

## Abschlussbericht

### Verbundvorhaben:

# Entwicklung eines ökologisch konsequenten Systemreglers mit Energiemonitoring und Diagnosefunktion

Kurzbezeichnung: ÖKOKO

#### *Kontakt*

Dipl. Ing. Andreas Bühler

Ingenieurbüro Bickele und Bühler GmbH (IBB)

[a.buehler@ibb-stuttgart.de](mailto:a.buehler@ibb-stuttgart.de)

Tel. 0711 89 66 89 66

#### *Weitere Autoren*

Dr. Christiane Kettner, Ritter Energie- und Umwelttechnik (REUT)

Dipl.-Ing. Kai Wendker (REUT)

M. Sc. Florian Ottinger (REUT)

Dipl. Ing. Tamara Theimel, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und  
Energiespeicherung (IGTE)

Dr.-Ing. Henner Kerskes (IGTE)

Version vom 29.10.2019

# 1 Projektkennblatt

der

## Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	<b>31935/01</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>357.533 €</b>
----	-----------------	---------	-------------	-------------	------------------

**Antragstitel** Systemregler mit Energiemonitoring und Diagnosefunktion

**Stichworte**

Energie, Energieeffizienz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>30 Monate</b>	<b>13.10.2014</b>	<b>31.12.2018</b>	

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Ingenieurbüro Bickele und Bühler (IBB) St. Pöltener Str. 70 70469 Stuttgart	Tel	0711-896689-66
		Fax	0711-896689-71
		Projektleitung	Andreas Bühler
		Bearbeiter	Andreas Bühler

**Kooperationspartner** Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (igte)  
Pfaffenwaldring 10, 70550 Stuttgart

Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG (REUT)  
Kuchenäcker 2  
72135 Dettenhausen

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Das Gesamtziel des Projekts ist die Entwicklung eines ökologisch konsequenten Systemreglers, mit dessen Hilfe hohe solare Deckungsanteile bei der Gebäudeheizung, sowie deutliche Einsparungen an Primärenergie erzielt werden. Darüber hinaus soll der Systemregler durch die transparente, einfache Bedienung und gezielte Änderung der Regelstrategie sowie durch eine hohe Akzeptanz der Bewohner zusätzlichen Anreiz bieten, durch angepasstes Nutzungsverhalten noch mehr Energie einzusparen. Ein wichtiger Teil des Gesamtziels ist dabei die Qualitätssicherung durch die automatische Überwachung des Regelbetriebs mittels einer Diagnosefunktion und dem Energiemonitoring.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das Vorhaben umfasst die Schwerpunktaufgaben:

- Simulation, Entwicklung und Optimierung des Reglers im Labormaßstab
- Prototypfertigung
- Entwicklung und Umsetzung einer App zur Reglerbedienung
- Feldtestuntersuchung des Reglers zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit
- Ermittlung und Aufzeigen der Potenziale des neuen Reglers hinsichtlich Energieeinsparung, Energiemonitoring und Diagnosefunktion

Randbedingungen für diese Schwerpunktaufgaben sind die einfache Integrierbarkeit in bestehende Heizungsanlagen, für den Markt akzeptable zusätzliche Anschaffungskosten, Berücksichtigung der Installationstauglichkeit, Nachrüstbarkeit im Altbau, Betriebssicherheit, sowie ein deutlich verbesserter Benutzerbedienkomfort (Bedienung und Visualisierung).

## ***Ergebnisse und Diskussion***

- Innerhalb des Projektes wurde ein Heizungsregler für das 1-2 Familienhaus mit einem neuen bedarfsgeführten Heizkonzept entwickelt und in zehn bewohnten Gebäuden getestet. Anhand des gemessenen Volumenstroms im Heizkreis wird der aktuelle Heizbedarf des Gebäudes ermittelt und die Heizkreisvorlauftemperaturen, sowie die Pumpenleistung entsprechend angepasst. Ist der Heizbedarf sehr gering, schaltet sich die Heizung aus und bei steigendem Bedarf automatisch wieder ein. Dies bietet Vorteile gegenüber dem bisherigen Stand der Technik, bei dem es durch zu hoch (oder nicht) eingestellte Heizkennlinien oder einer schlechten Korrelation zwischen Heizbedarf und Außentemperatur zu einem unnötigen Mehrverbrauch kommt.
- Die Algorithmen-Entwicklung für den Regler wurde mit der Simulationssoftware ColSim durchgeführt. Hierzu wurde ein Gebäudemodell mit fünf thermischen Zonen aufgebaut und diese mit einer Hydrauliksimulation gekoppelt. Als Datengrundlage für die Entwicklung des Simulationsmodells wurden die aus dem redundanten Monitoring gewonnenen Messdaten von REUT und IGTE zusammengefasst und in ein von ColSim unterstütztes Format umgewandelt.
- Es zeigte sich, dass bei Feldversuchsstart die Entwicklung nicht abgeschlossen war und dass kontinuierlich Fehlerkorrekturen und Funktionsänderungen notwendig waren. Größere Anpassungen waren eine separate Behandlung von Fußbodenheizungen aufgrund der taktgesteuert auf- und zufahrenden PWM-Ventile, die Pumpenansteuerung bei annähernd geschlossenen Ventilen, sowie die Abstimmung zwischen Komfort (schneller Anstieg der Vorlaufsoltemperatur bei erhöhtem Wärmebedarf) und Ökologie (langsamerer Anstieg, um Überheizung der Räume zu vermeiden).
- 
- Ein weiteres Entwicklungsthema war eine optimierte Pufferbeladung mit dem Gasbrennwertkessel, bei der es nicht zu deutlich höheren Kessel-Rücklauftemperaturen und damit schlechterem Brennwertnutzen kommt als beim Heizen ohne Puffer. Dies ist wichtig, da der Puffer/Kombispeicher in Verbindung mit Gasbrennwert meist nur aufgrund der Solaranlage angeschafft wird, daher müssen im Prinzip die größeren Speicherverluste und der Gasmehrverbrauch aufgrund der Einbußen beim Kesselwirkungsgrad vom Solargewinn abgezogen werden.
- Um die Genauigkeit der für den Regler verbauten Sensoren zur Wärmemengenerfassung zu überprüfen und das neue Regelkonzept zu bewerten, wurde bei zwei Feldtestgebäuden vor und nach der Einführung des neuen Reglers ein redundantes Monitoring mit hochgenauer Messtechnik des IGTE durchgeführt. Vor dem Einsatz im Feld wurden die Sensoren zudem einem Vergleich mit kalibrierter Labormesstechnik unter Laborbedingungen unterzogen. Am Ende des Projektzeitraumes betrug die Genauigkeit je nach Anlage, bilanziertem Kreis und Jahreszeit zwischen 5 und 25 %. Bei geringeren Wärmeströmen außerhalb der Heizperiode bzw. in der Übergangsphase wirkt sich eine Abweichung, die absolut die gleiche Größe hat, als relative Größe (bezogen auf die Gesamtmenge) stärker aus. Insgesamt ergab sich eine annehmbare Genauigkeit für die Anwendung.
- Aus dem Projekt ergaben sich verschiedenste Anforderungen an die Entwicklung einer neuen Hardware. Für die Hardware wurde ein neues Platinen-Layout erstellt und entsprechende Hardware zur Verfügung gestellt. Durch die Anforderungen an die Bedienbarkeit und um die Akzeptanz und Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen, ergaben die folgende Anordnung der Anzeige-/ Bedienelemente, der SD-Memory Card, der Anzeige LED's sowie der Taste zur Aktivierung des WLAN Accespoints.
- Zur Reglerbedienung wurde ein App für die gängigen Betriebssysteme der Firmen Apple und Google entwickelt. Mit der App können von unterwegs oder zuhause am Regler Einstellungen vorgenommen oder der Betrieb überprüft werden. Neben dem Zugriff auf die Reglerparameter stellt die App die gemessenen Wärmemengen in mehreren Balkendiagrammen dar und bietet eine grafische Übersicht des kompletten Heizungssystems. Die Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen Regler und App wurde speziell für Mikrocontroller mit wenig Rechenleistung entwickelt.
- Zur Bewertung des Reglers wurden aus den Daten des redundanten Monitorings Tages- und Monatsbilanzen erstellt und Bewertungsgrößen, wie der solare Deckungsgrad bestimmt. Außerdem wurden die Datenpunkte nach Tageseinstrahlungssumme sortiert, um festzustellen, ob sich der solare Deckungsgrad bei gleichen Einstrahlungs- und Umgebungsbedingungen verbessert hat. Die Bewertung zeigte, dass sich die Regelung durchaus vorteilhaft für den Deckungsgrad auswirkte an Tagen mit einer geringeren Tagesstrahlungssumme. Dabei war die Verbesserung bei der Feldtestanlage 2 nicht so deutlich zu erkennen wie bei der Feldtestanlage 1.

