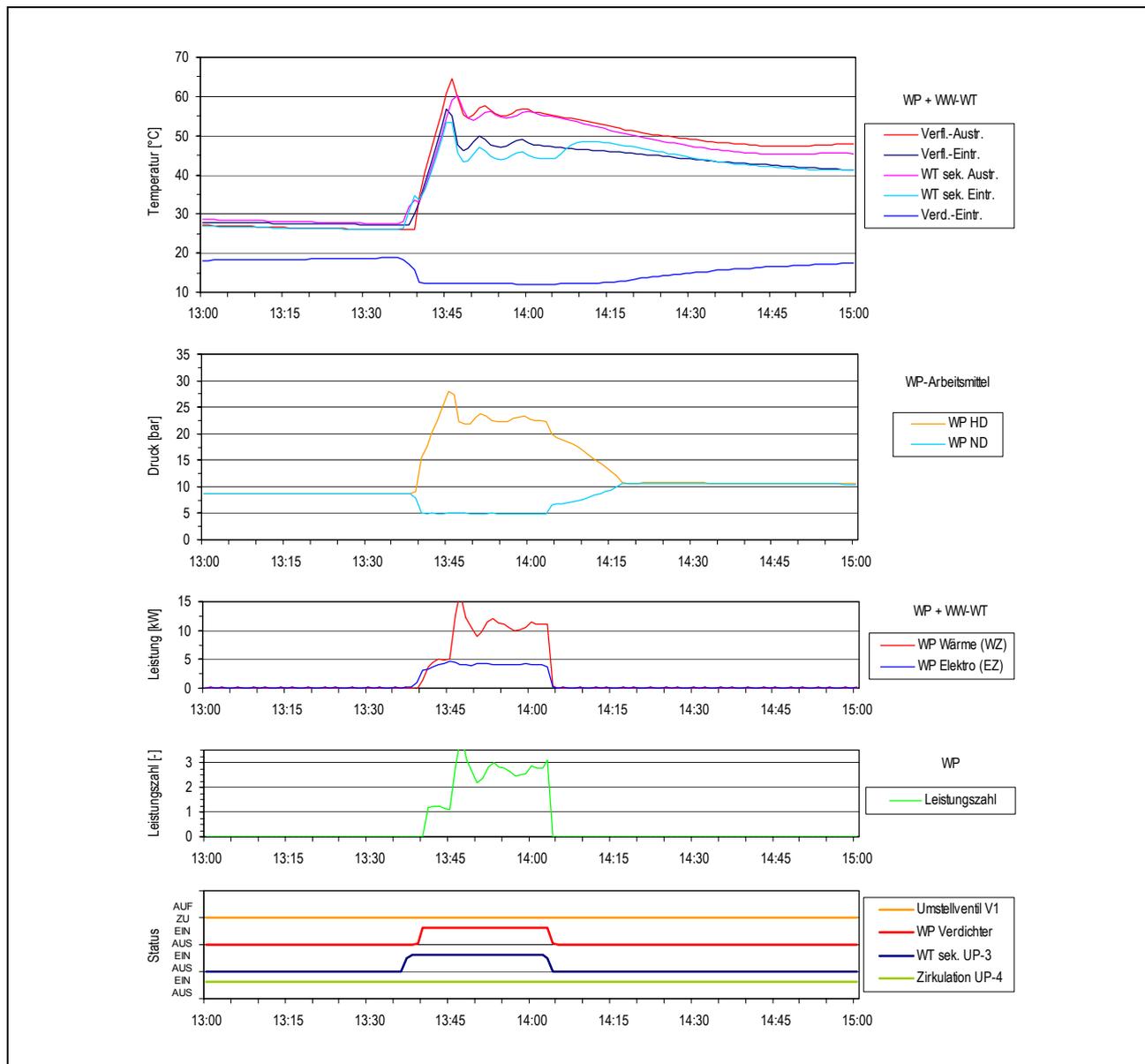


Abbildung 12: Schichtladung am 7.11.2008 nach der Inbetriebnahme (Teil 1)

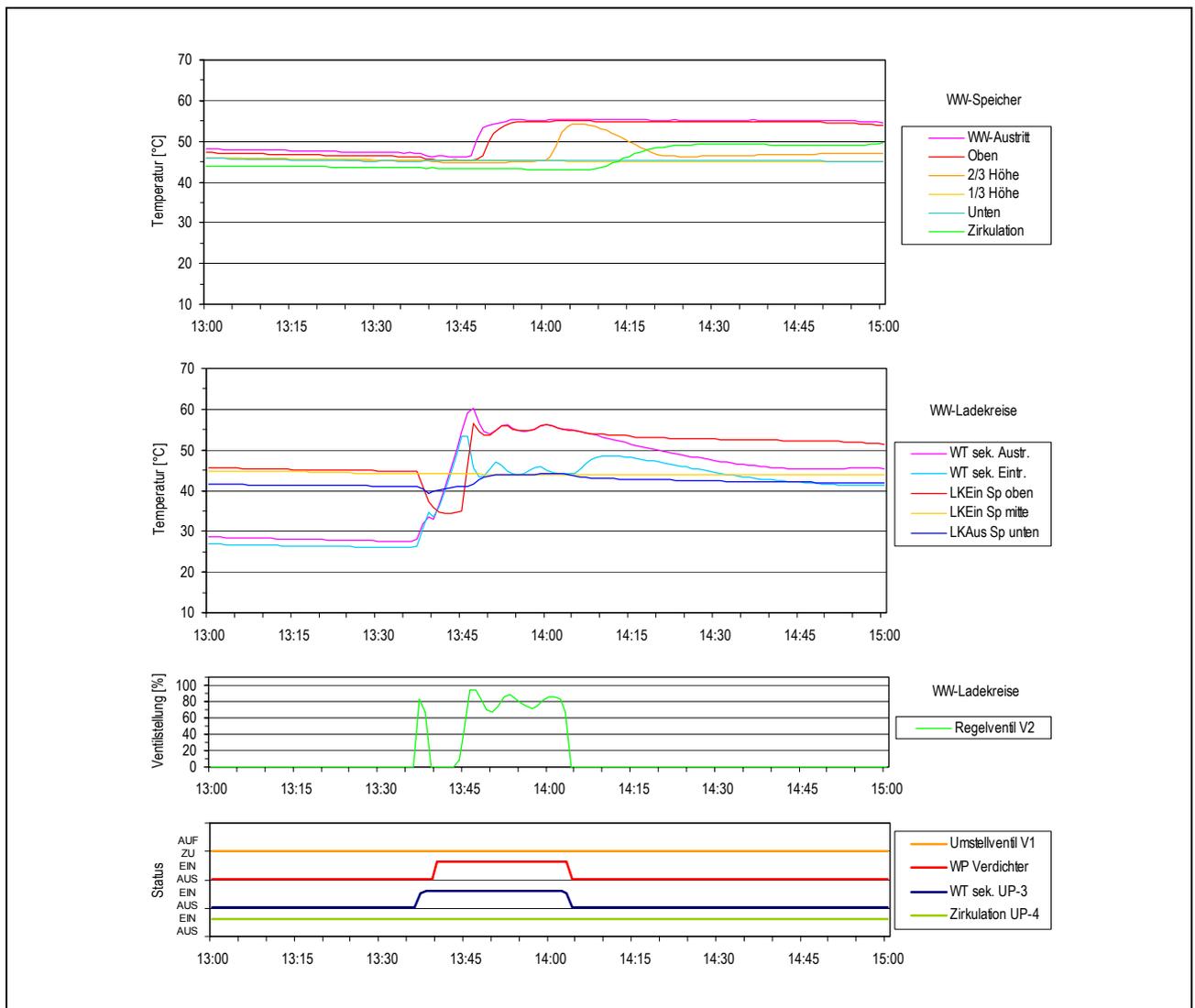


Abbildung 13: Schichtladung am 7.11.2008 nach der Inbetriebnahme (Teil 2)

In Abbildung 12 und Abbildung 13 ist dokumentiert, wie der Ersteller der Anlage die Schichtladung bei der Inbetriebnahme eingestellt hatte:

- Obwohl der Laderegler-Sollwert mit 55°C (T6, Wärmetauscher sekundärseitig) sehr tief eingestellt war, steigt die Verflüssiger-Austrittstemperatur bis gegen 65°C, d. h. Überschwingen um rund 10 K
- Der Arbeitsmitteldruck steigt hochdruckseitig auf über 25 bar (ab dieser Messung waren Druckfühler installiert)

Fazit 1: Wenn keine Anforderungen an die Legionellensicherheit gestellt und damit auch keine Kontrollmessungen durchgeführt worden wären, wäre die Wahrscheinlichkeit gross gewesen, dass die Anlage für ihre ganze Lebensdauer mit dieser Einstellung weiterbetrieben worden wäre. Die Warmwassertemperatur wäre für den Benutzer immer befriedigend hoch und auch die Gefahr einer Hochdruckstörung wäre nur gering gewesen. Auch hier zeigt sich also, dass immer eine sorgfältige Betriebsoptimierung notwendig ist!

Fazit 2: Wenn mit dieser Einstellung ausdrücklich ein Antilegionellenbetrieb gefordert und der Sollwert auf über 60°C gestellt worden wäre, wäre die Verflüssiger-Austrittstemperatur auf über 70°C und der Arbeitsmitteldruck auf über 30 bar gestiegen. Damit wäre eine Hochdruckstörung ausgelöst worden (Einstellung Hochdruckpressostat ca. 30 bar).

Schichtladung – Optimierungsversuch durch den Ersteller der Anlage

Datum der Messung	20.11.2008
Art der Ladung	Schichtladung (Teilladung) mit Trickschaltung (siehe Text)
Regelgröße	T6 (sekundäre Austrittstemperatur Wärmetauscher)*
Sollwert	55°C
Ladung EIN	T1 < 45,5°C*
Ladung AUS	T2 > 54°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	57,5...41°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,62

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

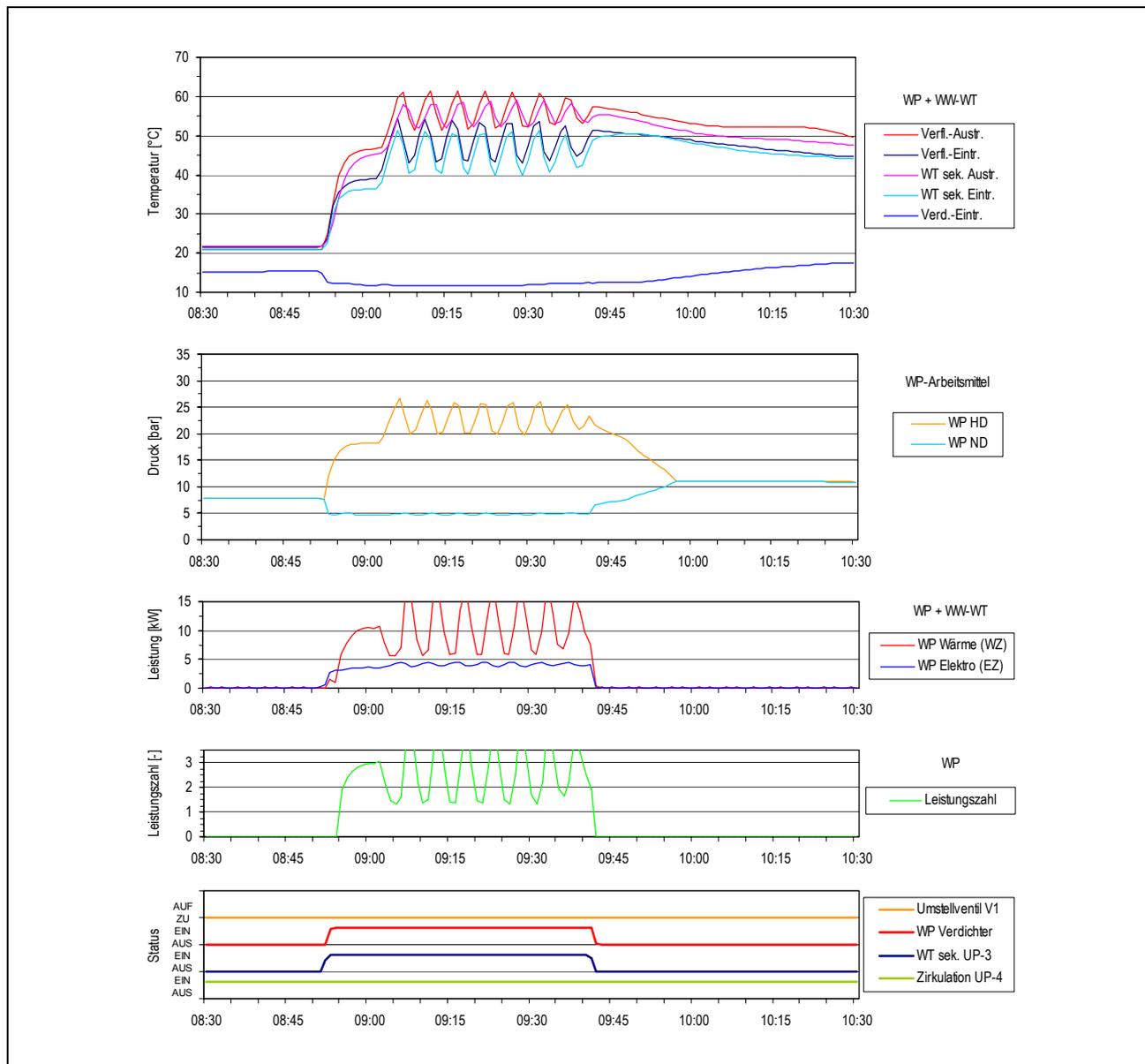


Abbildung 14: Schichtladung am 20.11.2008 – nach Optimierungsversuch durch den Ersteller der Anlage (Teil 1)

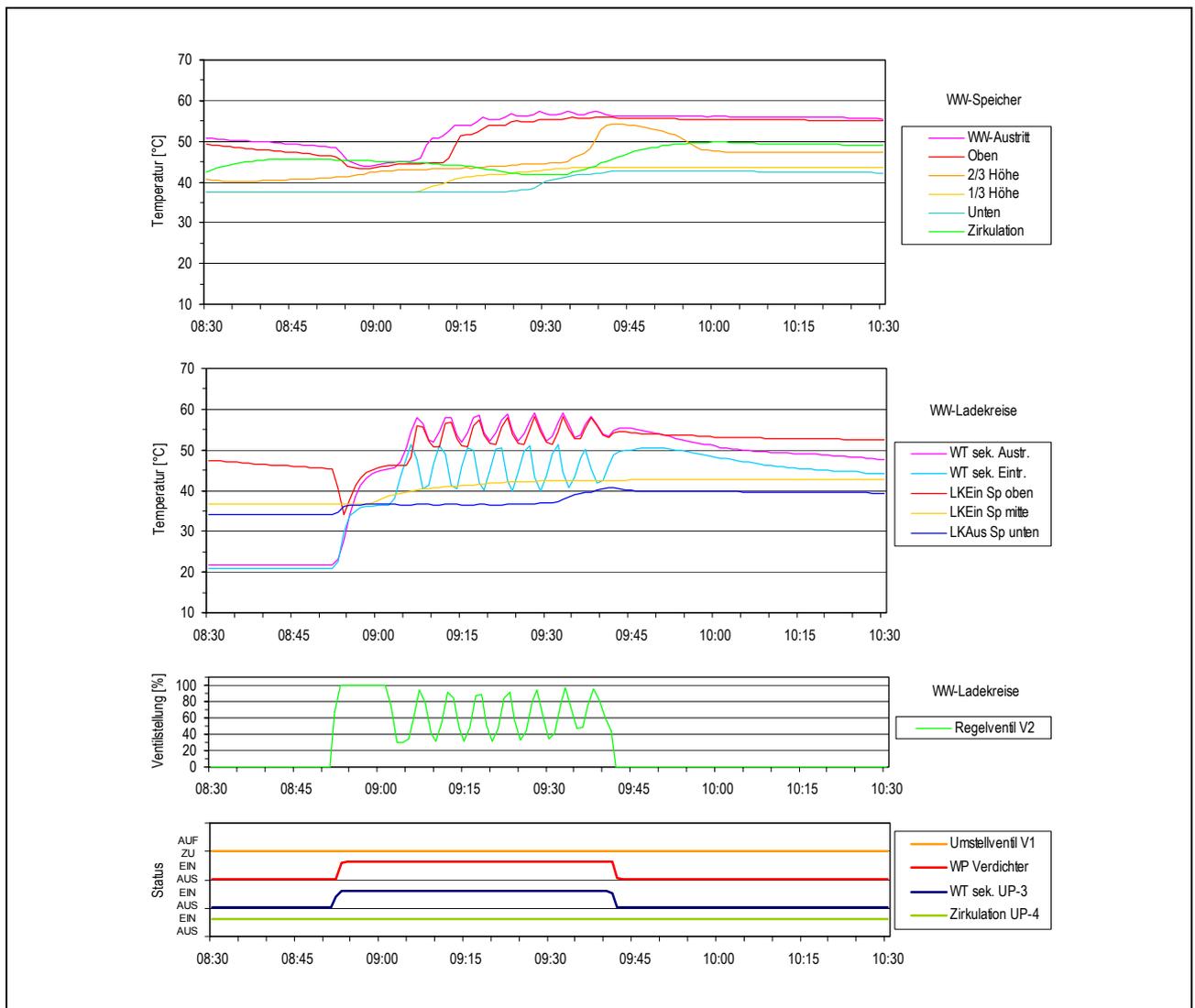


Abbildung 15: Schichtladung am 20.11.2008 – nach Optimierungsversuch durch den Ersteller der Anlage (Teil 2)

Zur Verbesserung des Einschwingverhaltens wurde vom Ersteller der Anlage das Ventil des Ladereglers so programmiert, dass dieses beim Start auf 100% geöffnet und erst nach Ablauf einer Sperrzeit von 10 Minuten freigegeben wird. Das Resultat zeigt Abbildung 14 und Abbildung 15:

- Der hohe Überschwinger beim Start kann damit zwar erfolgreich verhindert werden
- Damit entsteht aber das Problem, dass während der Sperrzeit mit einer zu tiefen Temperatur oben in den Speicher geladen wird
- Nachdem der Regler nach Ablauf der Sperrzeit in Funktion kommt, schwingt dieser praktisch ungedämpft

Fazit: Unbrauchbares Regelkonzept (auch wenn die Sperrzeit offensichtlich viel zu lang ist und noch stark verkürzt werden könnte).