- Es zeigte sich, dass eine energetische Bewertung der Regelung anhand der im Feldversuch ermittelten Daten aufgrund von unterschiedlichen Randbedingungen - vor allem dem Nutzerverhalten - nicht zufriedenstellend durchgeführt werden konnte. Daher wurden in der Simulation Vergleichsrechnungen zur rein außentemperaturgeführten Heizung durchgeführt mit ansonsten identischen Modellparametern. Gegenüber der klassischen Regelung mit sehr gut eingestellter Heizkennlinie, was in der Praxis eher die Ausnahme darstellt, konnte der neue Heizungsregler bei einer vergleichbaren Raumtemperatur ca. 3 % einsparen. Verglichen mit einer schlecht eingestellten Heizkennlinie beläuft sich die Einsparung auf 5,2 – 6,4 %, je nach Kesseltyp. Die Hauptgründe für die Einsparung sind der bessere Kesselwirkungsgrad, die geringeren Verteilverluste der Heizwärme (da die Heizung während der Nachtabenkung immer wieder ganz abschaltet), die geringeren Speicherverluste durch die im Mittel niedrigere Puffertemperatur und der höhere Solarertrag.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

- In der Projektlaufzeit wurden keine Ergebnisse veröffentlicht. Dies wurde nicht als sinnvoll erachtet, da der Systemregler, wie auch die Simulationsmodelle und Bewertungskriterien kontinuierlich weiterentwickelt wurden. Erst mit Abschluss des Projektes stehen Ergebnisse und Erkenntnisse zur Verfügung, die für Dritte nachvollziehbar sind und einen entsprechenden Informationsgehalt bieten. Es ist geplant, im Nachgang zum Projekt zusammenfassende Ergebnisse zu veröffentlichen.

### **Fazit**

- Viele Heizsysteme weisen erhebliche Mängel auf (kein hydraulischer Abgleich, Ventilsteuerung funktioniert nicht richtig, Zeitprogramme der Ventile widersprechen denen des Reglers etc.). Diese Mängel werden mit einer konventionellen Regelung meist nicht bemerkt, da die Pumpe ständig läuft und die Vorlauftemperatur immer bereitgestellt wird, auch wenn auf diese Art Energie verschwendet wird. Ein bedarfsgeführtes Heizkonzept bietet hier Einsparpotential, benötigt aber für den optimalen Betrieb funktionierende Ventile, da an diesen der Bedarf abgelesen wird.
- Eine energetische Bewertung anhand der Messdaten im Feld erwies sich als schwierig. Die energetische Bewertung erfolgte daher hauptsächlich in der Simulation. Hier konnte gezeigt werden, dass mit dem neuen Regelprinzip, verglichen mit einem klassischen Regler, mit sehr gut eingestellter Heizkennlinie (in der Praxis eher unüblich), 3 % eingespart werden kann. Verglichen mit einer schlecht eingestellten Heizkennlinie beläuft sich die Einsparung auf 5,2 – 6,4 %, je nach Kesseltyp.
- Die Genauigkeit der reglereigenen Wärmemengenzählung wurde durch das redundante Monitoring auf 5 – 25 % bestimmt. Im Kesselkreis war die Genauigkeit an der oberen Grenze der angegebenen Genauigkeit, da hier kein Fühlerkalibrierprogramm durchgeführt werden konnte. Insgesamt ergab sich eine annehmbare Genauigkeit für die Anwendung.
- Zum Projektende liegen vom Regler feldtesterprobte Muster vor, die für den Transfer in die Serienproduktion geeignet sind. Vor einem Übergang in die Serie muss die Stabilität der Verbindung zwischen App und Regler verbessert werden.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	EINLEITUNG .....	1
1.2	ZUSAMMENFASSUNG .....	1
<b>2</b>	<b>ENTWICKLUNG: ALGORITHMEN .....</b>	<b>4</b>
2.1	STATUS QUO .....	4
2.2	DER ÖKOLOGISCH KONSEQUENTE ANSATZ .....	5
2.3	DIE VOLUMENSTROMGEFÜHRTE HEIZUNG .....	5
2.3.1	<i>Volumenstromgeführte Heizung mit Radiatorheizkörpern .....</i>	<i>6</i>
2.3.2	<i>Adaption der Vorlaufsolltemperatur bei der Fußbodenheizung .....</i>	<i>7</i>
2.3.3	<i>Raumeinfluss .....</i>	<i>8</i>
2.3.4	<i>Die Anstiebsfunktion .....</i>	<i>9</i>
2.3.5	<i>Nachtabenkung .....</i>	<i>10</i>
2.3.6	<i>Morgendliches Aufheizen .....</i>	<i>10</i>
2.3.7	<i>Vorteile der volumenstromgeführten Heizung .....</i>	<i>11</i>
2.4	OPTIMIERUNG DER KESSELANSTEUERUNG .....	12
2.4.1	<i>0-10V-Signal .....</i>	<i>12</i>
2.4.2	<i>Anfahrentlastung .....</i>	<i>12</i>
2.4.3	<i>Flexible Nachlaufzeit .....</i>	<i>12</i>
2.4.4	<i>Neue Kesselpumpenansteuerung .....</i>	<i>12</i>
2.4.5	<i>Schaltdifferenzen bei der Pufferbeladung .....</i>	<i>13</i>
2.4.6	<i>Kontinuierliche Pufferbeladung .....</i>	<i>15</i>
2.4.7	<i>Dynamische Kesselsollwerterhöhung .....</i>	<i>15</i>
2.4.8	<i>Warmwasservorrangschaltung .....</i>	<i>18</i>
2.5	VORRANG FÜR DIE SOLARANLAGE .....	18
2.6	ENERGIEMONITORING .....	19
2.7	SOLARER AUTARKIEGRAD .....	20
2.7.1	<i>Berechnung der Speicherverluste .....</i>	<i>20</i>
2.7.2	<i>Berechnung des modifizierten Solarertrags .....</i>	<i>20</i>
2.8	DIAGNOSEFUNKTIONEN .....	21
2.9	ÜBERSICHT DER ZU REGELNDEN HEIZUNGSSYSTEME .....	22
<b>3</b>	<b>ENTWICKLUNG: SOFTWAREARCHITEKTUR .....</b>	<b>23</b>
3.1	DAS BASISSYSTEM .....	24
3.2	DIE BIBLIOTHEK .....	25
3.3	DIE APPLIKATION .....	27
<b>4</b>	<b>ENTWICKLUNG: REGLERHARDWARE .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>ENTWICKLUNG: BEDIENOBERVERFLÄCHE .....</b>	<b>30</b>
5.1	ANFORDERUNGEN AN DIE BEDIENOBERVERFLÄCHE .....	30
5.2	ENTWICKLUNG APP - BEDIENOBERVERFLÄCHE .....	30
5.3	APP – PROGRAMMIERUNG .....	31
5.4	APP LAYOUTS .....	31
<b>6</b>	<b>ERPROBUNG IN DER SIMULATION .....</b>	<b>34</b>
6.1	SIMULATION VON HEIZUNGSSYSTEMEN MIT COLSIM .....	34
6.2	COLSIM GEBÄUDEMODELL .....	36
6.3	COLSIM HYDRAULIKLÖSER .....	39

6.4	RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE SIMULATION .....	40
6.5	BEWERTUNGSKRITERIEN .....	41
6.6	VARIATIONSRECHNUNGEN.....	43
6.7	VERGLEICHSRECHNUNGEN MIT STANDARD-REGLER .....	44
<b>7</b>	<b>ERPROBUNG IM FELD .....</b>	<b>46</b>
7.1	REDUNDANTES MONITORING .....	46
7.2	FELDVERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	57
7.2.1	<i>Entwickeln einer Systematik zur Beurteilung der Qualität eines Heizsystems .....</i>	<i>58</i>
7.3	VEREINFACHTES MONITORING .....	67
7.3.1	<i>Verbesserung der Messgenauigkeit im vereinfachten Monitoring .....</i>	<i>68</i>
7.4	ERPROBUNG DES REGLERS IM FELD .....	71
7.4.1	<i>Erkenntnisse aus dem Feldversuch bzgl. der Erwartungen der Betreiber .....</i>	<i>71</i>
7.4.2	<i>Technische Erkenntnisse aus dem Feldversuch .....</i>	<i>73</i>
7.4.3	<i>Weiterentwicklungen der Regelung während des Feldversuchs.....</i>	<i>74</i>
7.4.4	<i>Fazit des Feldversuchs .....</i>	<i>75</i>
7.5	ERPROBUNG DER APP IM FELD.....	76
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>81</b>
9.1	WEITERE ANLAGENHYDRAULIKEN .....	81
9.2	WEITERE AUFTRAGUNGEN ZUR BEWERTUNG.....	83
9.2.1	<i>Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Temperaturdifferenz .....</i>	<i>83</i>
9.2.2	<i>Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Strahlungssumme .....</i>	<i>85</i>
9.3	ENERGIEVERLUSTE BEI FELDTESTANLAGE 2.....	87
9.3.1	<i>Energieverluste durch Inrohr-Zirkulation.....</i>	<i>87</i>
9.3.2	<i>Energieverluste durch defekte Rückschlagklappe.....</i>	<i>88</i>
9.4	DIREKTER VERGLEICH DER ROH-MESSDATEN WÄHREND DES FELDVERSUCHES.....	89

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1 Heizbetrieb Radiatorheizung.....	7
Abb. 2.2 Heizbetrieb Fußbodenheizung.....	8
Abb. 2.3 Anschiebetrieb .....	9
Abb. 2.4 Pufferbeladung ohne Sollwerterhöhung .....	14
Abb. 2.5 Pufferbeladung mit „Standard“ Heizungsregler .....	14
Abb. 2.6 Pufferbeladung mit dynamischer Sollwerterhöhung und anschließender kontinuierlicher Pufferbeladung, Heizkreisvolumenstrom = 15 l/min .....	18
Abb. 2.8 Anlagenhydraulik Kombispeicher: Thermische Solaranlage (links), Kombispeicher mit Frischwasserstation (mittig), Wärmeerzeuger und zwei gemischte Heizkreise (rechts).....	22
Abb. 3.1 Übersicht Softwarestruktur.....	23
Abb. 3.2 Funktionsblöcke des Basissystems .....	24
Abb. 3.3 Funktionsblöcke der Bibliothek .....	25
Abb. 3.4 Aufgaben des Wrappers.....	26
Abb. 3.5 Übersicht der Module der Applikation .....	27
Abb. 3.6 Aufgaben des Modul System.....	28
Abb. 5.1 Kommunikationsübersicht Regler – App .....	31
Abb. 5.2 Layout „Home“: Heizungssteuerung .....	32
Abb. 5.3 Anzeige einer Störung: Anlagenbetreiber (links) und Fachhandwerker (rechts) .....	32
Abb. 5.4 Layout „Werteliste“, Einstellungen ändern (links und mittig) und Anzeige Hilfetext (rechts).....	32
Abb. 5.5 Layout „Information“, und Ersteinrichtung (rechts) .....	33
Abb. 5.6 Layout „Energistatistik“ Heizung.....	33
Abb. 6.1 Schema des ColSim Programmaufbaus .....	34
Abb. 6.2 Graphische Darstellung einer solarthermischen Anlage in XFIG .....	35
Abb. 6.3 Darstellung des Zweisternmodells einer thermischen Zone [13].....	36
Abb. 6.4 Aufbau Simulationsmodell Erdgeschoss und Obergeschoss .....	37
Abb. 6.5 Querschnitt Gebäudemodell .....	37
Abb. 6.6 Hydraulische Verschaltung.....	37
Abb. 6.7 Aufbau einer thermischen Zone mit Wärmeabgabesystem in ColSim .....	38
Abb. 6.8 Primärenergiebedarf Pelletskessel für verschiedene Ein- und Ausschaltdifferenzen für die Pufferbeladung.....	43
Abb. 7.1 Verteilung der Messtechnik Feldtestgebäude 1 .....	47
Abb. 7.2 Verteilung der Messtechnik Feldtestgebäude 2 .....	47
Abb. 7.3 Erfasste Raumtemperaturen in Feldtestgebäude 1 (links) und Feldtestgebäude 2 (rechts).....	48
Abb. 7.4 Relative Abweichung des Volumenstromes der verschiedenen Huba Sensoren bei 2,5 – 13,3 l/min bzw. 150 – 800 l/h .....	49
Abb. 7.5 Volumenströme des Huba Sensors: DN10 2-40l/min im Vergleich mit Coriolis-Durchflussmesser (rot) .	49
Abb. 7.6 Volumenstrom des Hubasensors DN10 in l/min mit Messbereich 1,8 – 32 l/min mit Angabe der maximalen Abweichung laut Hersteller (Min & Max) .....	50
Abb. 7.7 Vergleich der Temperaturen der Huba-Sensoren (blau: DN8, grün: DN10) des NTC-Sensors (gelb) mit den kalibrierten Pt100 Sensoren (rot und grau).....	51
Abb. 7.8 Temperatur des DN10 2-40 l/min (blau) im Vergleich zu den kalibrierten Pt100 Sensoren (rot und gelb) inkl. der minimalen und maximalen (gestrichelt) Abweichungen laut Hersteller.....	52
Abb. 7.9 Speicherbilanz mit Wärmequellen (links) und Wärmesenken (rechts).....	54
Abb. 7.10 Bilanz der monatlichen Wärmemengen des Feldtestgebäudes 1. Zugeführte Energien als positive Werte, abgeführte Energien als negative Werte .....	55
Abb. 7.11 Bilanz der monatlichen Wärmemengen des Feldtestgebäudes 2. Zugeführte Energien als positive Werte, abgeführte Energien als negative Werte .....	56
Abb. 7.12 Feldtestgebäude 1 - Von oben links: Periode 1 – 5 Nachheizung mit Pelletskessel über Temperaturdifferenz sortiert nach aufsummierter Strahlung (0-2,5 kWh pro m <sup>2</sup> und Tag).....	59