Schichtladung – gezielte Anpassung der Reglerparameter

Datum der Messung	8.12.2008
Art der Ladung	Schichtladung (Teilladung) mit gezielter Anpassung der Reglerparameter, Trickschaltung noch in Betrieb (siehe Text)
Regelgröße	T6 (sekundäre Austrittstemperatur Wärmetauscher)*
Sollwert	58°C
Ladung EIN	T1 < 48°C*
Ladung AUS	T2 > 54°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	58,5...44°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,56

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

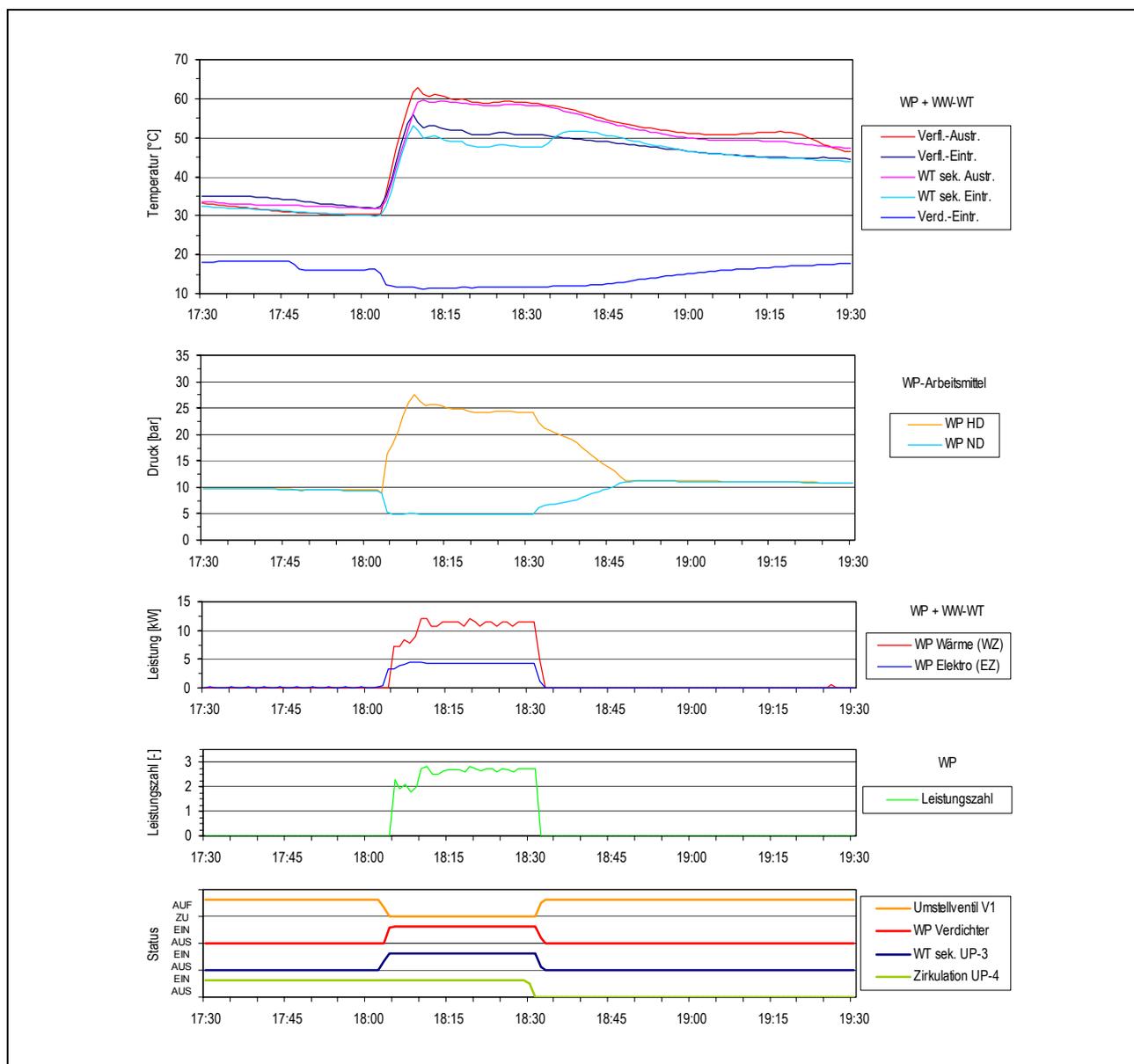


Abbildung 16: Schichtladung am 8.12.2008 – nach gezielter Anpassung der Reglerparameter (Teil 1)

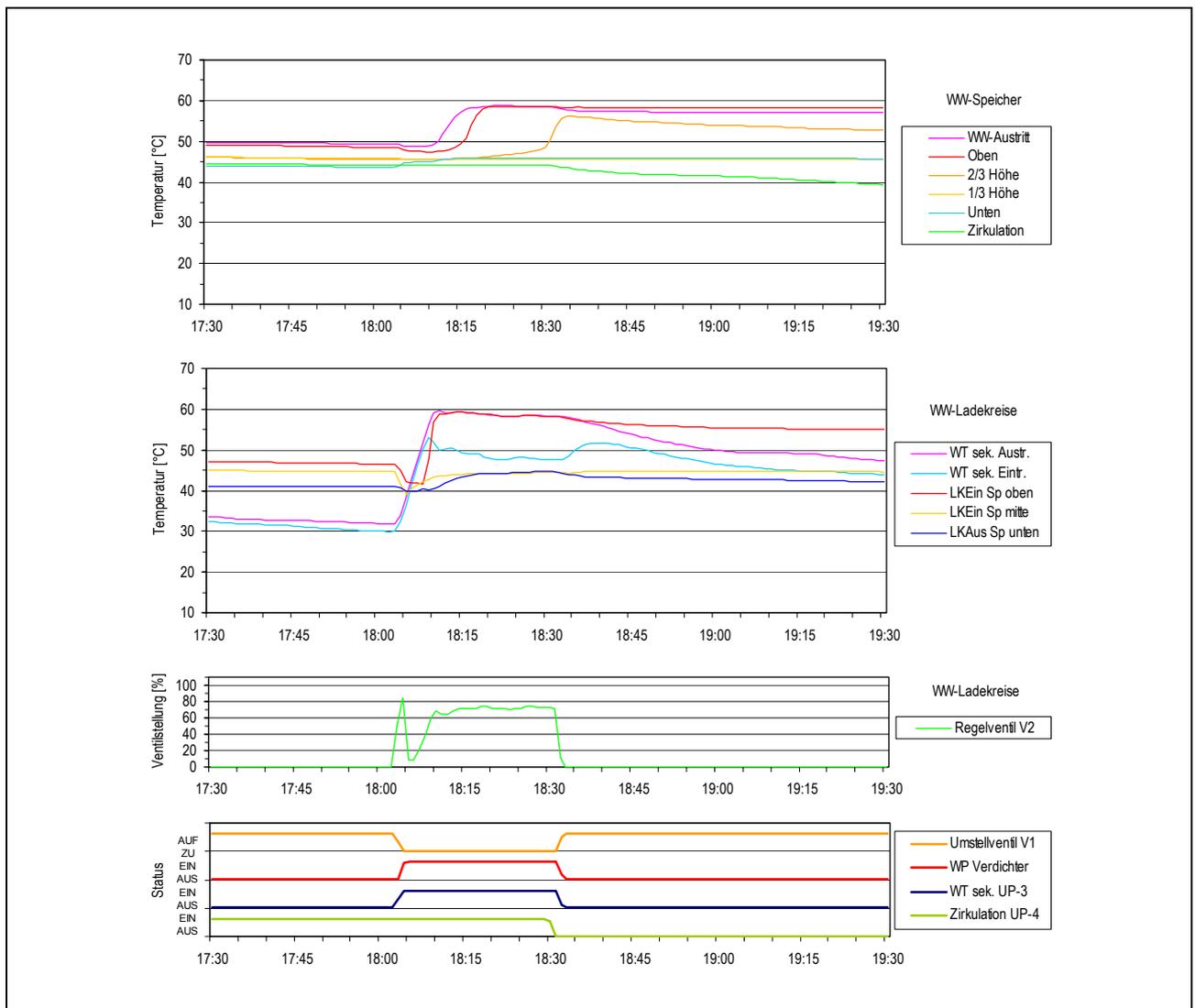


Abbildung 17: Schichtladung am 8.12.2008 – nach gezielter Anpassung der Reglerparameter (Teil 2)

Da die Öffnung des Ventil beim Start auf 100% bei diesem Testlauf noch programmiert war, wurde die Sperrzeit auf das Minimum von etwa 2 Minuten eingestellt. Durch gezielte Anpassung der Reglerparameter konnte das Verhalten des PID-Reglers wesentlich verbessert werden (Abbildung 16 und Abbildung 17):

- Der starke Überschwinger beim Start tritt nicht mehr auf und der Regler zeigt praktisch kein Schwingen mehr
- Der Temperatureinbruch beim Start entfällt und der Speicher kann mit der gewählten Ladetemperatur von 58°C geladen werden

Fazit: Mit dieser Optimierung war es erstmals möglich, eine definierte Ladung auf den gewählten Sollwert von 58°C durchzuführen. Es war aber auch klar, dass die Trickschaltung mit der Öffnung des Ventils beim Start auf 100% mehr hinderlich als nützlich ist.

5.2 Optimierte Ladevorgänge

Hier werden die Messdaten der optimierten Ladevorgänge für Stufenladung und Schichtladung vorgestellt. Bei der Stufenladung erfolgt die Ladung auf die höchstmögliche Temperatur von 57°C und bei der Schichtladung ebenfalls auf 57°C (zum Vergleich mit der Stufenladung) und auf über 60°C. Beim Antilegionellenbetrieb wird schliesslich der komplette Speicherinhalt mit Schichtladung auf über 60°C geladen.

Stufenladung auf 57°C

Datum der Messung	15.4.2009
Art der Ladung	Stufenladung (Voll-Ladung des Speichers)
Ladung EIN	T2 < 46°C
Ladung AUS	T5 > 64°C
Speichertemperatur am Ende der Ladung	56,6°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,64 (Momentanwert 3...2,4)

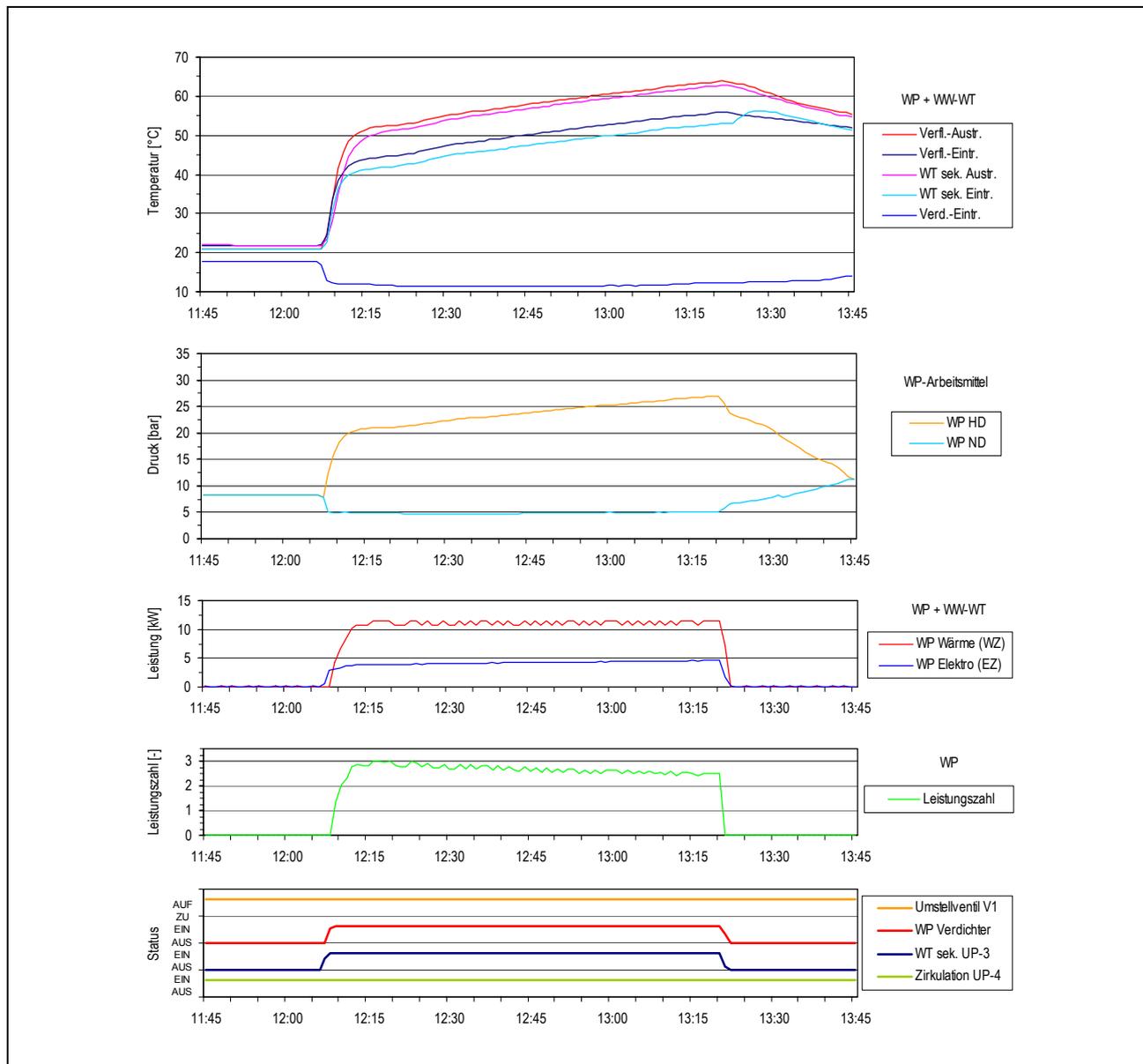


Abbildung 18: Stufenladung auf 57°C am 15.4.2009 (Teil 1)