Abb. 7.13 Feldtestgebäude 2 - Von oben links: Periode 1 – 5 Nachheizung mit Gaskessel über Temperaturdifferenz sortiert nach aufsummierter Strahlung (0-2,5 kWh pro m <sup>2</sup> und Tag).....	59
Abb. 7.14 Feldtestgebäude 1 – von oben links nach unten rechts: Periode 1- 5: Nutzenergie (Q_Nutz) über eingespeicherter Energie (Q_in).....	60
Abb. 7.15 Feldtestgebäude 2 – von oben links nach unten rechts: Periode 1- 5: Nutzenergie (Q_Nutz) über eingespeicherter Energie (Q_in).....	61
Abb. 7.16 Feldtestgebäude 1 -- Nutzenergie (Q_Nutz) über fossil erzeugter Energie (Q_Kessel).....	62
Abb. 7.17 Feldtestgebäude 2 -- Nutzenergie (Q_Nutz) über fossil erzeugter Energie (Q_Kessel).....	63
Abb. 7.18 Feldtestanlage 1 - Solarer Deckungsgrad Sold.....	63
Abb. 7.19 Feldtestanlage 2 - Solarer Deckungsgrad Sold.....	64
Abb. 7.20 Komfortraumtemperatur (grau) mit zugelassener oberer Toleranzgrenze (rot) und unterer Toleranzgrenze (blau).....	65
Abb. 7.21 Feldtestgebäude 1: Auftragung der Wohnzimmertemperatur (Führungstemperatur der konventionellen Regelung) über der Außentemperatur.....	66
Abb. 7.22 Feldtestgebäude 2: Auftragung der Wohnzimmertemperatur (Führungstemperatur der konventionellen Regelung) über der Außentemperatur.....	66
Abb. 7.23 Vereinfachtes Monitoring in einer typischen Feldversuchsanlage.....	67
Abb. 7.24 Relativer Fehler der Wärmemengenzählung Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für zwei verschiedene Volumenströme.....	68
Abb. 7.25 Temperaturabhängigkeit des Messfehlers des Heizkreisvorlauffühlers, ermittelt durch Vergleich mit Institutsmesstechnik in einem der Feldversuchshäuser mit redundanter Messtechnik.....	69
Abb. 7.26 Temperaturabhängigkeit des Messfehlers des Heizkreisrücklauffühlers, ermittelt durch Vergleich mit Institutsmesstechnik in einem der Feldversuchshäuser mit redundanter Messtechnik.....	69
Abb. 7.27 Heizbetrieb im Feldversuch.....	72
Abb. 7.28 Vergleich Vorlaufsolltemperaturen von außentemperaturgeführter und volumenstromgeführter Heizung bei einer Feldanlage.....	73
Abb. 7.29 Probleme bei der Bedienung des Reglers.....	77
Abb. 7.30 Beeinflussung der Nutzer durch Visualisierung der Wärmemengen.....	78
Abb. 7.31 Einstellung der Feldversuchsteilnehmer zur Abwägung zwischen Komfort und Umweltschutz.....	78
Abb. 7.32 Toleranz gegenüber Sollwertunterschreitungen im Heizbetrieb.....	79
Abb. 9.1 Anlagenhydraulik Kombispeicher mit Scheitholzkessel (links oben), Kombispeicher mit Frischwasserstation (links unten), Wärmeerzeuger und gemischter Heizkreise (rechts).....	81
Abb. 9.2 Anlagenhydraulik: Thermische Solaranlage (links), Warmwasserspeicher mit Ladepumpe (mittig), Wärmeerzeuger und zwei gemischte Heizkreise (rechts).....	81
Abb. 9.3 Anlagenhydraulik Umlenkventil: Thermische Solaranlage (links), Warmwasserspeicher mit Umlenkventil (mittig), Wärmeerzeuger, Pufferspeicher und zwei gemischte Heizkreise (rechts).....	82
Abb. 9.4: Feldtestgebäude 1 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Heizraumtemperatur und mittlerer Speichertemperatur.....	83
Abb. 9.5 Feldtestgebäude 2 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Heizraumtemperatur und mittlerer Speichertemperatur.....	84
Abb. 9.6: Feldtestgebäude 1 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Tagesstrahlungssumme.....	85
Abb. 9.7: Feldtestgebäude 2 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Tagesstrahlungssumme.....	86
Abb. 9.8: Beispiel von Zirkulationsströmen im Rohr (braune Kurve) bei ausgeschalteter Kesselkreispumpe.....	87
Abb. 9.9: Beispiel von Zirkulationsströmen im Rohr (blaue Kurve) bei ausgeschalteter Kesselkreispumpe, welche vom Sensor von REUT (orangene Kurve) nicht erfasst wird.....	87
Abb. 9.10: Beispiele für kurzzeitiges Angleichen der Kesseltemperaturen an die Solarkreistemperaturen.....	88
Abb. 9.11 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenzen im Heizkreis(HK) und Kesselkreis (KK) der In-Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 im Vergleich am 01. April 2015.....	89
Abb. 9.12 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Heizkreis (HK) der In-Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 am 02. April 2016.....	90

<i>Abb. 9.13 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Heizkreis der In-Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 am 02. Dezember 2018 .....</i>	<i>91</i>
<i>Abb. 9.14 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Kesselkreis der In Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 01. Dezember 2018 .....</i>	<i>92</i>
<i>Abb. 9.15 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Kesselkreis der In Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 2 23. November 2018 .....</i>	<i>93</i>
<i>Abb. 9.16 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Heizkreis (HK1) und Fußbodenheizung (HK2) der In Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 2 23. November 2018.....</i>	<i>94</i>

# 1 Einleitung und Zusammenfassung

## 1.1 Einleitung

Die globale Erwärmung und die Endlichkeit der fossilen Ressourcen stellt eine der größten gesellschaftlichen Herausforderungen dar. Um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern, muss die Energieerzeugung (Strom und Wärme) auf regenerative Energien umgestellt, sowie der Energieverbrauch gesenkt und die Energieeffizienz gesteigert werden.

In privaten Gebäuden in Deutschland werden 22 % des gesamten Endenergiebedarfs für Heizung und Warmwasser benötigt. [1] Die Raumwärme macht ca. 70 % und die Warmwasserbereitung 15 % des Energiebedarfs aus. Erneuerbare Wärme deckt 13 % des Bedarfs. [1] Bei der Stromproduktion wurde im Jahr 2017 bereits ein Anteil von 36 % erneuerbaren Energien erreicht. [2] Dem Gebäudebereich kommt daher eine wichtige Rolle bei der Einhaltung der Klimaziele zu. Besonders im Gebäudebereich sind die Energieeffizienzpotentiale besonders hoch, da die meisten Gebäude die aktuellen Anforderungen, die an den Neubau gestellt werden nicht erfüllen und die Wärmeerzeuger oft älter als 20 Jahre sind. [3] [4]

Die einzelnen Komponenten der Wärmebereitstellung sind inzwischen weitgehend optimiert. Nicht erschlossene Effizienzpotentiale liegen oft nur noch in der Vernetzung und der angepassten Regelung der einzelnen Komponenten, einer stärkeren Überschneidung von Bedarf und Bereitstellung und einem angepasstem Verhalten der Bewohner. Obwohl die Motivation zum Energiesparen und Verringern des CO<sub>2</sub>-Ausstosses heutzutage bei vielen Menschen hoch ist und die Gebäudeheizung oft den größten Anteil am Energieverbrauch ausmacht, ist der Bereich Heizung und Warmwasser nicht im Fokus. Ursachen sind in der fehlenden Transparenz und Hürden bei der Reglerbedienung zu suchen. Mit der Entwicklung eines neuen Heizungsreglers soll der Anwender in die Lage versetzt werden seinen Energiebedarf zu analysieren und schnell Informationen über den Status Heizungssystems abrufen zu können. Die Reglerbedienung über die App von überall im Haus oder auch von unterwegs erleichtert dies.

## 1.2 Zusammenfassung

Innerhalb des Projektes wurde ein Heizungsregler für das 1-2 Familienhaus mit einem neuen bedarfsgeführten Heizkonzept entwickelt. Das Projekt umfasst Hardware- und Softwareentwicklung, Entwicklung und Umsetzung einer App zur Reglerbedienung, sowie einen Feldversuch in zehn bewohnten Gebäuden.

Der Heizungsregler wird hauptsächlich in Heizungssystemen mit thermischen Solaranlagen eingesetzt. Ziel des Reglers ist es, einen möglichst hohen solaren Deckungsanteil, sowie Einsparungen an Primärenergie zu erzielen. Darüber hinaus soll mit einer einfachen Bedienung und einer hohen Transparenz bzgl. der Energieverbräuche, ein zusätzlicher Anreiz geboten werden, Energie einzusparen.

Mittels Volumenstromsensoren im Heiz- und Kesselkreis wird ein Energiemonitoring ermöglicht, was vervollständigt wird durch die Kombination mit dem Solarregler und dem Frischwasserregler der REUT, welche die solare Energie sowie die für Warmwasser und Zirkulation verbrauchten Wärmemengen erfassen. Anhand des gemessenen Volumenstroms im Heizkreis wird der aktuelle Heizbedarf des Gebäudes ermittelt und die Heizkreisvorlauftemperaturen sowie die Pumpenleistung entsprechend angepasst. Ist der Heizbedarf sehr gering, schaltet sich die Heizung aus und bei steigendem Bedarf automatisch wieder ein. Dies bietet Vorteile gegenüber dem bisherigen Stand der Technik, bei dem es durch zu hoch (oder nicht) eingestellte Heizkennlinien oder einer schlechten Korrelation zwischen Heizbedarf und Außentemperatur zu einem unnötigen Mehrverbrauch kommt. Ein weiteres Entwicklungsthema war eine optimierte Pufferbeladung mit dem Gasbrennwertkessel, bei der es nicht zu deutlich höheren Kessel-Rücklauftemperaturen und damit schlechterem Brennwertnutzen kommt als beim Heizen ohne Puffer. Dies ist wichtig, da der Puffer/Kombispeicher in

Verbindung mit Gasbrennwert meist nur aufgrund der Solaranlage angeschafft wird, daher müssen im Prinzip die größeren Speicherverluste und der Gasmehrverbrauch aufgrund der Einbußen beim Kesselwirkungsgrad vom Solargewinn abgezogen werden.

Um die Genauigkeit der für den Regler verbauten Sensoren zur Wärmemengenerfassung zu überprüfen und das neue Regelkonzept zu bewerten, wurde bei zwei Feldtestgebäuden vor und nach der Einführung des neuen Reglers ein redundantes Monitoring mit hochgenauer Messtechnik des IGTE durchgeführt. Vor dem Einsatz im Feld wurden die Sensoren zudem einem Vergleich mit kalibrierter Labormesstechnik unter Laborbedingungen unterzogen. Aus den verschiedenen zur Auswahl stehenden Sensoren wurde der Sensor mit der besten Genauigkeit und einen für die Anwendung akzeptablen Druckverlust und Messbereich ausgewählt. Während des Feldtests wurden verschiedene Veränderungen zur Verbesserung der Genauigkeit durchgeführt. Am Ende des Projektzeitraumes betrug die Genauigkeit je nach Anlage, bilanziertem Kreis und Jahreszeit zwischen 5 und 25 %. Bei geringeren Wärmeströmen außerhalb der Heizperiode bzw. in der Übergangsphase wirkt sich eine Abweichung die absolut die gleiche Größe hat, als relative Größe (bezogen auf die Gesamtmenge) stärker aus. Insgesamt ergab sich eine annehmbare Genauigkeit für die Anwendung.

Die Algorithmen-Entwicklung für den Regler wurde mit der am Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (ISE) entwickelten Simulationssoftware ColSim durchgeführt. Damit ist es möglich, den in C++ geschriebenen Quellcode des Heizungsreglers direkt in der Simulationsroutine zu verwenden. Dies hat den Vorteil, dass ein Großteil der Entwicklung mit der Software getestet und optimiert werden kann. Weiterhin treten bei der Übertragung der in der Simulation getesteten Software keine Konvertierungsfehler auf. Um die volumenstromgeführte Heizung in der Simulation zu entwickeln, wurde ein Gebäudemodell mit fünf thermischen Zonen aufgebaut. Um den Zusammenhang zwischen Pumpenansteuerung, Druckverlusten und dem resultierenden Volumenstrom möglichst realistisch wiederzugeben, wurde das Gebäudemodell mit einer Hydrauliksimulation gekoppelt. Als Datengrundlage wurden die aus dem redundanten Monitoring gewonnenen Messdaten von REUT und IGTE zusammengefasst und in ein von ColSim unterstütztes Format umgewandelt.

Damit der Regler möglichst schnell im Labor und Feld getestet werden kann, wurde die Reglerhardware früh im Projekt umgesetzt. Dies hatte nachträgliche Anpassungen an der Hardware zur Folge. Zu Projektbeginn war eine optionale WLAN-Aufsteckplatine vorgesehen, um die Verbindung App – Regler herzustellen. Diese Lösung war allerdings wirtschaftlich nicht attraktiv und spezielle Adapter (z.B. „LAN to WLAN“) wären vom Handwerker nicht akzeptiert worden. Um die Kosten zu senken, wurde der WLAN-Chip direkt auf der Platine verbaut. Die Bedienung über eine App führte zu Bedenken, bei einer Störung vor einer „Black-Box“ zu stehen. Daher wurden an der Gehäuseseite mehrere Status-LEDs verbaut, um den aktuellen Betriebszustand des Reglers anzuzeigen.

Zur Reglerbedienung wurde ein App für die gängigen Betriebssysteme der Firmen Apple und Google entwickelt. Mit der App können von unterwegs oder zuhause am Regler Einstellungen vorgenommen oder der Betrieb überprüft werden. Neben dem Zugriff auf die Reglerparameter stellt die App die gemessenen Wärmemengen in mehreren Balkendiagrammen dar und bietet eine grafische Übersicht des kompletten Heizungssystems. Die Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen Regler und App wurde speziell für Mikrocontroller mit wenig Rechenleistung entwickelt und entspricht keiner gängigen App-Schnittstelle. Infolge dessen kam es zu größeren Verzögerungen bei der Entwicklung der Bedienoberfläche, so dass der geplante Funktionsumfang erst Anfang des Winters 2018/2019 fertiggestellt werden konnte. Nachdem der volle Funktionsumfang umgesetzt war, wurden in einer Online-Umfrage die Feldversuchsteilnehmer und weitere App-Nutzer zur Bedienbarkeit der App befragt. Mittels der Umfrage konnte Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden, die vor dem Übergang in die Serie bearbeitet werden sollen.

Zur Bewertung des Reglers wurden aus den Daten des redundanten Monitorings Tages- und Monatsbilanzen erstellt und Bewertungsgrößen wie der Solare Deckungsgrad bestimmt. Außerdem wurden die Datenpunkte nach Tageseinstrahlungssumme sortiert, um festzustellen, ob sich der solare Deckungsgrad bei gleichen Einstrahlungs- und Umgebungsbedingungen verbessert hat. Die Bewertung zeigte, dass sich die Regelung durchaus vorteilhaft für den Deckungsgrad auswirkte an

Tagen mit einer geringeren Tagesstrahlungssumme. Dabei war die Verbesserung bei der Feldtestanlage 2 nicht so deutlich zu erkennen wie bei der Feldtestanlage 1.

Es zeigte sich, dass eine energetische Bewertung der Regelung anhand der im Feldversuch ermittelten Daten aufgrund von unterschiedlichen Randbedingungen - vor allem dem Nutzerverhalten - nicht zufriedenstellend durchgeführt werden konnte. Daher wurden in der Simulation Vergleichsrechnungen, zur rein außertemperaturgeführten Heizung durchgeführt mit ansonsten identischen Modellparametern. Gegenüber der klassischen Regelung mit sehr gut eingestellter Heizkennlinie, was in der Praxis eher die Ausnahme darstellt, konnte der neue Heizungsregler, bei einer vergleichbaren Raumtemperatur ca. 3 % einsparen. Verglichen mit einer schlecht eingestellten Heizkennlinie beläuft sich die Einsparung auf 5,2 – 6,4 %, je nach Kesseltyp. Die Hauptgründe für die Einsparung sind der bessere Kesselwirkungsgrad, die geringeren Verteilverluste der Heizwärme, da die Heizung während der Nachtabenkung immer wieder ganz abschaltet, die geringeren Speicherverluste durch die im Mittel niedrigere Puffertemperatur und der höhere Solarertrag.

Der Regler wurde in zehn Feldversuchsanlagen mit unterschiedlichen Wärmeabgabesystemen und Wärmeerzeugern getestet. Es zeigte sich, dass bei Feldversuchsstart die Entwicklung nicht abgeschlossen war und dass kontinuierlich Fehlerkorrekturen und Funktionsänderungen notwendig waren. Größere Anpassungen waren eine separate Behandlung von Fußbodenheizungen aufgrund der taktgesteuert auf – und zufahrenden PWM-Ventile, die Pumpenansteuerung bei annähernd geschlossenen Ventilen, sowie die Abstimmung zwischen Komfort (schneller Anstieg der Vorlauf Solltemperatur bei erhöhtem Wärmebedarf) und Ökologie (langsamerer Anstieg um Überheizung der Räume zu vermeiden). Zudem stellte sich während des Projekts heraus, dass es nicht zulässig ist, kesselinterne Pumpen direkt mit dem Heizungsregler die Drehzahl zu regeln, wenn es sich um PWM-Hocheffizienzpumpen handelt, was inzwischen fast immer der Fall ist. Daher mussten alternative Lösungen entwickelt werden, um die richtige Kesselleistung bei der Pufferbeladung zu erzielen.