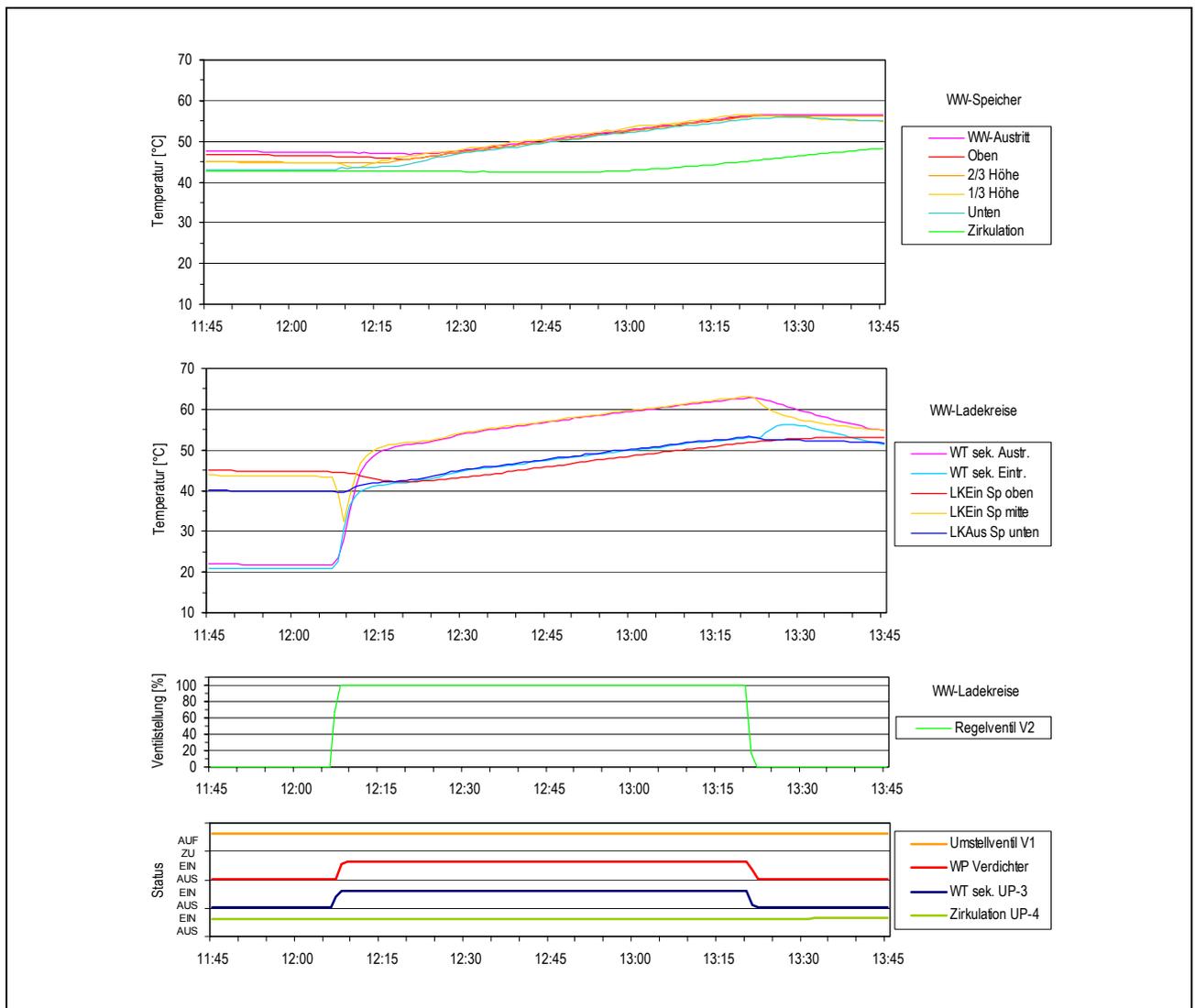


Abbildung 19: Stufenladung auf 57°C am 15.4.2009 (Teil 2)

Diese Messdaten in Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die bestmöglichen Resultate, die mit Stufenladung sicher ohne Hochdruckstörung erreicht werden konnten:

- Bei der Stufenladung steigen die Speichertemperaturen mehr oder weniger kontinuierlich an, der Begriff «Rampenladung» wäre also eher zutreffend
- Die höchstmögliche Warmwassertemperatur liegt bei 57°C; diese wird mit einem Ausschaltpunkt der Verflüssiger-Austrittstemperatur von 64°C erreicht
- Im Gegensatz zur Schichtladung muss bei der Stufenladung der ganze Speicher durchgeladen werden (bei der Schichtladung kann hingegen, abhängig von der Lage des Ausschaltfühlers, auch nur ein Teil des Speichers geladen werden)
- Die Leistungszahl ist mit einem Mittelwert von 2,64 relativ schlecht, weil es sich bei der Versuchsanlage um ein Bürogebäude mit wenig Warmwasserverbrauch, aber schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch handelt.

Fazit: Bei Anlagen mit wenig Warmwasserverbrauch, aber schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch, lässt sich mit Stufenladung die gute Leistungszahl am Anfang der Ladung nicht nutzen. Bei normalem Warmwasserverbrauch (z. B. Wohnungsbau) ist die Warmwassertemperatur im unteren Teil des Speichers tendenziell tief; hier ist deshalb eine Stufenladung günstiger als eine Schichtladung (in den Untersuchungen 2007 [1] [2] konnten mit Stufenladung Arbeitszahlen bis 3,3 realisiert werden).

Schichtladung auf 57°C

Datum der Messung	14.4.2009
Art der Ladung	Schichtladung (Teilladung des Speichers)
Regelgröße	T5 (Verflüssiger-Austrittstemperatur)*
Sollwert	57,5°C
Ladung EIN	T1 < 47°C*
Ladung AUS	T2 > 55°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	57...43,7°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,60

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

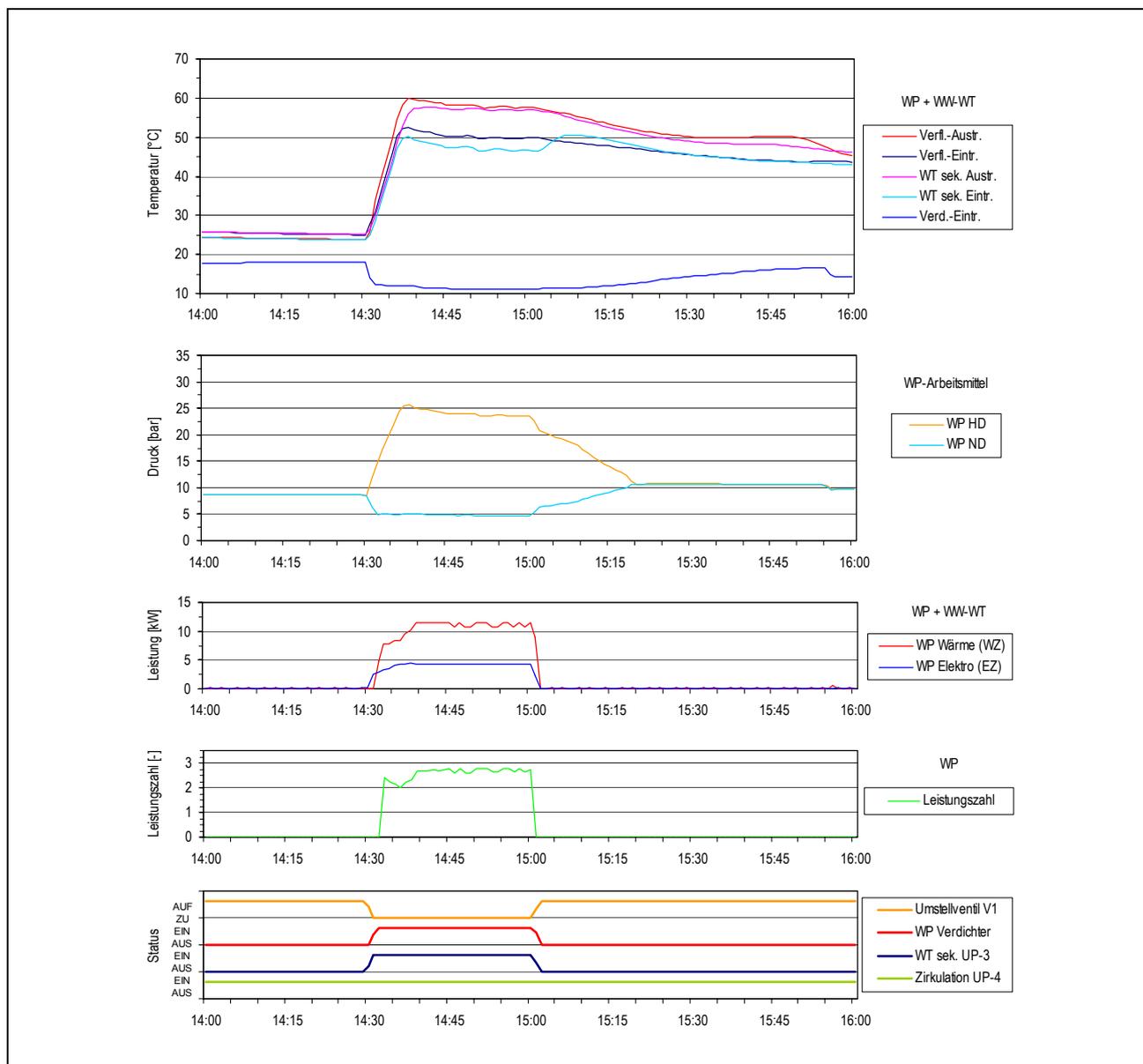


Abbildung 20: Schichtladung auf 57°C am 14.4.2009 (Teil 1)

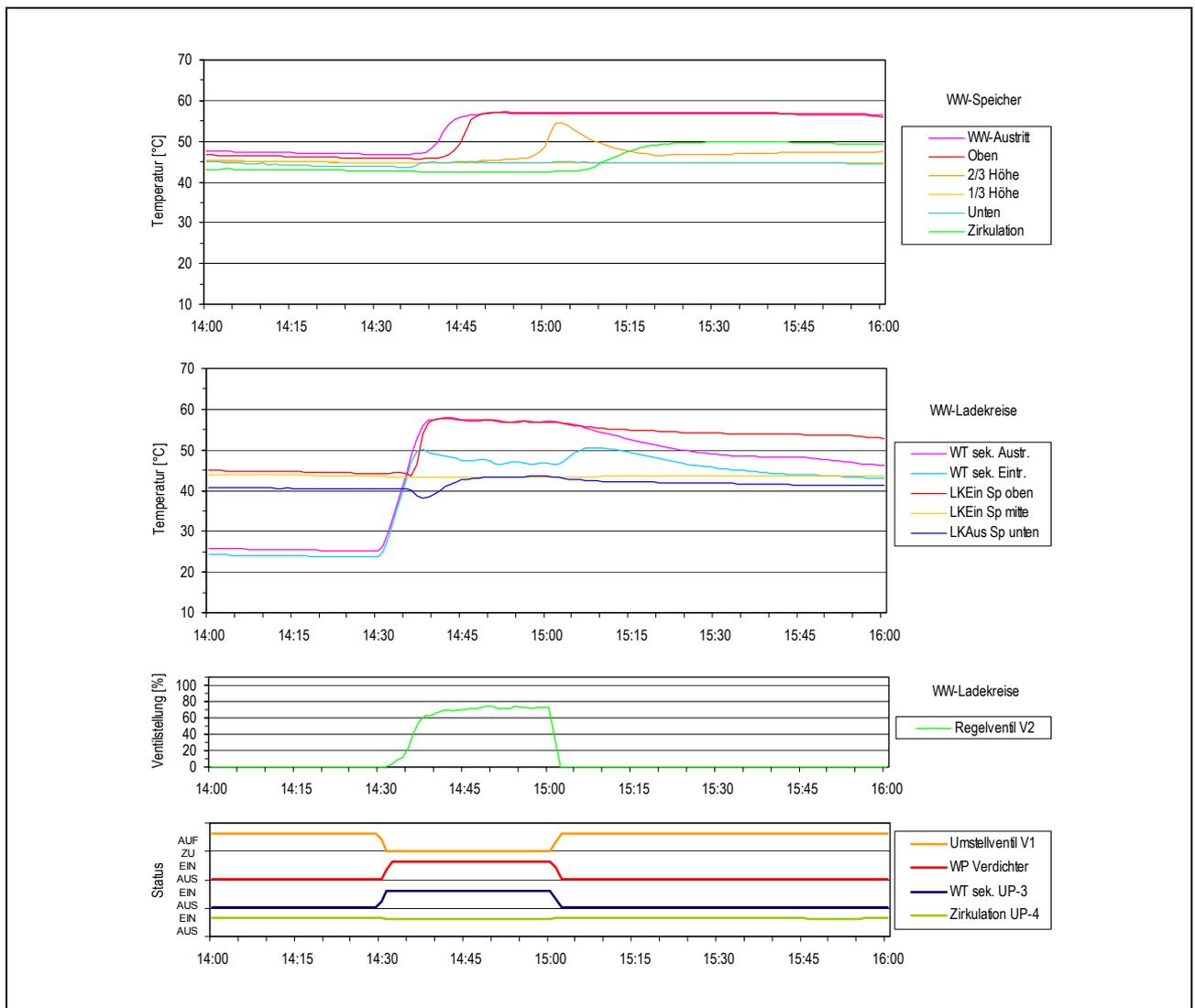


Abbildung 21: Schichtladung auf 57°C am 14.4.2009 (Teil 2)

Wichtiger Hinweis: In den nachfolgenden Untersuchungen wurde bei der Schichtladung als Regelgröße anstelle von T6 (sekundäre Austrittstemperatur Wärmetauscher) T5 (Verflüssiger-Austrittstemperatur) verwendet (siehe dazu auch Abschnitt 5.5). Dies bringt Vorteile bezüglich Überspringen beim Start. Der Laderegler und das Regelventil wird sofort freigegeben (keine Trickschaltung).

Die Messdaten in Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen den optimierten Betrieb einer Schichtladung auf 57°C. Im Vergleich zur Stufenladung auf etwa die gleiche Warmwassertemperatur von 57°C ergibt sich:

- Die Warmwassertemperatur von 57°C wird mit einer maximalen Verflüssiger-Austrittstemperatur von 60°C erreicht (Stufenladung: 64°C)
- Abhängig von der Lage des Ausschaltfühlers kann bei der Schichtladung gezielt nur ein Teil des Speichers geladen werden (im Gegensatz dazu muss bei der Stufenladung immer der ganze Speicher durchgeladen werden)
- Die Leistungszahl ist mit einem Mittelwert von 2,60 kaum schlechter als bei der Stufenladung (2,64). Der Grund dafür ist allerdings, dass bei der Stufenladung die bessere Arbeitszahl am Anfang der Ladung nicht ausgenutzt werden konnte, weil es sich bei der Versuchsanlage um ein Bürogebäude mit wenig Warmwasserverbrauch, aber schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch handelt.

Fazit: Bei Anlagen mit wenig Warmwasserverbrauch, aber schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch, lässt sich mit Schichtladung eine mit Stufenladung vergleichbare Arbeitszahl realisieren. Schichtladung bietet aber den Vorteil, dass nur ein Teil des Speichers geladen werden muss (kleinere Speicherluste).