Viele Heizsysteme weisen erhebliche Mängel (kein hydraulischer Abgleich, Ventilsteuerung funktioniert nicht richtig, Zeitprogramme der Ventile widersprechen denen des Reglers etc.). Diese Mängel werden mit einer konventionellen Regelung meist nicht bemerkt, da die Pumpe ständig läuft und die Vorlauftemperatur immer bereitgestellt wird, auch wenn auf diese Art Energie verschwendet wird. Ein bedarfsgeführtes Heizkonzept bietet ein Einsparpotential, benötigt aber für den optimalen Betrieb funktionierende Ventile, da an diesen der Bedarf abgelesen wird. Ein schlechtes Feedback von den Ventilen kann regelungstechnisch durch das Einbeziehen einer Raumtemperatur kompensiert werden. Zur Kompensation eines schlechten hydraulischen Abgleichs wurde im Regler ein Einsteller eingeführt, der bewirkt, dass auf eine kleinere Ventilöffnung geregelt wird, so dass auch hydraulisch benachteiligte Räume warm werden.

## 2 Entwicklung: Algorithmen

### 2.1 Status Quo

Der Stand der Technik bei der Gebäudeheizung ist entweder eine außentemperaturgeführte oder raumtemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung in Kombination mit Thermostatventilen. Bei der außentemperaturgeführten Regelung wird mit Hilfe einer linearen Heizkennlinie aus der gemessenen Außentemperatur die Vorlauftemperatur des Heizsystems bestimmt. Durch Anpassung der Steigung und des Fußpunkts (Vorlauftemperatur bei einer Außentemperatur von 15°C) können Dämmstandard und Temperaturniveau der Wärmeerzeuger des Gebäudes berücksichtigt werden.

Bei der raumtemperaturgeführten Regelung wird, ausgehend von einer Temperaturmessung in einem für die jeweilige Architektur repräsentativen Führungsraum, der Wärmebedarf dieses Raumes bestimmt. Die Vorlauftemperatur des Gesamtsystems wird an den Wärmebedarf dieses festgelegten Führungsraums angepasst. Kombinationen der beiden Strategien können ebenfalls angewandt werden, um die Einstellungen der Heizkennlinie, basierend auf den Messungen im Referenzraum, dynamisch anzupassen.

Dies hat die folgenden Nachteile:

- Damit die Heizung funktioniert, müssen vom Handwerker sehr viele Einstellungen am Regler vorgenommen werden, die für ihn weder suggestiv noch leicht zu ermitteln sind. Dies sind Fußpunkt und Steigung der Heizkennlinie oder alternativ für eine reine Raumtemperaturregelung der Proportionalanteil und die Nachstellzeit. Dazu kommen die Heizgrenztemperatur für Normalniveau und Absenkniveau, evtl. die Stärke des Raumeinflusses, die Kesselüberhöhung, die Schaltdifferenzen für die Warmwasserbereitung und die Puffernachheizung, die Vorhaltezeit fürs Heizen, die Mischerlaufzeit, die gewünschte Spreizung im Heizkreis, die minimale und maximale Puffertemperatur, die minimalen Pumpendrehzahlen und Nachlaufzeiten von Heizkreis- und Kesselpumpen. Laut unserer Auswertung, der über Fernüberwachung erfassten Heizungs-Anlagen werden diese Einstellungen oft gar nicht oder nicht richtig gemacht, was zu suboptimalem Betrieb führt.
- Idealerweise müsste der Handwerker nach der Installation der Anlage noch ein oder zweimal kommen und die Einstellungen nachkorrigieren, falls die Räume bei bestimmten Verhältnissen nicht warm genug werden. Das wird in der Praxis nicht gemacht, stattdessen stellt der Betreiber einfach die Raumsolltemperaturen in der Regelung hoch. Dies entspricht einem permanenten Hochsetzen der Vorlaufsolltemperatur. Damit wird der gewünschte Effekt zwar erreicht, allerdings wird die Einstellung meist nicht mehr rückgängig gemacht, da die Thermostatventile auch für eine Begrenzung der Raumtemperaturen sorgen. D.h. die Räume überheizen nicht, aber die Vor – und Rücklauftemperaturen im Heizkreis verbleiben ständig auf zu hohem Niveau, was - vom Betreiber unbemerkt - zu mehr Speicherverlusten, Rohrleitungsverlusten, weniger Solarertrag und bei Brennwertgeräten oder Wärmepumpen zu einem schlechterem Kesselwirkungsgrad führt.
- Bei modernen Häusern mit großen Fensterflächen kommt es oft vor, dass das Haus trotz einer niedrigen Außentemperatur bereits durch passive solare Gewinne oder interne Lasten erwärmt wurde. Dann werden der Kessel bzw. der Puffer unnötig auf hohen Temperaturen gehalten, obwohl die Wärme gar nicht abgenommen wird.
- Der Heizungsregler berücksichtigt den Kesseltyp nicht, sondern gibt jedem Kessel dieselbe Vorlauf-Solltemperatur und dieselben Schaltdifferenzen, ungeachtet dessen Wirkungsgradkennlinie und seiner Trägheit.
- Das Vorhandensein einer Solaranlage hat keinen Einfluss auf die Regelstrategie.
- Der klassische Heizungsregler ist wenig bedienerfreundlich. Es ist für den Betreiber kaum möglich, aktiv Einfluss auf den Heizbetrieb zu nehmen, z.B. eine Kessel-Nachheizung zu unterdrücken um der Solaranlage Vorrang zu geben. Der Betreiber kann außerdem nicht erkennen, was Einstellungsänderungen für Auswirkungen haben, wo besonders viel Energie

verbraucht wird, wo Einsparpotential liegt und was seine Solaranlage überhaupt zur Heizung beiträgt. Studien zeigen dass Bewohner sich aktiv bemühen, Energie einzusparen, wenn sie Einsicht in den aktuellen Verbrauch bekommen. [5]

### 2.2 Der ökologisch konsequente Ansatz

Die Kernpunkte des neuen Heizungsregler „Ökoko“, in denen er sich vom Status Quo abhebt sind im Folgenden aufgeführt:

- Der Regler ermittelt fast alle Regelparameter selbst, passend zur Anlage. Der Handwerker muss nur noch die maximale Vorlauftemperatur im Heizkreis einstellen.
- Der Betreiber erzielt die gewünschte Raumtemperatur allein durch Einjustieren der Thermostatventile. Er muss dafür nicht zusätzlich im Heizungsregler Einstellungen machen. Dadurch kann er nicht versehentlich eine inkonsistente energieverschwendende Einstellung machen (hohe Raumsolltemperatur im Regler bei gleichzeitig kälter eingestellten Thermostatventilen).
- Der aktuelle Heizbedarf wird bestimmt und der Kessel bekommt nur dann eine Wärmeanforderung fürs Heizen, wenn diese Wärme vom Heizkreis wirklich benötigt wird.
- Der Regler kennt seine aktiven Wärmeerzeuger und wählt für sie passende Schaltdifferenzen, Laufzeiten und Nachlaufzeiten.
- Solaranlage, Brennwertgerät und Wärmepumpe werden im Heizbetrieb vorzugsweise mit niedrigen Vorlauftemperaturen betrieben.
- Die Solaranlage erhält Vorrang vor dem Kessel. Es wird auf Solarwärme gewartet, wenn ein sonniger Tag vermutet werden kann.
- Träge Kessel wie Pelletskessel oder ältere Ölkessel werden so betrieben, dass lange Laufzeiten entstehen, was das Abgasverhalten stark verbessert.
- Der Betreiber kann den Regelbetrieb verfolgen und gefahrlos beeinflussen.

### 2.3 Die volumenstromgeführte Heizung

Das neuartige Konzept der „volumenstromgeführten“ Heizung basiert darauf, dass der Heizungsregler mittels eines Volumenstromsensors im Heizkreis stets den aktuellen Durchsatz bestimmt. Bei der Inbetriebnahme der Anlage werden einmalig alle Thermostatventile ganz geöffnet. Der Regler durchläuft ein Inbetriebnahmeprogramm, bei dem er sukzessive für jede von zehn Pumpenstufen den Durchsatz im Heizkreis misst (siehe Abb. 2.1). Der Durchsatz wird erzeugt durch eine vom Regler, mittels PWM-Signal ansteuerbare Energiesparpumpe (z.B. Grundfos UPM3 mit PWM-Kennlinie). Die so ermittelte Durchsatztafel (Durchsatz als Funktion der Pumpenansteuerung in %, in 10 Stufen) wird stromausfallsicher gespeichert.