Schichtladung auf über 60°C

Datum der Messung	16.4.2009
Art der Ladung	Schichtladung (Teilladung des Speichers)
Regelgröße	T5 (Verflüssiger-Austrittstemperatur)*
Sollwert	62°C
Ladung EIN	T1 < 50°C*
Ladung AUS	T2 > 58°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	61,2...46,7°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,47

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

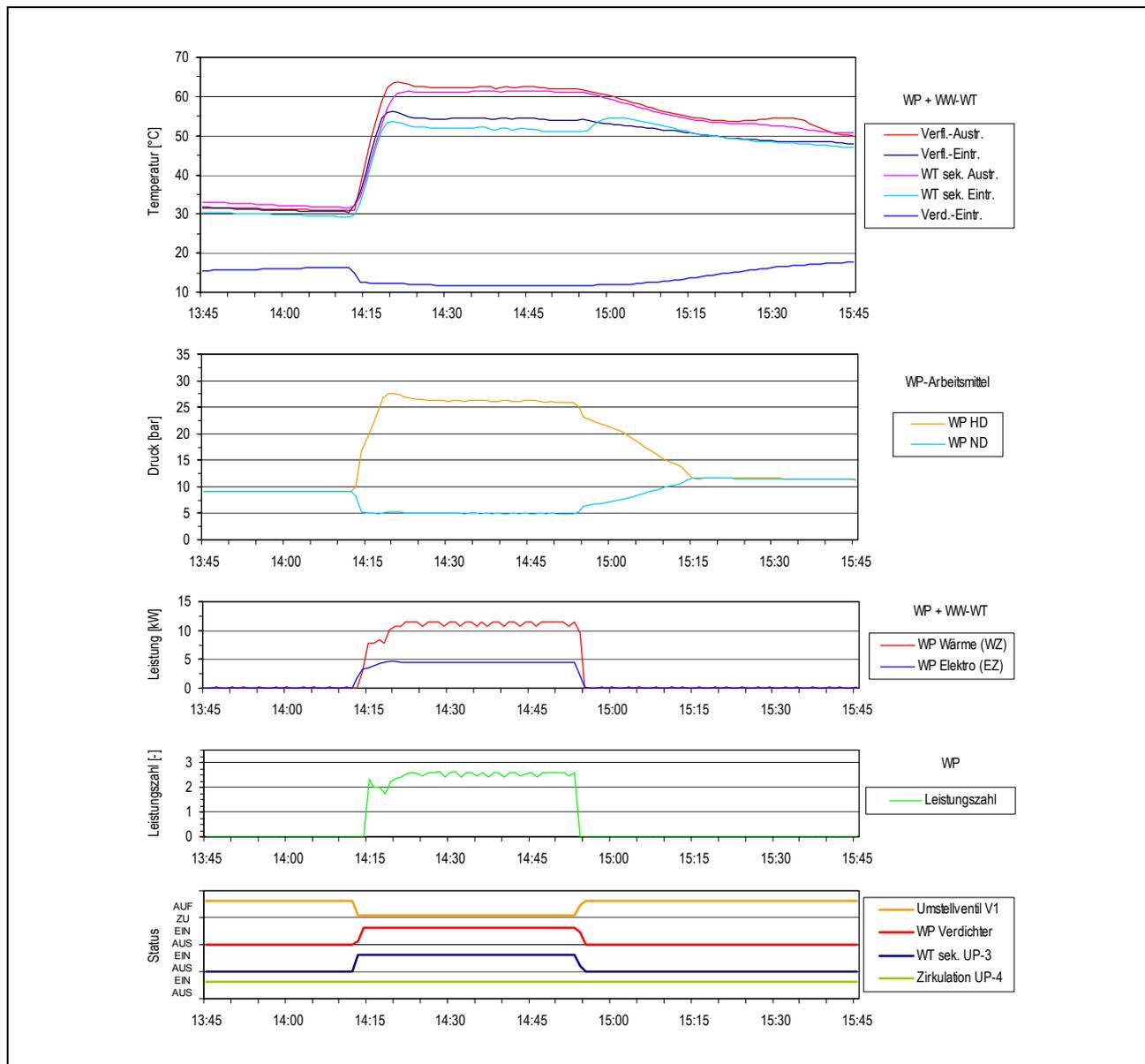


Abbildung 22: Schichtladung auf über 60°C am 16.4.2009 (Teil 1)

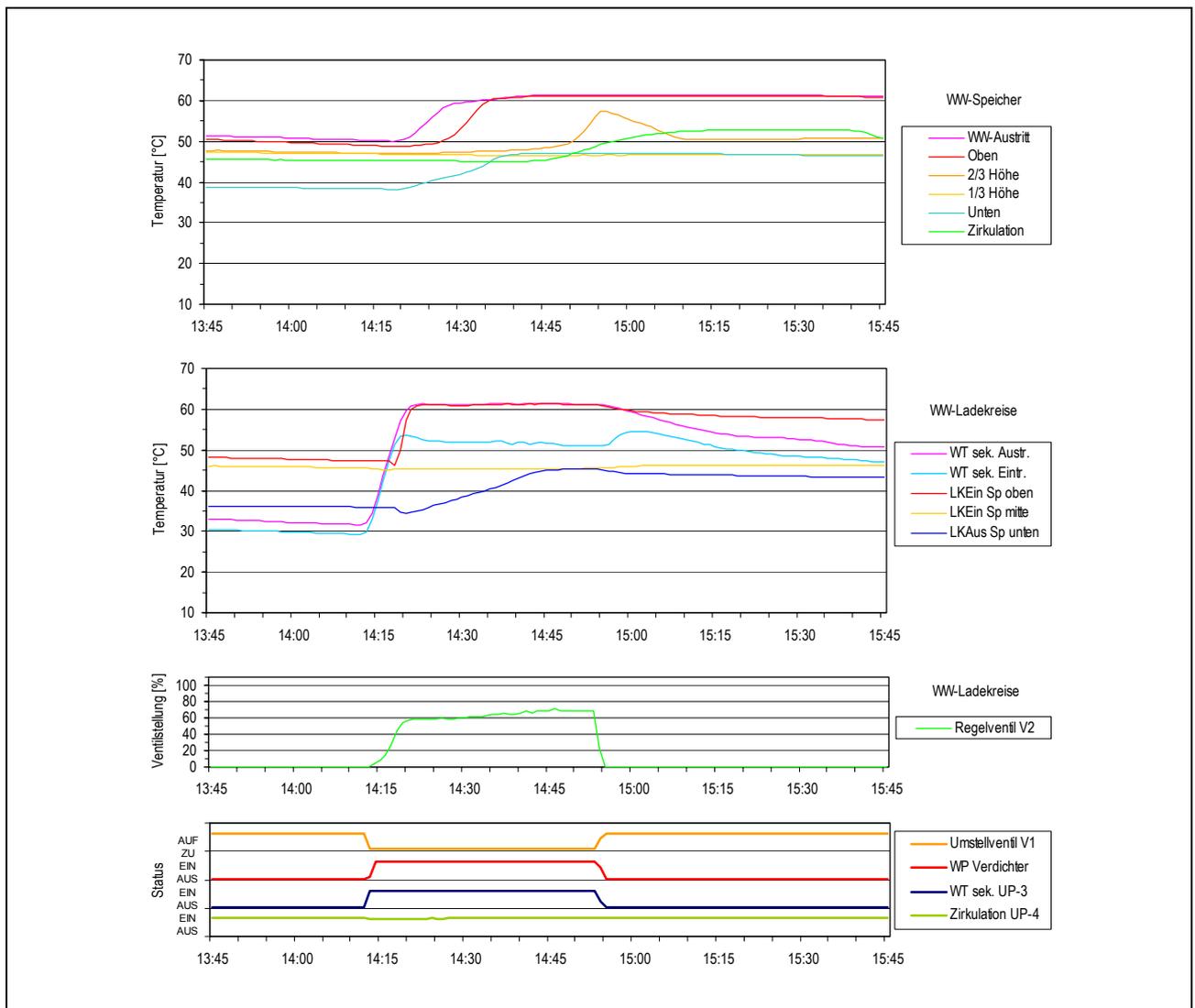


Abbildung 23: Schichtladung auf über 60°C am 16.4.2009 (Teil 2)

Die Messdaten in Abbildung 22 Abbildung 23 zeigen den optimierten Betrieb einer Schichtladung auf über 60°C. Damit können auch im Normalbetrieb legionellensichere Warmwassertemperaturen erzeugt werden. Die Leistungszahl ist mit einem Mittelwert von 2,47 nur wenig schlechter als bei der Ladung auf 57°C (2,60). Zwei Forderungen bezüglich Legionellensicherheit werden aber noch nicht erfüllt:

- Die Warmwassertemperatur fällt bis auf 50°C; Grund dafür ist der Einschaltpunkt T1 < 50°C (dieser könnte aber noch höher eingestellt werden)
- Es wird noch nicht das ganze Nutzvolumen auf über 60°C erhitzt (diese Forderung wird erst im Antilegionellenbetrieb erfüllt)

Fazit: Bei Anlagen mit grossem Legionellenrisiko kann der Normalbetrieb mit Schichtladung auf über 60°C in Kombination mit Antilegionellenbetrieb gewählt werden. Dazu sollte der Einschaltpunkt genügend hoch eingestellt werden.

Antilegionellenbetrieb

Datum der Messung	13.4.2009
Art der Ladung	Antilegionellenbetrieb (Voll-Ladung des Speichers)
Regelgröße	T5 (Verflüssiger-Austrittstemperatur)*
Sollwert	63°C
Ladung EIN	T1 < 50°C* + Zeitprogramm
Ladung AUS	T4 > 56°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	62,4...61,1°C
Leistungszahl (Mittelwert)	2,47

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

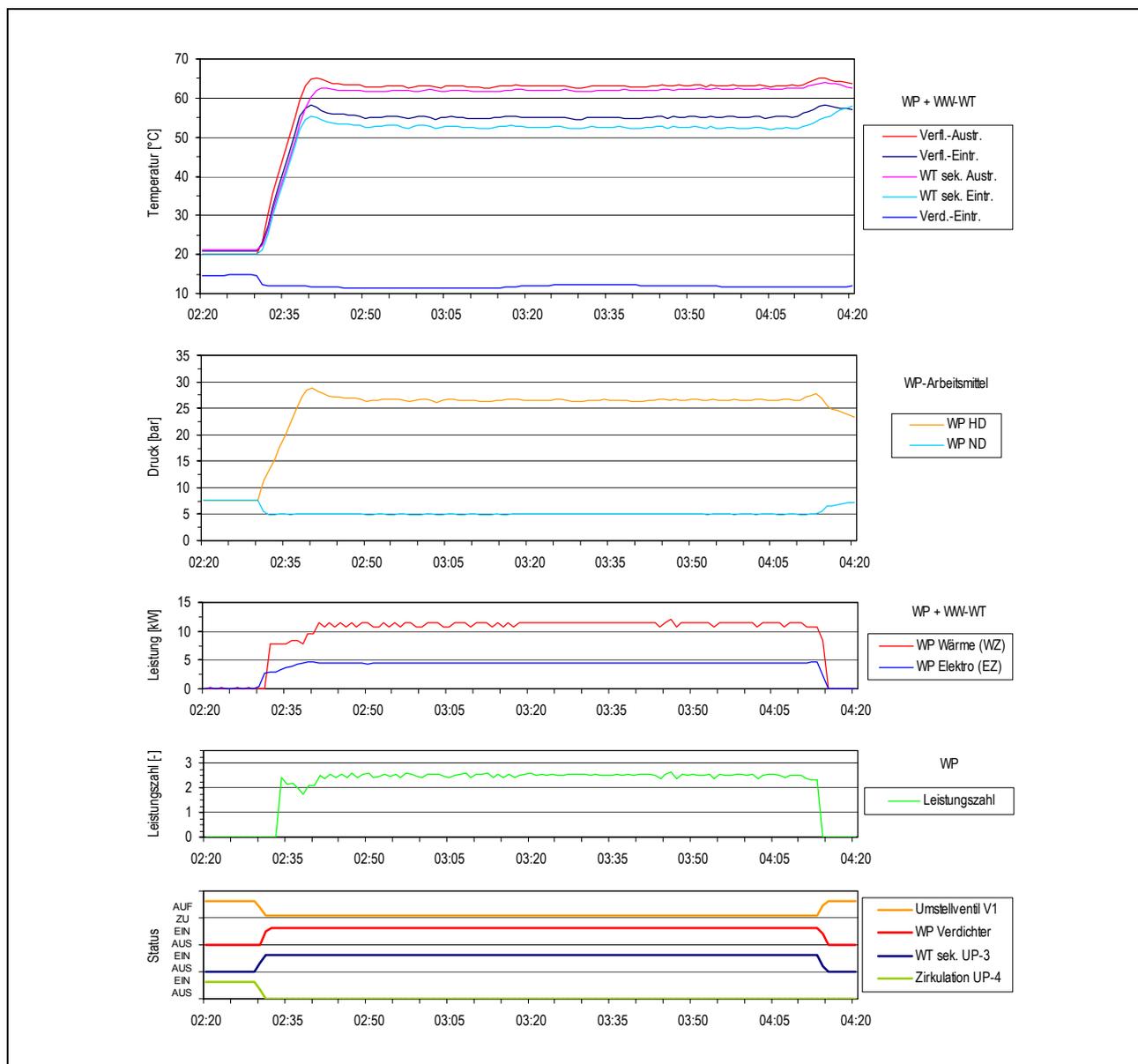


Abbildung 24: Antilegionellenbetrieb am 13.4.2009 (Teil 1)

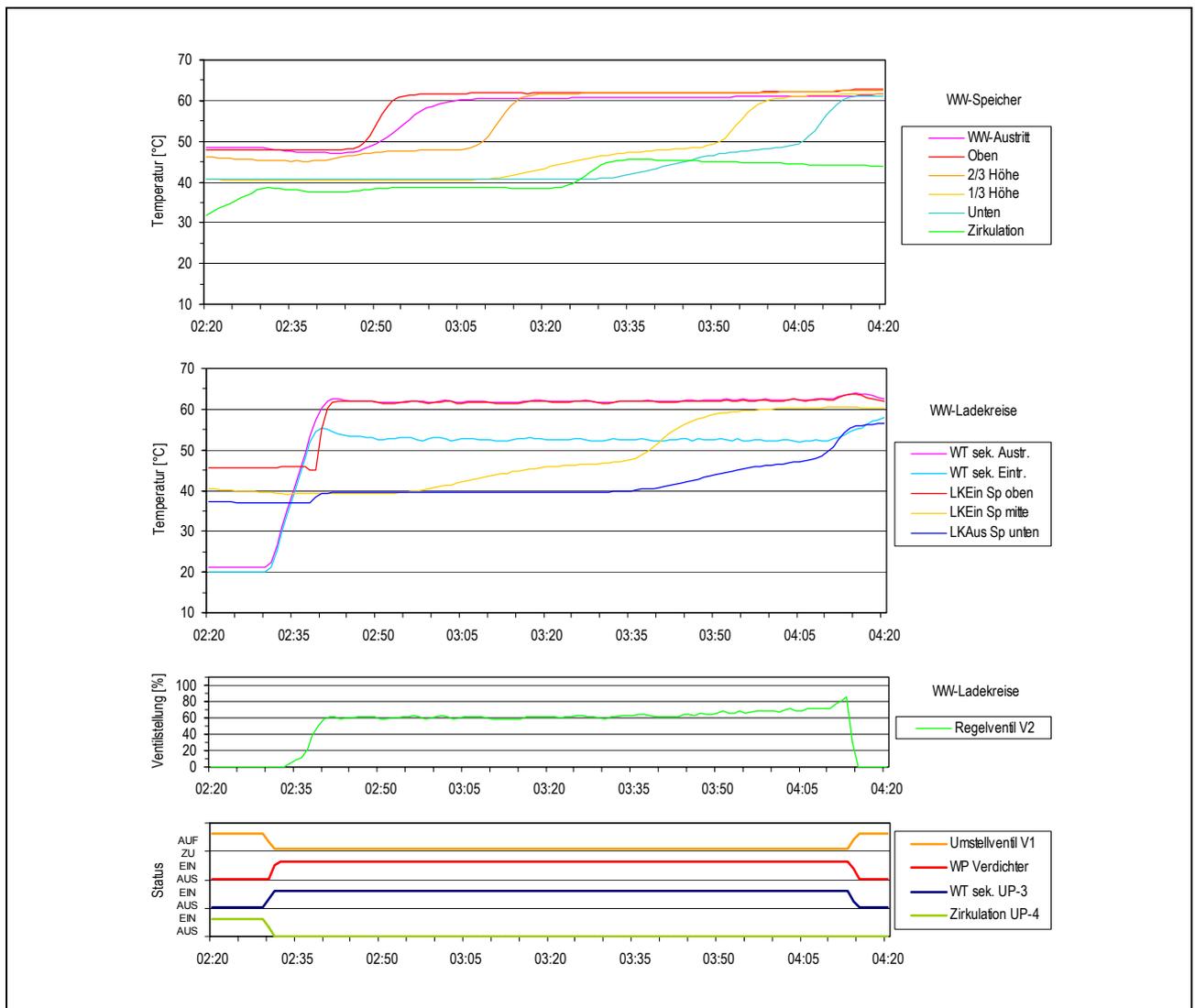


Abbildung 25: Antilegionellenbetrieb am 13.4.2009 (Teil 2)

Die Messdaten in Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen den Antilegionellenbetrieb:

- Alle Sollwerte sind so hoch eingestellt, dass gerade keine Hochdruckstörung provoziert wird.
- Das ganze Nutzvolumen wird auf über 60°C erhitzt.
- Wie oft der Antilegionellenbetrie erfolgt (täglich, wöchentlich...) spielt keine Rolle, weil dies nur eine Frage der Zeitprogrammsteuerung ist

Fazit: Je nach Art und Grösse des Legionellenrisikos kann der Antilegionellenbetrieb mit einer der zuvor beschriebenen Betriebsarten kombiniert werden:

- **In Kombination mit Stufenladung: bei Anlagen mit mittlerem Legionellen-Risiko und normalem Warmwasserverbrauch (z. B. Wohnbauten) wird die bessere Arbeitszahl der Stufenladung ausgenutzt.**
- **In Kombination mit Schichtladung auf 57°C: bei Anlagen mit mittlerem Legionellen-Risiko und geringem Warmwasserverbrauch, aber schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch (z. B. Bürogebäude) kann der Speicher gezielt nur im oberen Teil erhitzt werden.**
- **In Kombination mit Schichtladung auf über 60°C: bei Anlagen mit hohem Legionellen-Risiko können die Empfehlungen des BAG eingehalten werden (bei Pflegeheimen und Spitälern ist im Einzelfall noch mit den Hygiene-Verantwortlichen abzuklären, welche zusätzlichen Massnahmen notwendig sind, wie z. B. periodische Temperaturmessungen, bakteriologische Kontrollen und alternative Desinfektionssysteme mit Ionisierung oder Ozonisierung).**

5.3 Typische Tagesverläufe

Kombination Antilegionellenbetrieb mit Stufenladung auf 57°C

Datum der Messung	20.4.2009	
Art der Ladung	Schichtladung (Voll-Ladung)	Stufenladung (Voll-Ladung)
Regelgröße	T5 (Verfl.-Austrittstemp.)*	
Sollwert	63°C	
Ladung EIN	T1 < 50°C* + Zeitprogramm	T2 < 46°C*
Ladung AUS	T4 > 56°C*	T5 > 64°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	62,4...61,1°C	56,6°C
Tages-Arbeitszahl	2,58	

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

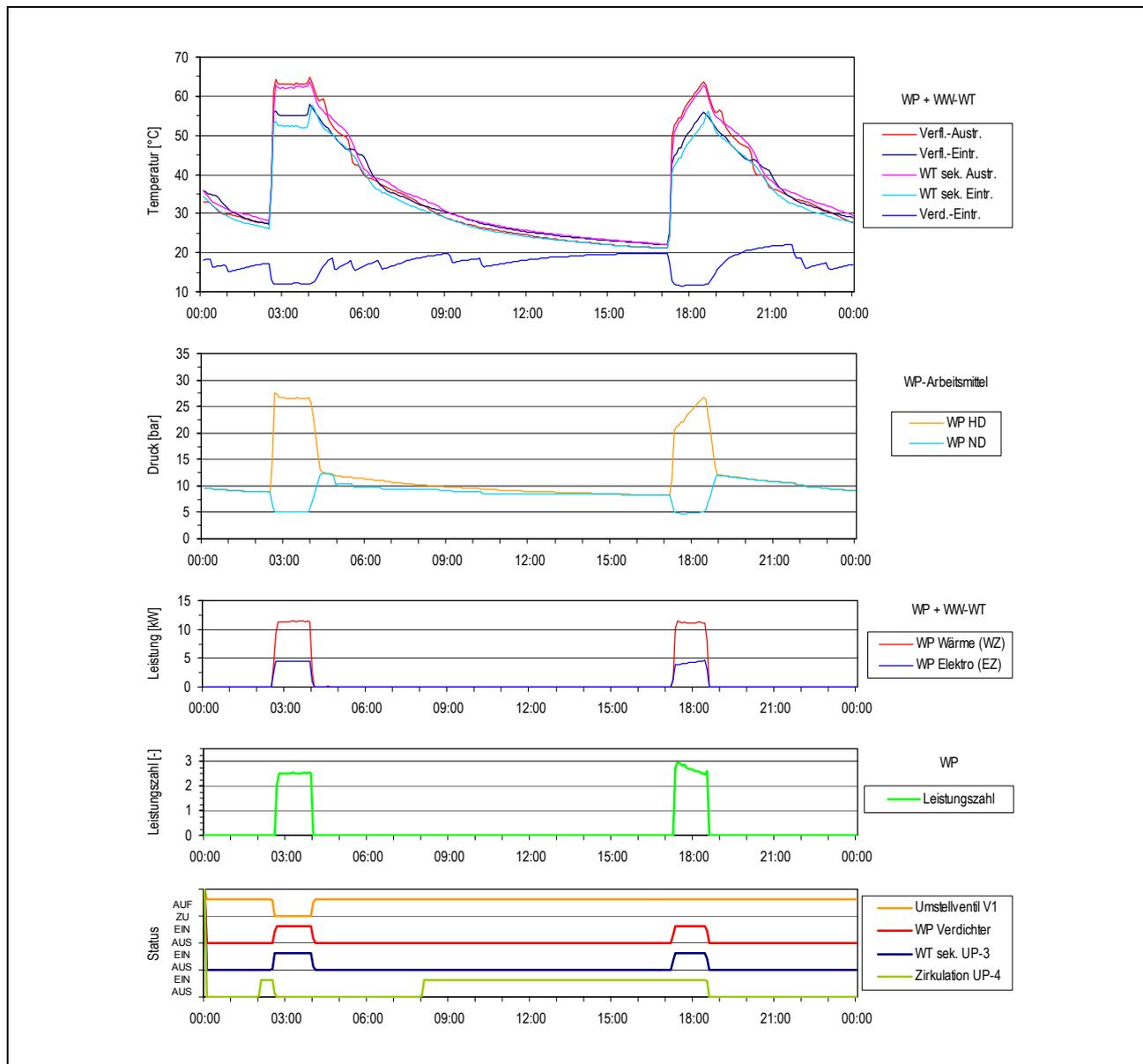


Abbildung 26: Kombination Antilegionellenbetrieb mit Stufenladung auf 57°C am 20.4.2009 (Teil 1)

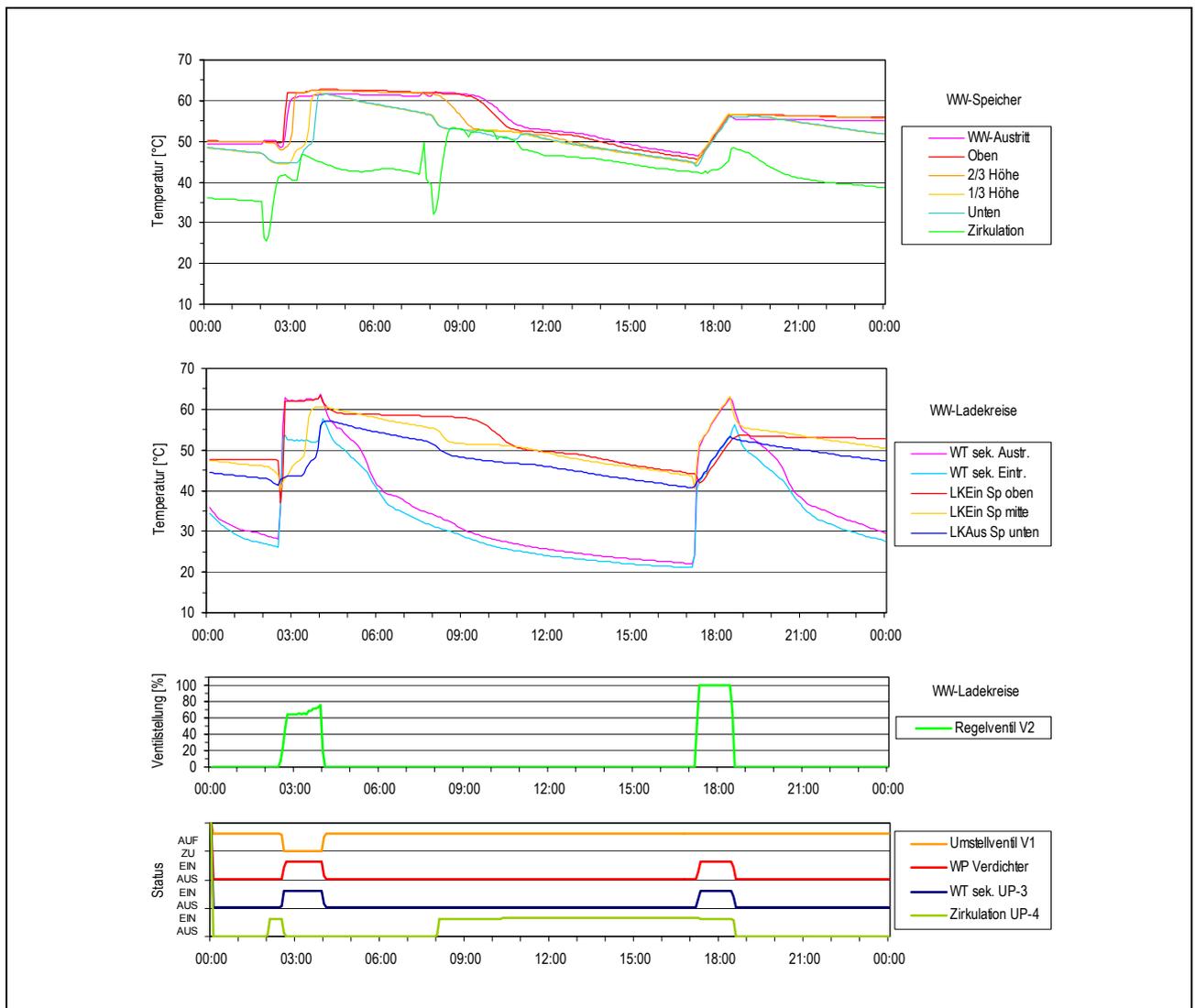


Abbildung 27: Kombination Antilegionellenbetrieb mit Stufenladung auf 57°C am 20.4.2009 (Teil 2)

Die Messdaten in Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen einen typischen Tagesverlauf mit Antilegionellenbetrieb und Stufenladung auf 57°C:

- Weil der Speicher nach dem Antilegionellenbetrieb vollständig auf über 60°C gefüllt ist, reicht eine einzige Nachladung mit Stufenladung pro Tag
- Da der untere Teil des Speichers nie kalt wird, kann der Vorteil der Stufenladung nicht ausgenutzt werden; die Arbeitszahl ist deshalb mit 2,58 relativ schlecht

Fazit: Antilegionellenbetrieb in Kombination mit Stufenladung bringt bei der vorliegenden Anlage mit geringem Warmwasserverbrauch und schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch wenig. Bei einer Anlage mit normalem Warmwasserverbrauch (z. B. Wohnbau) könnte der Vorteil der Stufenladung besser ausgenutzt werden.

Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf 57°C

Datum der Messung	27.4.2009	
Art der Ladung	Schichtladung (Voll-Ladung)	Schichtladung (Teilladung)
Regelgröße	T5 (Verfl.-Austrittstemp.)*	
Sollwert	63°C	57,5°C
Ladung EIN	T1 < 50°C* + Zeitprogramm	T1 < 47°C*
Ladung AUS	T4 > 56°C*	T2 > 55°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	62,4...61,1°C	57,0...44,9°C
Tages-Arbeitszahl	2,54	

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

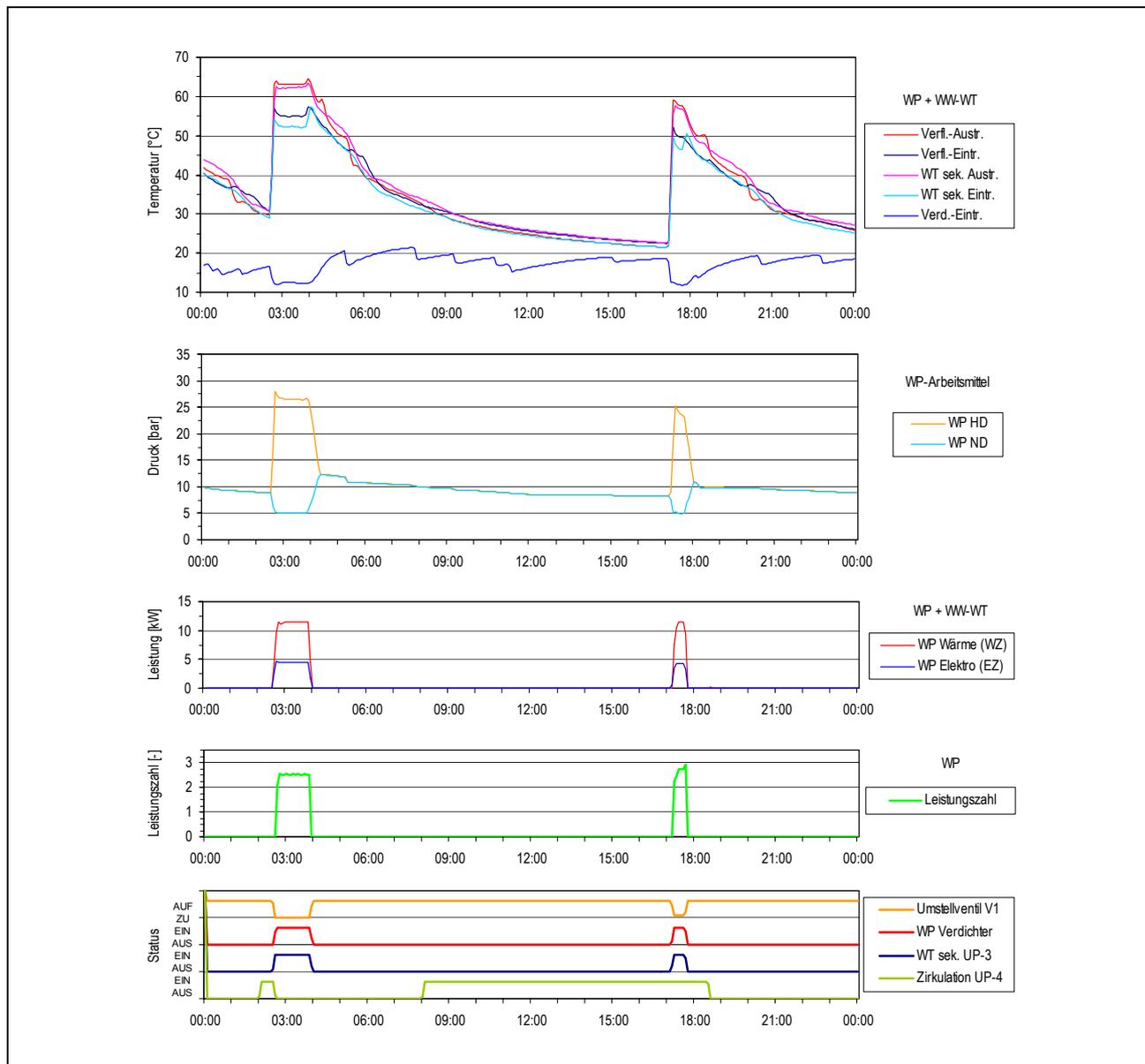


Abbildung 28: Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf 57°C am 27.4.2009 (Teil 1)

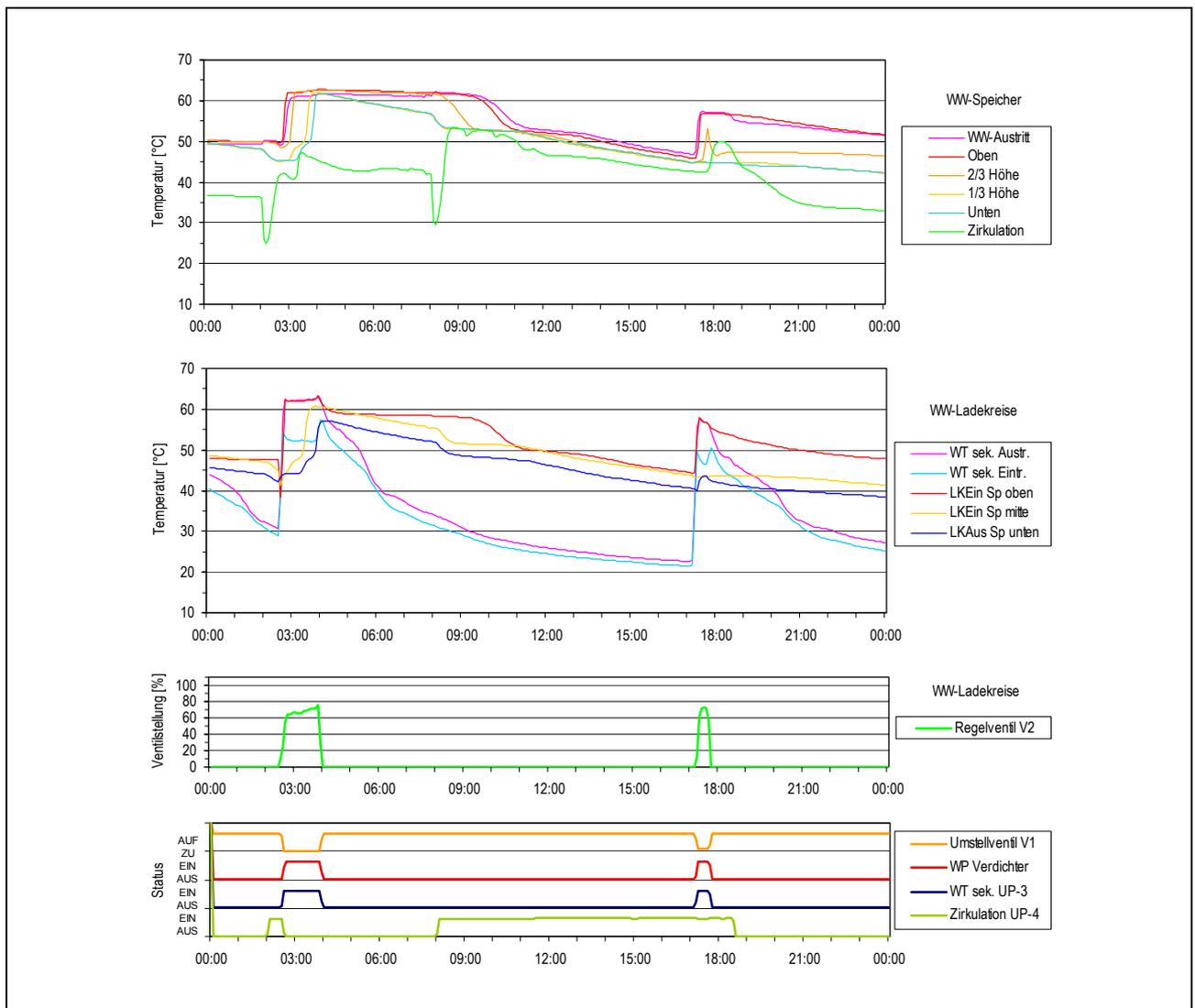


Abbildung 29: Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf 57°C am 27.4.2009 (Teil 2)

Die Messdaten in Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen einen typischen Tagesverlauf mit Antilegionellenbetrieb und Schichtladung auf 57°C:

- Weil der Speicher nach dem Antilegionellenbetrieb vollständig auf über 60°C gefüllt ist, reicht eine einzige Nachladung mit Schichtladung pro Tag
- Gegenüber der Kombination mit Stufenladung ergibt sich nur eine geringfügig schlechtere Tages-Arbeitszahl (2,54 anstatt 2,58)

Fazit: Der Antilegionellenbetrieb in Kombination mit Schichtladung auf 57°C ist bei der vorliegenden Anlage mit geringem Warmwasserverbrauch und schlechtem Verhältnis Zirkulationsverlust/Warmwasserverbrauch nur geringfügig schlechter als die Kombination mit Stufenladung, hat aber den Vorteil einer Teilladung des Speichers während des Tages.

Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf über 60°C

Datum der Messung	4.5.2009	
Art der Ladung	Schichtladung (Voll-Ladung)	Schichtladung (Teilladung)
Regelgröße	T5 (Verfl.-Austrittstemp.)*	
Sollwert	63°C	62°C
Ladung EIN	T1 < 50°C* + Zeitprogramm	T1 < 50°C*
Ladung AUS	T4 > 56°C*	T2 > 58°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	62,4...61,1°C	61,2...47,5°C
Tages-Arbeitszahl	2,48	

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

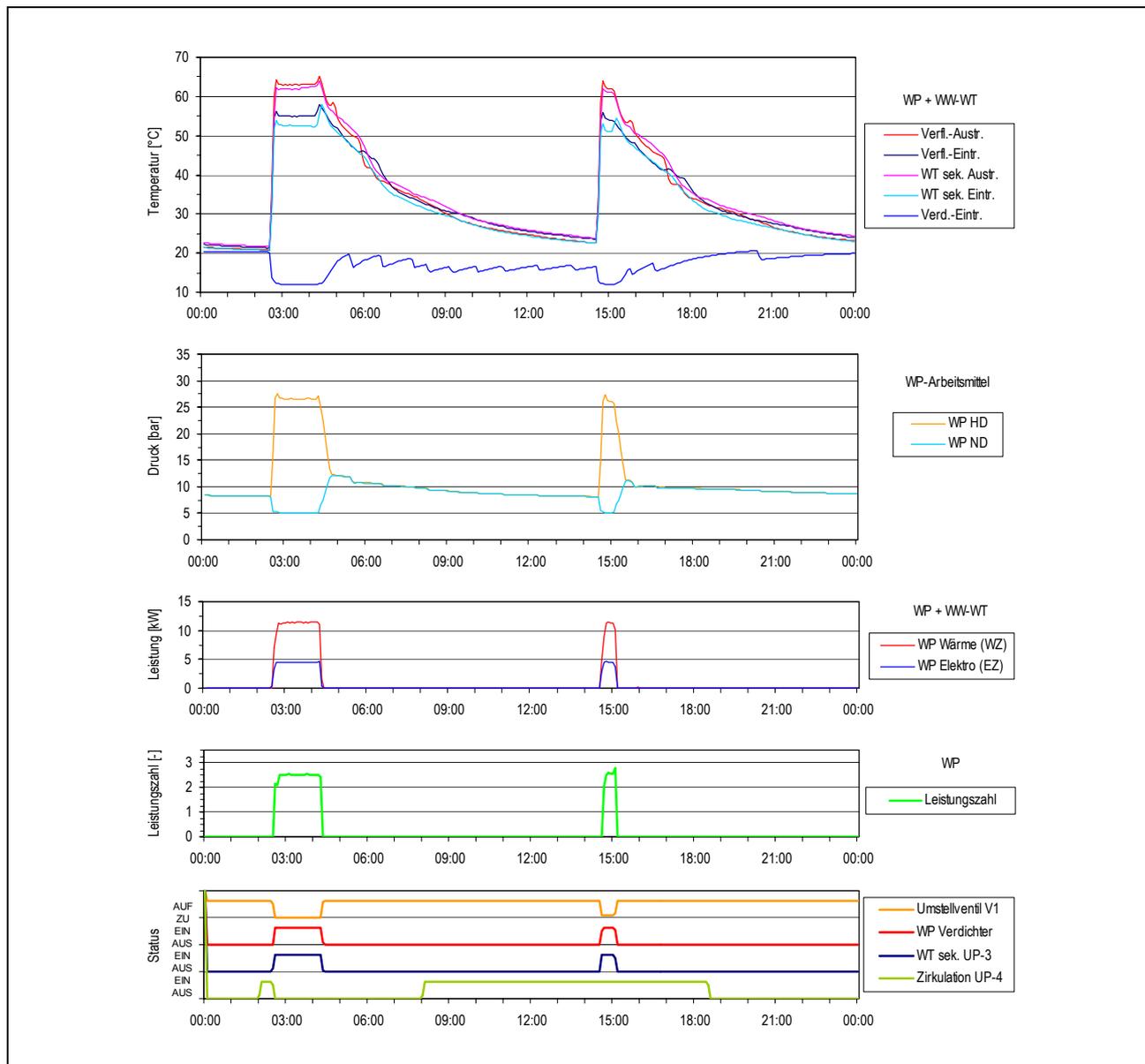


Abbildung 30: Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf über 60°C am 4.5.2009 (Teil 1)

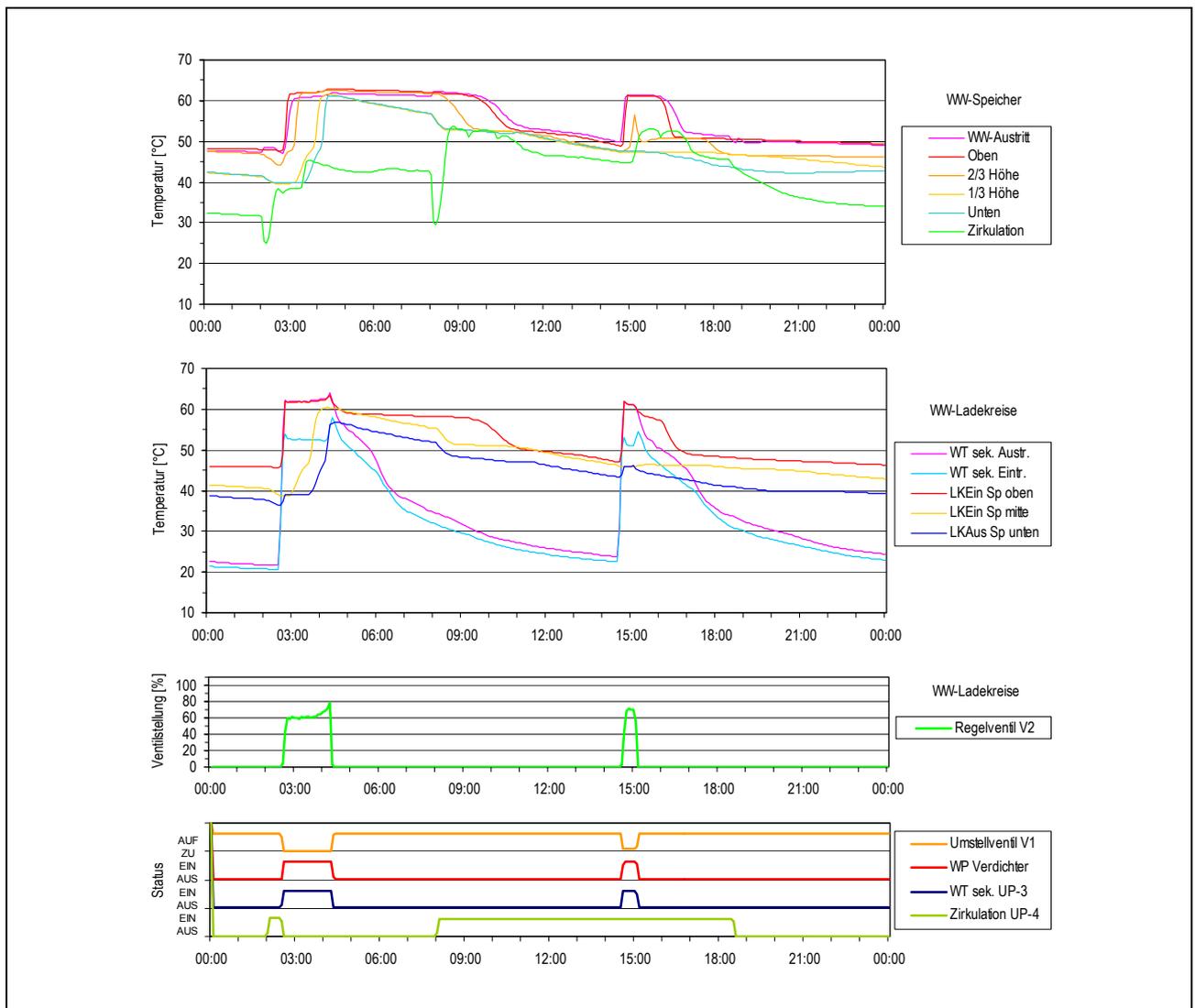


Abbildung 31: Kombination Antilegionellenbetrieb mit Schichtladung auf über 60°C am 4.5.2009 (Teil 2)

Die Messdaten in Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen einen typischen Tagesverlauf mit Antilegionellenbetrieb und Schichtladung auf über 60°C:

- Weil der Speicher nach dem Antilegionellenbetrieb vollständig auf über 60°C gefüllt ist, reicht eine einzige Nachladung mit Schichtladung pro Tag
- Der Unterschied zwischen Antilegionellenbetrieb und Schichtladung auf über 60°C ist lediglich, dass im Antilegionellenbetrieb der Speicher vollständig durchgeladen wird
- Die Tages-Arbeitszahl von 2,48 ist nicht allzuviel schlechter als die Kombination mit Stufenladung oder Schichtladung auf bloss 57°C (2,58...2,54)

Fazit: Der Antilegionellenbetrieb in Kombination mit Schichtladung auf über 60°C ist bei Anlagen mit höherem Legionellen-Risiko die optimale Lösung, weil damit die Empfehlungen des BAG relativ gut eingehalten werden können. Einzig die Empfehlung «Temperatur im warm gehaltenen Teil des Verteilnetzes immer über 55°C» konnte zeitweise nicht eingehalten werden, da der Einschaltpunkt bei T1 auf 50°C eingestellt war.

Antilegionellenbetrieb für erhöhte Anforderungen

Datum der Messung	18.5.2009	
Art der Ladung	Schichtladung (Voll-Ladung)	Schichtladung (Teilladung)
Regelgröße	T5 (Verfl.-Austrittstemp.)*	
Sollwert	63°C	62°C
Ladung EIN	T1 < 50°C* + Zeitprogramm	T1 < 55°C*
Ladung AUS	T4 > 56°C*	T2 > 58°C*
Speichertemperatur am Ende der Ladung	62,4...61,1°C	62,4...50,4°C
Tages-Arbeitszahl	2,44	

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

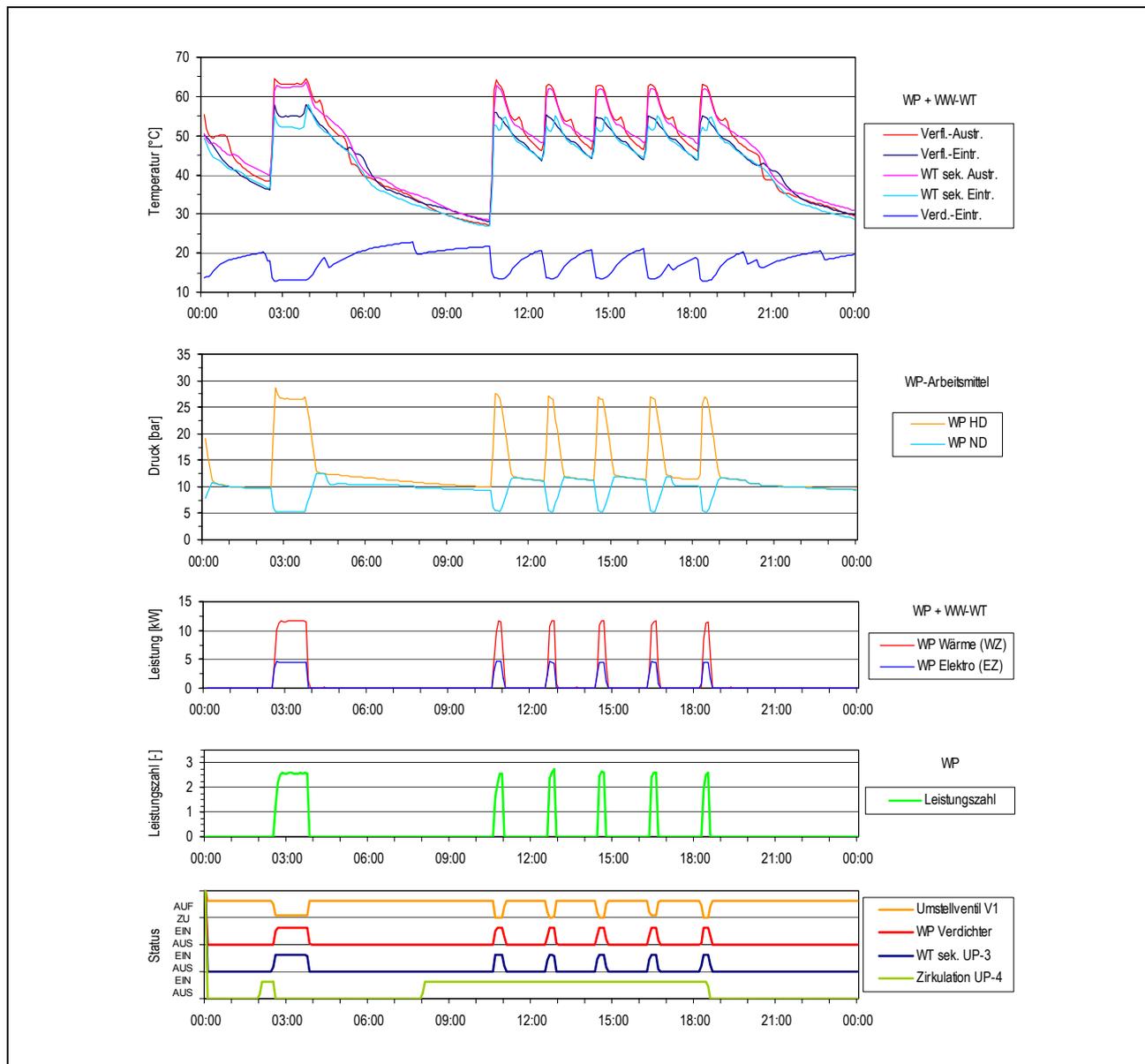


Abbildung 32: Antilegionellenbetrieb für erhöhte Anforderungen, d. h. Antilegionellenbetrieb und Schichtladung auf über 60°C mit erhöhtem Einschaltpunkt, so dass die Speicher-Austrittstemp. am Tag immer über 56,5°C liegt, 18.5.2009 (Teil 1)