Während des Heizbetriebs wird aus dem Durchsatz der Wärmebedarf bzw. die mittlere Ventilöffnung des Heizkreises und damit der Wärmebedarf bestimmt:

- Sind alle Thermostatventile geschlossen, dann ist die Ventilöffnung 0 %: Sämtliche Räume sind zu warm und es besteht kein Energiebedarf.
- Sind alle Räume deutlich zu kalt, dann sind alle Ventile ganz auf und es ergibt sich ein Öffnungsgrad von 100 %.
- Im Regelbereich der Thermostatventile von 1-4 K können sich alle Öffnungsgrade zwischen 0% und 100% ergeben. Je höher der Öffnungsgrad, desto weiter ist die Raumtemperatur von ihrem am Ventil eingestellten Sollwert entfernt, woraus sich ableiten lässt, ob eine höhere Vorlauf Solltemperatur nötig ist.

Bei Fußbodenheizungen wird oft eine PWM-Ventilsteuerung eingesetzt, bei welcher die Ventile während einer ca. 15-minütigen Periode in einem bestimmten Taktverhältnis auf- und zugefahren en, um eine definierte Raumtemperatur zu erreichen. Daher mittelt der Heizungsregler bei Fußbodenheizungen über diesen Zeitraum, um die mittlere Ventilöffnung zu errechnen.

### **2.3.1 Volumenstromgeführte Heizung mit Radiatorheizkörpern**

#### **a) Adaption der Vorlaufsolltemperatur bei der Radiatorheizung**

Bei der Radiatorheizung wird eine PI-Regelung(Proportional-Integralregelung) eingesetzt, welche anhand der Soll-Ist-Abweichung der Ventilöffnung die Vorlaufsolltemperatur erhöht oder verringert.

Die Pumpenansteuerung wird bei der Radiatorheizung separat berechnet: Zunächst wird die Sollspreizung berechnet, d.h. die gewünschte Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im Heizkreis:

#### **b) Sollspreizung der Heizkreispumpe:**

Dies ist bei konventionellen Regelungen ein Einstellparameter, der aber aus Tabellen abgelesen wird, bei denen er in direktem Bezug zur maximalen Vorlauftemperatur im Heizkreis steht. Daher wird die Sollspreizung folgendermaßen berechnet:

- Sie ist 5 Kelvin bei einer maximalen Vorlauftemperatur im Heizkreis von 35 °C oder niedriger. Zwischen 35 °C und 55 °C steigt sie linear an bis auf 10 K. Zwischen 55 °C und 80 °C steigt sie linear an auf 20 K, was gleichzeitig auch der maximale Wert ist.
- Falls ein Brennwertkessel im Einsatz ist, wird bei einer Vorlaufsolltemperatur von über 45 °C die wie oben berechnete Sollspreizung um 30 % erhöht, damit die Rücklauftemperatur möglichst niedrig bleibt.
- Die Sollspreizung wird zusätzlich so begrenzt, dass keine unerreichbar niedrige Rücklauftemperatur gefordert wird, d.h. eine, die zu wenig oberhalb der der Raumsolltemperatur liegt.

#### **c) Pumpenansteuerung**

Die Heizkreispumpendrehzahl wird ähnlich wie bei herkömmlichen Heizungsregelungen zunächst als lineare Funktion aus der maximalen Vorlaufsolltemperatur minus der aktuellen Vorlaufsolltemperatur berechnet, d.h. je höher die gewünschte Heizleistung, desto stärker muss auch die Pumpe laufen. Eine Integralregelung bewirkt dann das Einhalten der gewünschten Sollspreizung im Heizkreis.

In Abb. 2.1 wird exemplarisch der Betrieb der volumenstromgeführten Heizung mit Radiatoren, in einem der Feldversuchshäuser gezeigt.

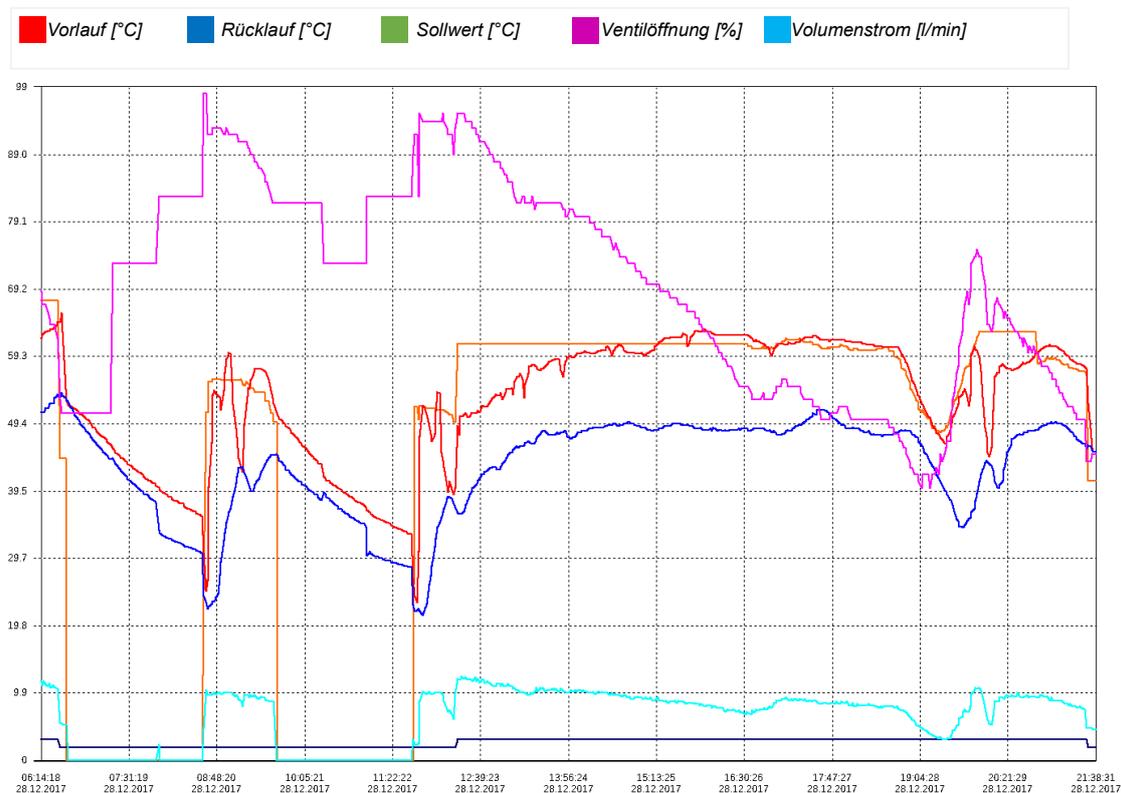


Abb. 2.1 Heizbetrieb Radiatorheizung.

Zu Beginn eine längere Absenkephase (Niveau = 2, dunkelblaue Linie), danach das Niveau Normal (dunkelblaue Linie = 3). Während der Absenkephase gibt es abgesehen vom üblichen Anstiebsbetrieb eine kurze Heizphase (orange: Vorlauf Solltemperatur), da die Ventilöffnung (violette Linie) über 95% geht. Im Niveau Normal nimmt die Ventilöffnung kontinuierlich ab bis die Sollventilöffnung erreicht ist.

### 2.3.2 Adaption der Vorlauf Solltemperatur bei der Fußbodenheizung

Bei der Fußbodenheizung werden Vorlauf Solltemperatur und Pumpenansteuerung gemeinsam adaptiert. Diese Systeme sind sehr träge und die warmen Fußböden heizen sehr lange nach. Zudem basieren sie auf Strahlungswärme, d.h. die Wärmeabgabe steigt überproportional mit der Temperatur. Ein zu starkes Aufheizen mit zu hoher Vorlauf Temperatur führt zu stundenlang überheizten Räumen. Daher wird hier eine spezielle Integralregelung eingesetzt, welche die Abweichung einer zeitlich gemittelten Ventilöffnung von der Sollventilöffnung bewertet und dann

- 1 bei zu kalten Räumen zuerst die Pumpenansteuerung erhöht, falls die Spreizung (Vorlauf minus Rücklauf Temperatur) noch etwas zu groß ist. Erst wenn die Spreizung stimmt, wird schrittweise auch die Vorlauf Solltemperatur erhöht.
- 2 bei zu warmen Räumen wird zuerst die Vorlauf Solltemperatur abgesenkt, solange die Spreizung noch über ihrem Mindestwert von 3,5 K liegt. Danach wird schrittweise auch die Pumpenansteuerung reduziert.
- 3 Sind die Räume ungefähr bei ihrem Sollwert, dann wird die Abstimmung so optimiert, dass die richtige Spreizung eingehalten wird und der Durchfluss insgesamt nicht zu klein wird.