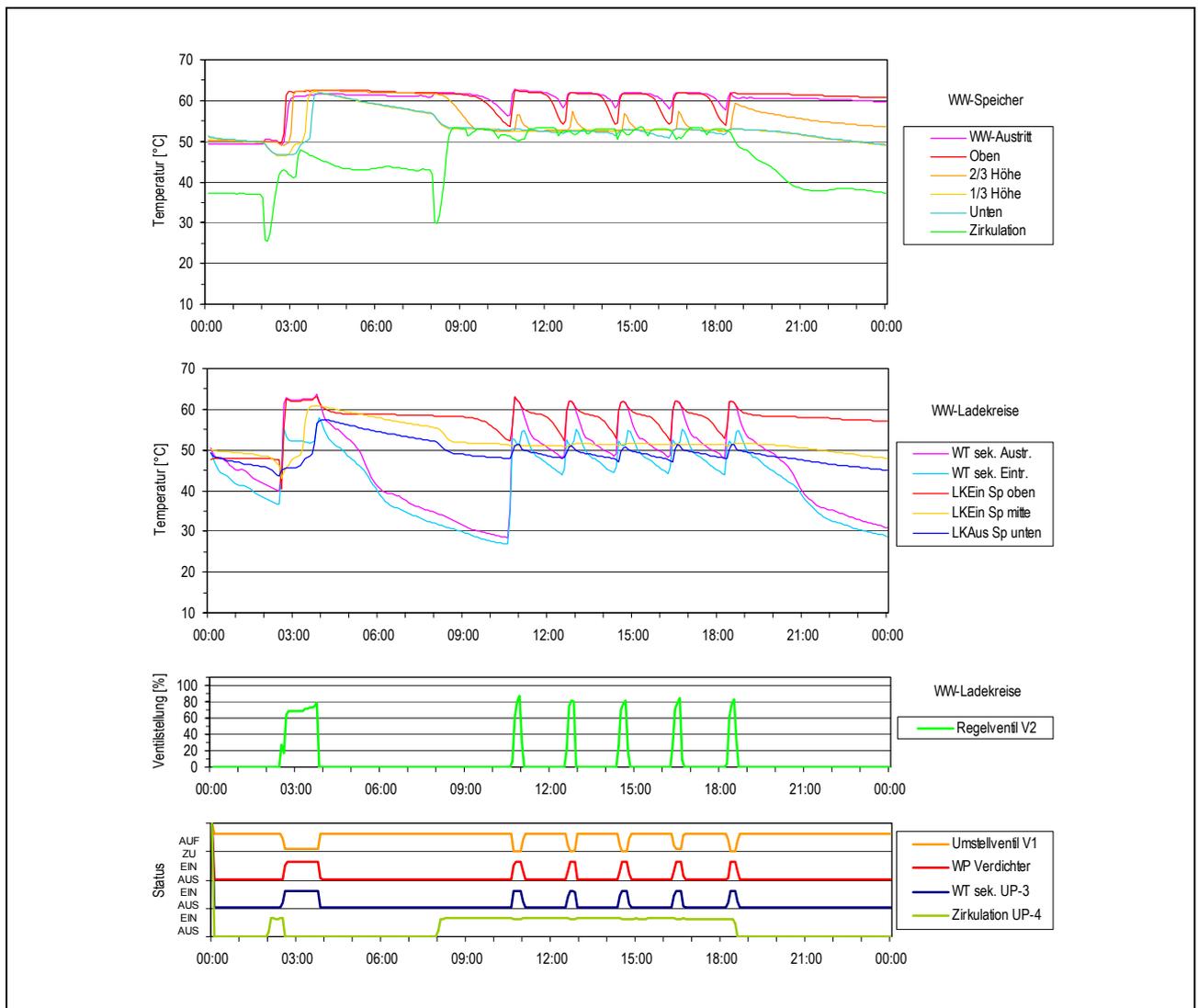


Abbildung 33: Antilegionellenbetrieb für erhöhte Anforderungen, d. h. Antilegionellenbetrieb und Schichtladung auf über 60°C mit erhöhtem Einschaltpunkt, so dass die Speicher-Austrittstemperatur am Tag immer über 56,5°C liegt, 18.5.2009 (Teil 2)

In Abbildung 32 und Abbildung 33 wurde untersucht, wie man den Betrieb mit den erhöhten Anforderungen in einem Spital oder Pflegeheim fahren könnte. Zwei Punkte müssen dabei beachtet werden:

- Damit bei einer Ladetemperatur von beispielsweise 60°C und einem Temperaturhub von 10 K über dem Verfüssiger die Wärmepumpe überhaupt laufen kann, bedingt dies für ein komplettes Durchladen des Speichers, dass im Speicher keine Temperaturschichten von über 50°C vorkommen dürfen.
- Die Warmwassertemperatur darf während des Tages nie unter 55°C fallen

Der erste Punkt könnte realisiert werden, indem vor dem Start des Antilegionellen-Ladebetriebs durch Umwälzung des Speichers Temperaturschichten von über 50°C eliminiert würden. Auf der Versuchsanlage war dies nicht notwendig, da der Speicher übers Wochenende bis zum Antilegionellenbetrieb am Montagmorgen um 02:30 Uhr genügend auskühlte. Der zweite Punkt konnte realisiert werden, indem der Einschaltpunkt bei T1 von 50°C auf 55°C erhöht wurde. Damit war problemlos ein störungsfreier Betrieb möglich, und die Warmwassertemperatur sank am Tag nie unter 56,5°C.

Fazit: Die Einhaltung der Empfehlungen des BAG konnte mit dieser Betriebsart nochmals verbessert werden. Die Empfehlung «Temperatur im warm gehaltenen Teil des Verteilnetzes immer über 55°C» konnte während des Tages immer eingehalten werden. Nur vor dem Antilegionellenbetrieb ist nach Mitternacht systembedingt kurzzeitig eine tiefere Temperatur notwendig. Bei Pflegeheimen und Spitälern ist im Einzelfall noch mit den Hygiene-Verantwortlichen abzuklären, welche zusätzlichen Massnahmen notwendig sind, wie z. B. periodische Temperaturmessungen, bakteriologische Kontrollen und alternative Desinfektionssysteme mit Ionisierung oder Ozonisierung).

5.4 Realer Wochenbetrieb für Bürogebäude

Datum der Messung 25.-31.5.2009

Art der Ladung Schichtladung (Voll-Ladung) Schichtladung (Teilladung) Stufenladung (Voll-Ladung)**

Regelgröße T5 (Verfl.-Austrittstemp.)* T5 (Verfl.-Austrittstemp.)*

Sollwert 63°C 62°C

Ladung EIN T1 < 50°C* + Zeitprogramm T1 < 51°C* T1 < 45°C oder T2 < 40°C

Ladung AUS T4 > 56°C* T2 > 58°C* T5 > 57°C

Speichertemperatur
am Ende der Ladung 62,4...61,1°C 62,7...37°C ca. 50°C

Wochen-Arbeitszahl 2,64

* Lage der Temperaturfühler siehe Abbildung 8

** Wochenende

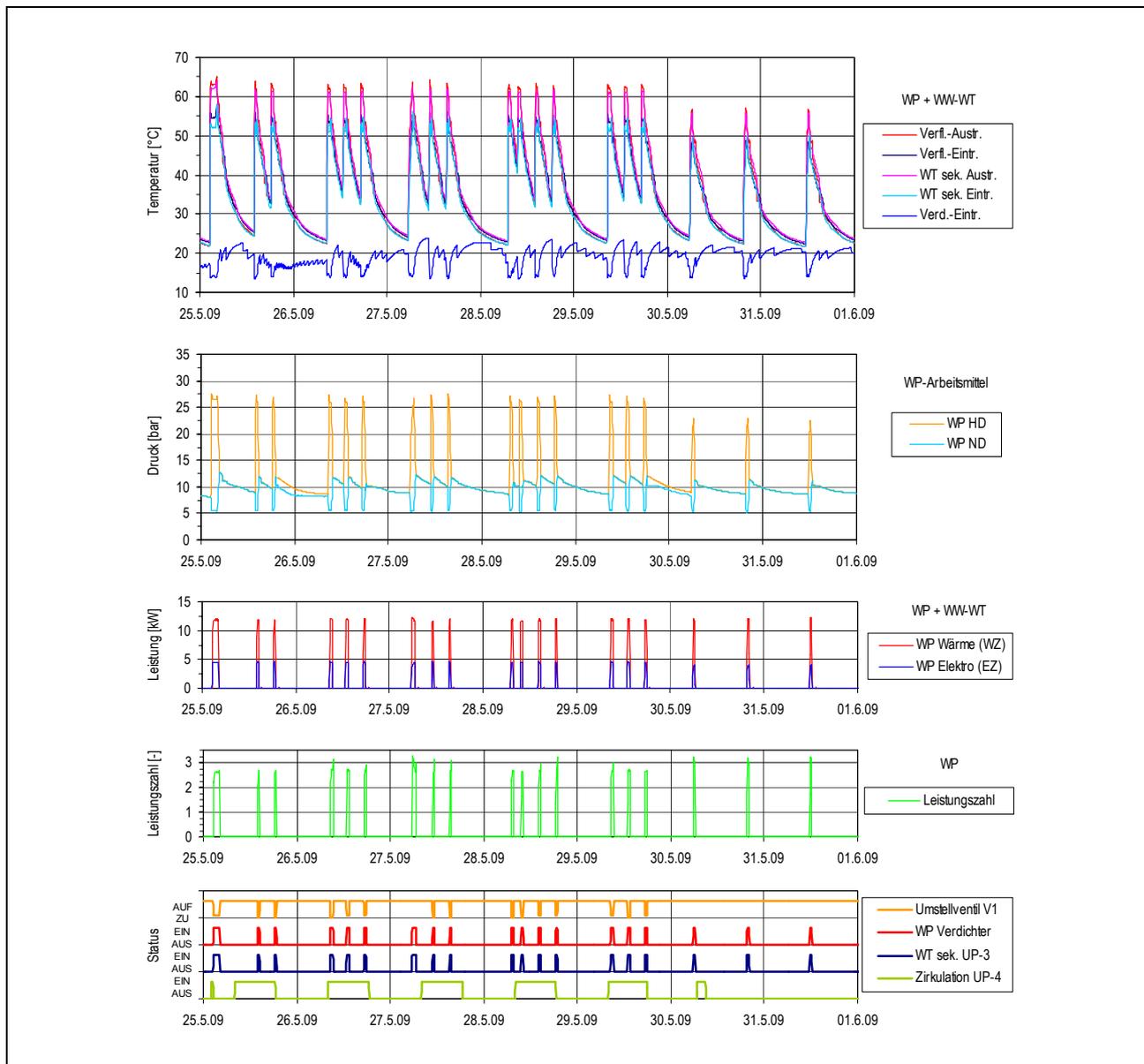


Abbildung 34: Realer Wochenbetrieb für Bürogebäude, 25.-31.5.2009 (Teil 1)

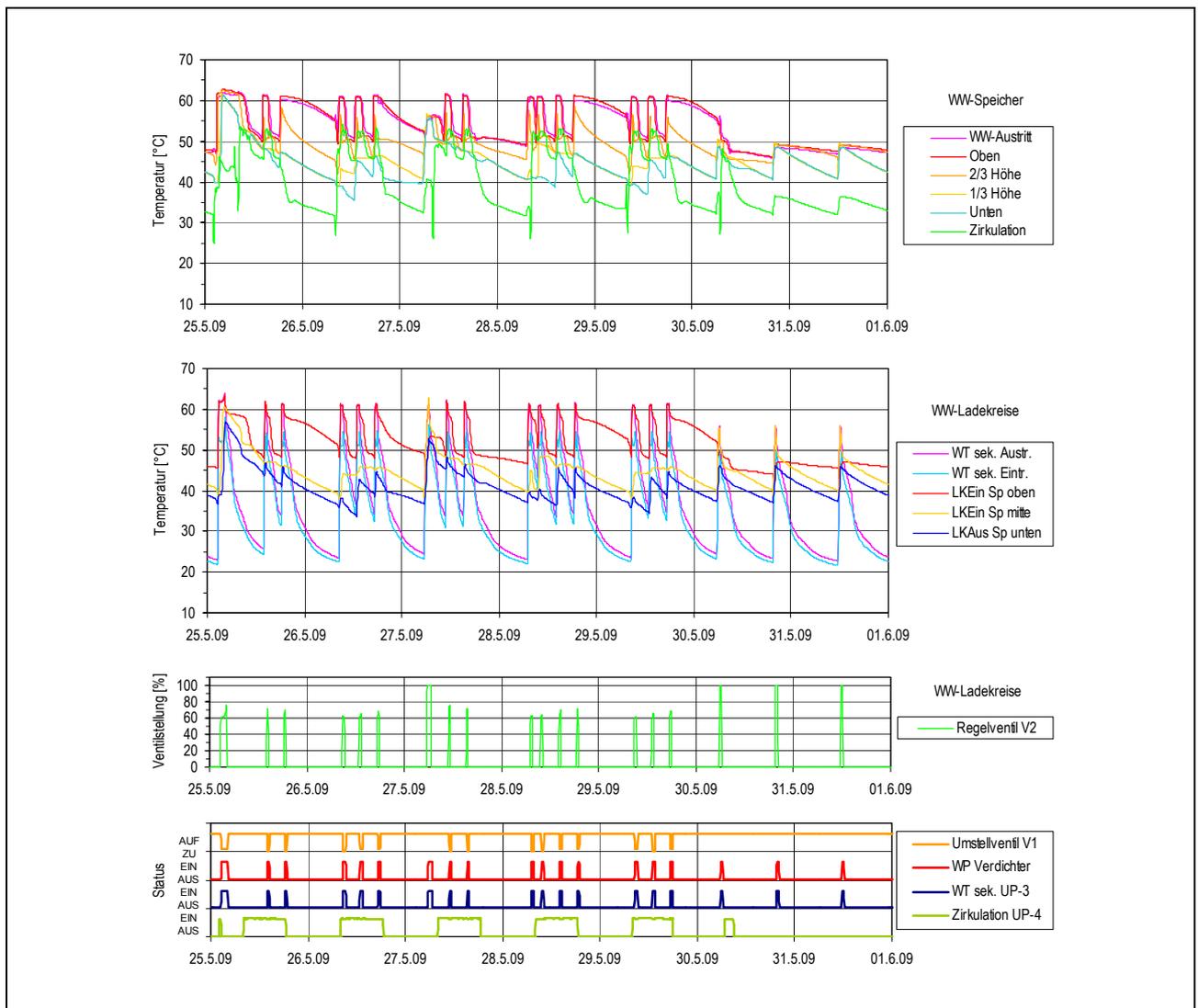


Abbildung 35: Realer Wochenbetrieb für Bürogebäude, 25.-31.5.2000 (Teil 2)

Bei der Versuchsanlage handelte es sich, wie gesagt, um ein Bürogebäude mit geringem Warmwasserbedarf, aber Auskühlung über die Zirkulation während des Tages. Die Vorgabe war, dass die Anlage an den Werktagen legionellensicher sein sollte. Dies wurde wie folgt realisiert:

- Antilegionellenbetrieb am Montagmorgen um 02:30 Uhr
- Schichtladung auf über 60°C an den Werktagen (Montag bis Freitag), Einschaltpunkt bei $T_1 < 51^\circ\text{C}$, damit lag die Warmwassertemperatur immer über 50,8°C
- Stufenladung auf ca. 50°C am Wochenende (Samstag/Sonntag), Einschaltpunkt bei $T_1 < 45^\circ\text{C}$ oder $T_2 < 40^\circ\text{C}$, damit sank die Warmwassertemperatur zeitweise auf etwa 47°C

Fazit: Mit den beschriebenen Betriebsarten kann für praktisch jedes Bedürfnis ein geeigneter Wochenbetrieb gefahren werden.

5.5 Spezielle Probleme

Zirkulation

Praktisch alle zentralen Warmwasserversorgungsanlagen werden mit einem Zirkulationssystem mit Zirkulationsleitung und Zirkulationspumpe betrieben. Dabei kommt die Zirkulationsleitung mit einer etwa 5 K tieferen Temperatur als das Warmwasser zurück (abhängig von der Länge der Zirkulationsleitung und der Auslegung der Zirkulationspumpe). Die Zirkulationsleitung muss dann wieder in den Speicher zurückgeführt werden, in der Regel in der Hälfte bis zwei Drittel Speicherhöhe.

Die Zirkulationsverluste führen zwangsläufig zur Auskühlung des Speichers und teilweise auch zu Umschichtungen: die Warmwassertemperatur am Austritt des Speichers sinkt damit kontinuierlich ab (z. B. von 60°C auf 50°C), bis der Einschaltpunkt erreicht ist und die Wärmepumpe erneut einschaltet.

Im Falle einer Stufenladung muss der ganze Speicher erneut durchgeladen werden. Eine Schichtladung hat hier den Vorteil, dass gezielt nur der heisse oberste Teil des Speichers nachgeladen werden kann.

Diese unangenehmen Eigenschaften des Zirkulationssystems kommen vor allem bei geringem Warmwasserverbrauch zum tragen, also typischerweise in Bürogebäuden, wie der vorliegenden Versuchsanlage. Bei normalem bis grossem Warmwasserverbrauch sind die Auswirkungen des Zirkulationssystems weniger gravierend.

Eine weitere Frage ist, ob im Antilegionellenbetrieb die Zirkulationspumpe eingeschaltet ist oder nicht, hier ergibt sich nämlich ein Widerspruch:

- Die Forderung «ganzer Nutzinhalt auf über 60°C» spricht für einen Antilegionellenbetrieb mit laufender Zirkulationspumpe
- Wenn aber die Zirkulation mit 5 K Temperaturdifferenz zurückkommt, kann sich im Extremfall eine Verflüssiger-Eintrittstemperatur von $62^{\circ}\text{C} - 5\text{ K} = 57^{\circ}\text{C}$ ergeben, was bei einer Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger von 10 K zu einer Hochdruckstörung führen würde

Hier muss ein Kompromiss eingegangen werden:

- Falls vor dem Legionellenbetrieb Temperaturschichten über 50°C vorkommen, den Speicher durch Einschaltung der Sekundärpumpe und Zirkulationspumpe durchmischen (auf der Versuchsanlage war dies nicht notwendig, da die Temperatur im Speicher nach dem Wochenendbetrieb immer tief genug war)
- Während des Legionellenbetriebs und 1 Stunde danach Zirkulationspumpe «aus»; damit wird erreicht, dass der ganze Nutzinhalt während mindestens 1 Stunde auf über 60°C war
- Nach dieser einstündigen Wartezeit Zirkulationspumpe «ein»; damit steht genügend Warmwasser zur Verfügung, um auch den warm gehaltenen Teil der Zirkulationsanlage auf über 60°C zu erhitzen (im Normalbetrieb werden im Laufe des Tages immer wieder die geforderten 60°C am Warmwasseraustritt erreicht)

Regelgrösse bei der Schichtladung

Bei der Schichtladung (inkl. Antilegionellenbetrieb) gibt es grundsätzlich drei mögliche Regelgrössen:

A Sekundärseitige Austrittstemperatur des Wärmetauschers

Sollwert = gewünschte Warmwassertemperatur

Vorteil: die komfortmässig wichtigste Grösse, nämlich die Warmwassertemperatur, wird direkt und damit so schnell und so genau wie möglich geregelt

Nachteil: langsamer, damit ist die Gefahr einer Hochdruckstörung speziell in der Anfahrphase grösser als bei B und C

B Verflüssiger-Austrittstemperatur

Sollwert = gewünschte Warmwassertemperatur + ca. 1 K (abhängig von der WärmetauscherAuslegung)

Vorteil: diejenige Grösse wird geregelt, an der man am frühesten erkennt, wenn eine Hochdruckstörung droht (der Arbeitsmitteldruck wäre noch besser, aber dieser steht in der Regel nicht als herausgeführte Messgrösse zur Verfügung) → schnelle Reaktion auf Störungen auf der Wärmepumpenseite

Nachteil: langsamere Reaktion auf Störungen auf der Warmwasserseite; schwierigere Regelstrecke als A, da sich hier zusätzlich der Wärmetauscher in der Regelstrecke befindet

C Verflüssiger-Eintrittstemperatur

Sollwert = gewünschte Warmwassertemperatur – Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger + ca. 1 K
Vorteil: die sicherste Methode zur Vermeidung einer Hochdruckstörung, weil frühestmöglich auf eine Störung reagiert werden kann

Nachteil: bezüglich Warmwassertemperatur viel ungenauer als B, weil die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger stark variabel ist (abhängig von der Quellen- und der Senktemperatur); es muss die grösste vorkommende Temperaturdifferenz in die Berechnung des Sollwertes eingesetzt werden

Für die vorliegenden Messungen gilt:

- Bei den Messungen in Abschnitt 5.1 wurde die sekundärseitige Austrittstemperatur des Wärmetauschers als Regelgrösse verwendet (Methode A)
- Bei den Messungen in den Abschnitten 5.2 bis 5.4 wurde die Verflüssiger-Austrittstemperatur als Regelgrösse verwendet (Methode B)
- Die Verflüssiger-Eintrittstemperatur als Regelgrösse wurde nicht weiter untersucht

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Für welche Warmwasserbereitungsanlagen gelten diese Empfehlungen?

- Für alle Wärmepumpenanlagen, bei denen die Raumheizung und die Warmwasserbereitung mit handelsüblichen Wärmepumpen, Wärmetauschern und Speichern realisiert werden sollen. Es wird davon ausgegangen, dass die Wärmepumpe für Verflüssiger-Austrittstemperaturen bis 65°C geeignet ist und der Betrieb Raumheizung/Warmwasserbereitung alternativ erfolgt (Sommer- und Winterbetrieb).
- Für Warmwasserbereitungsanlagen jeder Grösse, also Anlagen in Einfamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern, Schulhäusern, Schwimmbädern, Hotels usw.
- Die Empfehlungen gelten grundsätzlich auch für Pflegeheime und Spitäler. Hier ist jedoch im Einzelfall mit den Hygiene-Verantwortlichen abzuklären, welche zusätzlichen Massnahmen notwendig sind. Dies können beispielsweise periodische Temperaturmessungen, bakteriologische Kontrollen und alternative Desinfektionssysteme (Ionisierung, Ozonisierung) sein.

Wie soll die Anlage ausgelegt werden?

Es gelten die im Jahre 2007 in [1] [2] aufgestellten Grundsätze:

- Wärmeaustauschfläche mindestens 0,15 m²/kW. Eine grössere Wärmeaustauschfläche lohnt sich. Mit einer doppelt so grossen Wärmeaustauschfläche kann der Speicher mit Stufenladung auf eine 2...4 K höhere Endtemperatur geladen werden; diese wenigen Grade sind oft entscheidend.
- Auf der Primärseite des externen Wärmetauschers ist eine Temperaturdifferenz von 10 K notwendig, damit die maximale Verflüssiger-Austrittstemperatur von 65°C der Wärmepumpe ohne Hochdruckstörung erreicht wird.
- In jedem Falle muss die Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite mindestens gleich gross oder grösser sein als auf der Primärseite. Damit ist gewährleistet, dass die Austrittstemperatur auf der Sekundärseite möglichst nahe an die Eintrittstemperatur auf der Primärseite herankommt.
- Bei Stufenladung erfolgt die Einschaltung über einen Fühler im Speicher auf 2/3 Speicherhöhe und die Ausschaltung über die Verflüssiger-Austrittstemperatur, damit sich eine möglichst hohe Warmwassertemperatur ergibt.

Was muss bei der sekundärseitigen Laderegelung speziell beachtet werden?

- Für den PID-Regler der Laderegelung kommen zwei Regelgrössen in Frage:
 - direkt die Warmwassertemperatur als «Wunschgrösse»
 - indirekt die Verflüssiger-Austrittstemperatur mit dem Vorteil, dass damit schneller einer möglichen Hochdruckstörung entgegengewirkt werden kann (der Sollwert muss um die Temperaturdifferenz über dem Wärmetauscher höher eingestellt werden)

Im Rahmen des Projektes wurden beide Regelgrössen getestet (siehe Abschnitt 5.5), und beide Methoden haben sich als brauchbar erwiesen.

■ Regelungstechnisch ist es selbstverständlich von Vorteil, wenn die Zeitkonstante des Regelfühlers und die Laufzeit des Regelventils möglichst kurz sind. In der Versuchsanlage wurden in der ganzen Anlage die gleichen handelsüblichen Fühler und Regelventile verwendet, also keine speziell flinken Bauteile für die Laderegelung.

■ Grundsätzlich ist die Einstellung des PID-Reglers anspruchsvoll. Für die Betriebsoptimierung und die Einstellung der Sollwerte und Reglerparameter (P-Band, Nachstellzeit, Vorhaltezeit) ist genügender Sorgfalt und Aufwand einzuplanen. Insbesondere sollte das Regelverhalten zur Betriebsoptimierung gemessen und aufgezeichnet werden können.

■ Zu beachten ist, dass die Stellwirkung des Regelventils bei kaltem Wasser unten im Speicher grösser ist als bei warmem. Die optimalen Reglerparameter sind immer ein Kompromiss zwischen allen auf der Anlage tatsächlich vorkommenden Betriebsverhältnissen.

■ Damit bei einer Ladetemperatur von beispielsweise 60°C und einem Temperaturhub von 10 K über dem Verflüssiger die Wärmepumpe überhaupt laufen kann, bedingt dies für ein komplettes Durchladen des Speichers, dass im Speicher keine Temperaturschichten von über 50°C vorkommen dürfen. Deshalb müssen vor dem Start des Antilegionellen-Ladebetriebs durch Umwälzung des Speichers Temperaturschichten von über 50°C eliminiert werden.

■ Während des Legionellenbetriebs und 1 Stunde danach Zirkulationspumpe «aus» (siehe Abschnitt 5.5). Damit wird erreicht, dass der ganze Nutzinhalt während mindestens 1 Stunde auf über 60°C war. Nach dieser einstündigen Wartezeit Zirkulationspumpe «ein». Damit steht genügend Warmwasser zur Verfügung, um auch den warm gehaltenen Teil der Zirkulationsanlage mindestens 1 Stunde auf über 60°C zu erhitzen.

Wann ist Stufenladung und wann ist Schichtladung sinnvoller?

■ Bei Anlagen mit normalem Warmwasserverbrauch (z. B. Wohnungsbau) ist die Warmwassertemperatur im unteren Teil des Speichers tendenziell tief. Hier ist deshalb eine Stufenladung auf etwa 57°C im Normalbetrieb günstiger. Damit können Arbeitszahlen um 3,33 erzielt werden (siehe Untersuchungen 2007 [1] [2]).

■ Bei Anlagen mit geringem Warmwasserverbrauch, bei denen die Abkühlung des Speichers vorwiegend durch die Zirkulation erfolgt (typisch für Bürogebäude), ist eine Schichtladung günstiger. Für Warmwassertemperaturen von 57°C ist eine Arbeitszahl um 2,60 und für Warmwassertemperaturen über 60°C eine Arbeitszahl um 2,47 realistisch.

■ Die Schichtladung hat gegenüber der Stufenladung auch wesentliche Vorteile:

- Der gewünschte Sollwert steht mit Beginn der Ladung sofort zur Verfügung (bei der Stufenladung erst am Ende der Ladung)
- Abhängig von der Lage des Ausschaltfühlers kann gezielt nur ein Teil des Speichers geladen werden (bei der Stufenladung muss immer der ganze Speicher durchgeladen werden)
- Die Schichtladung ist ideal um Zirkulationsverluste auszugleichen

Welche der getesteten Betriebsarten erfüllen die Empfehlungen des BAG?

■ Die erste Empfehlung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) [3] «ganzer Nutzinhalt innerhalb 24 Stunden mindestens einmal während einer Stunde auf mindestens 60°C» kann nur mit dem Antilegionellenbetrieb erfüllt werden.

■ Die zweite Empfehlung des BAG «Temperatur im warm gehaltenen Teil des Verteilnetzes immer über 55°C» kann durch Antilegionellenbetrieb in Kombination mit einer Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60°C erfüllt werden. Die Temperaturdifferenz über der Zirkulation darf dabei nicht mehr als 5 K betragen und der Einschaltpunkt bei T1 muss genügend hoch eingestellt werden.

■ Die dritte Empfehlung des BAG «Temperatur an der Wasserentnahmestelle nicht unter 50°C» wird durch Antilegionellenbetrieb in Kombination mit Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60°C sicher erfüllt. Mit einer Stufen- oder Schichtladung auf 57°C kann die Empfehlung nur unter günstigen Verhältnissen knapp erfüllt werden.

Empfehlungen BAG	Stufenladung 57°C (Voll-Ladung)	Schichtladung 57°C (Teil-Ladung)	Schichtladung > 60°C (Teil-Ladung)	Antilegionellenbetrieb > 60°C (Voll-Ladung)
Ganzer Nutzinhalt täglich 1 Std. > 60°C	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	ERFÜLLT
Warm gehaltener Teil des Netzes > 55°C	nicht erfüllt	nicht erfüllt	ERFÜLLT	ERFÜLLT
Wasserentnahmestelle > 50°C	nur bedingt erfüllbar	nur bedingt erfüllbar	ERFÜLLT	ERFÜLLT

Tabelle 36: Zusammenfassung

Fazit: Die Warmwasserbereitung mit einer Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegeung kann alle drei Antilegionellen-Empfehlungen des BAG erfüllen. Die sicherste Lösung ist ein Antilegionellenbetrieb in Kombination mit einer Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60°C.

Wann sind die Empfehlungen des BAG einzuhalten?

■ Diesem Bericht wurden die Empfehlungen des BAG für «mittleres Risiko» zugrunde gelegt. Diese sind bei Anlagen mit zentraler Wassererwärmung immer einzuhalten, wie beispielsweise Mehrfamilienhäuser, Schulen, Sportanlagen, Schwimmbäder, Hotels usw.

■ Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser ohne zentrale Wassererwärmung, Schulen ohne Duschen und Bürogebäude werden durch das BAG zwar unter «geringes Risiko» eingestuft, praktisch ergeben sich durch die etwas weniger strengen Formulierungen aber kaum technische Vereinfachungen.

■ Als einzige Ausnahme sieht das BAG folgendes vor: «Wenn die sicheren Temperaturen wegen technischen Problemen oder zum Energiesparen nicht eingehalten werden, müssen in Gebäuden mit mittlerem Risiko alternative Desinfektionssysteme (Ionisierung, Ozonisierung) verwendet und/oder bakteriologische Kontrollen durchgeführt werden.» Diese Alternativen sind aber oft schwieriger durchzuführen als die Einhaltung der Temperatur-Empfehlungen.

Fazit: Ausreden wie «Wir wollen Energie sparen» oder «Andere halten die Vorschriften auch nicht ein» dürften im Schadenfall kaum juristischen Bestand haben. Schlussendlich ist immer der Besitzer oder Betreiber der Anlage verantwortlich. Um aber späteren Regressforderungen vorzubeugen, ist es für den Planer immer ratsam, die Risiken mit dem Auftraggeber sorgfältig abzuklären und entsprechende Massnahmen in die Planung einzubeziehen.

7. Literaturhinweise

- [1] Hans Mayer, Hans Rudolf Gabathuler, Thomas Baumgartner: Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe. Bern: Bundesamt für Energie, Juli 2007. Download: www.waermepumpe.ch (Forschung & Entwicklung / Berichte / Systemoptimierung) und www.energieforschung.ch
- [2] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer: Optimierte Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen. In: News aus der Wärmepumpenforschung. 14. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamtes für Energie. Hochschule für Technik und Informatik, Burgdorf, 13. Juni 2007.
- [3] Legionellen und Legionellose. Modul 12 Sanitäre Installationen. Modul 13 Sonderfall Spitäler und Pflegeheime. Bern: Bundesamt für Gesundheit, März 2009. Download: www.bag.admin.ch
- [4] Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer, Thomas Afjei: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen. Teil 1: STASCH-Planungshilfen. Bern: Bundesamt für Energie, 2002. Download: www.waermepumpe.ch (Forschung & Entwicklung / Berichte / Systemoptimierung) und www.energieforschung.ch
- [5] Thomas Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen. Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen. Bern: Bundesamt für Energie, 2002. Download: www.waermepumpe.ch (Forschung & Entwicklung / Berichte / Systemoptimierung) und www.energieforschung.ch