Es gibt zusätzliche Kriterien, die bewirken, dass die Pumpenansteuerung besonders nachts nicht zu hoch gewählt wird, damit keine hörbaren Fließgeräusche oder Pfeifen an den Ventilen entstehen.

Abb. 2.2 zeigt den Heizbetrieb mit einer Fußbodenheizung mit PWM-Ventilen.

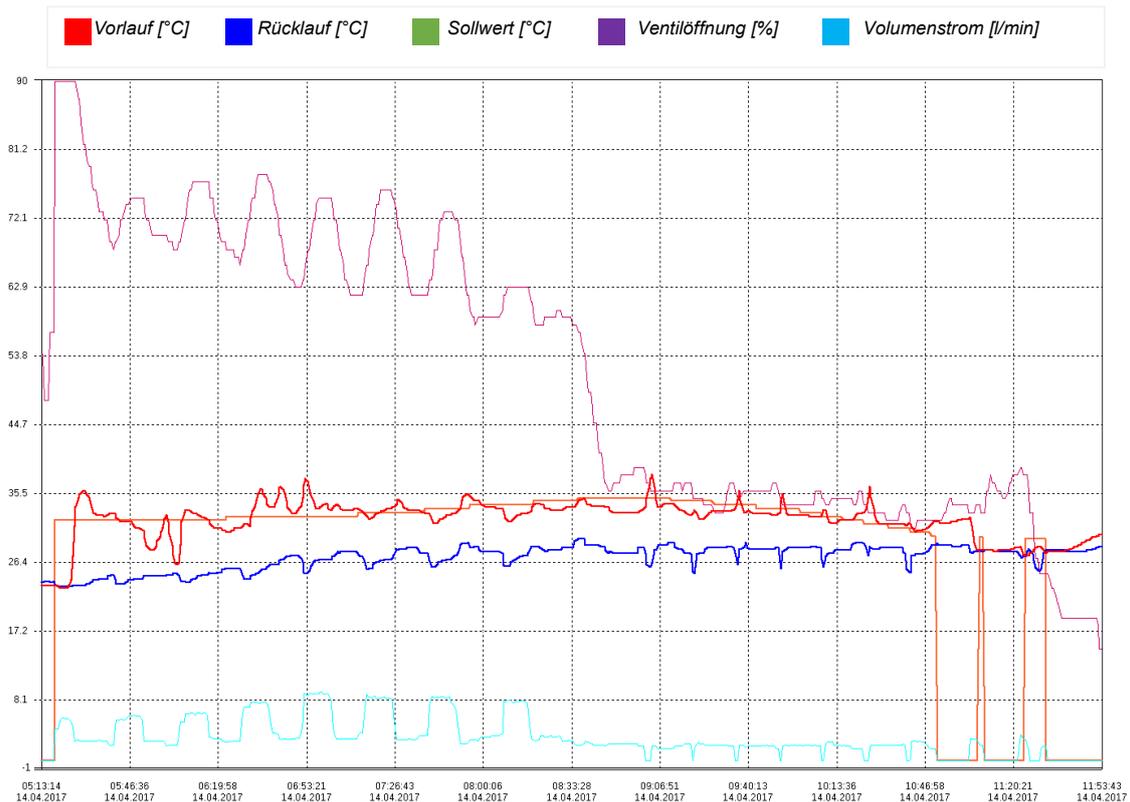


Abb. 2.2 Heizbetrieb Fußbodenheizung

Die durch die PWM-Ventile bewirkte periodische Änderung im Durchsatz ist deutlich zu sehen. Die Anlage geht aus der Nachtabsenkung mit hoher Ventilöffnung (violette Kurve) über in den Heizbetrieb im Niveau Normal, dafür wird die Vorlaufsollltemperatur (orange) nicht sehr erhöht, sondern eine Vorhaltezeit eingehalten, so dass die Ventilöffnung zum gewünschten Zeitpunkt auf ihrem Sollwert ist.

### 2.3.3 Raumeinfluss

Falls es einen geeigneten Raum gibt, der von seiner Temperatur her repräsentativ für den ganzen Heizkreis ist, d.h. er hat keine starke Sonnen-Einstrahlung oder übermäßige interne Lasten, dann kann dort ein Raumtemperaturfühler installiert werden und die Einstellung „Raumeinfluss“ aktiviert werden.

Es wird dann eine Einstellmöglichkeit für Raumsolltemperaturen für die jeweiligen Niveaus angeboten. Die Abweichung der aktuellen Raumtemperatur von der eingestellten Raumsolltemperatur bewirkt eine Verschiebung der Sollventilöffnung, auf die geregelt wird. D.h. falls es im Führungsraum zu warm ist, wird auf eine größere Sollventilöffnung geregelt, was ein Absinken der Vorlaufsollltemperatur zur Folge hat. Ist es aber gleichzeitig in allen anderen

Räumen zu kalt, dann wird auch diese größere Sollventilöffnung überschritten und die Vorlaufsollltemperatur wird angehoben. Es handelt sich also nicht um eine reine Raumtemperatur-Regelung, sondern um einen Raumeinfluss auf die volumenstromgeführte Heizung.

Wenn Raumeinfluss gewählt wurde, gibt es auch ein Komfort-Niveau. Der Betreiber sollte im Führungsraum das Thermostatventil etwas höher einstellen, so dass auch die fürs Komfortniveau gewählte Raumsolltemperatur dort erreicht werden kann.

Zusätzlich ist nachts ein stärkeres Absenken möglich, auch über den Regelspielraum der Thermostatventile hinaus. Die Heizung wird bei Raumeinfluss komplett abgeschaltet, wenn die Raumsolltemperatur um 4 K überschritten ist. Sie wird wieder aktiviert, wenn sie um weniger als 2 K überschritten ist.

### 2.3.4 Die Anschiebe-Funktion

Wenn die Ventilöffnung deutlich unter ihrer Sollventilöffnung liegt, dann wird der Heizbetrieb vorübergehend unterbrochen, da die Räume momentan nicht mehr Wärme benötigen. Nun setzt der sog. „Anschiebe-Betrieb“ ein: Die Heizkreispumpe wird abgestellt, die Vorlaufsolltemperatur auf 0 gesetzt. Dadurch fährt der Mischer zu und der Kessel bekommt keinen Sollwert mehr.

In zyklischen Abständen wird die Heizkreispumpe kurz. Dabei bleibt der Mischer zu und es wird kein Vorlaufsollwert gesetzt. Es wird lediglich der Durchsatz bestimmt. Ergibt sich dabei eine Ventilöffnung über der Einschaltsschwelle, dann wird der Heizbetrieb wieder aufgenommen.

Auf diese Art kann schnell auf interne Lasten und passive solare Gewinne reagiert werden. Auch falls die Bewohner abwesend sind, aber statt das entsprechende Programm für Abwesenheit zu setzen, nur die Thermostatventile zuge dreht haben, wird so keine Wärme verschwendet. Unnötige Kessel-Einschaltphasen werden vermieden.

Die zyklischen Abstände, in denen angeschoben wird, werden berechnet aus:

- der Ist-Soll-Abweichung der Raumtemperatur, falls eine Raumtemperatur zur Verfügung steht.
- Der anzunehmenden Auskühlung des Hauses, falls eine Außentemperatur zur Verfügung steht.
- Einer Funktion, welche aufgrund der Laufzeit der Heizkreispumpe vom Vortag den optimalen Abstiege-Abstand berechnet.

Die Abstände variieren zwischen 10 Minuten und 60 min, bzw. 120 Minuten in Absenckphasen.

Abb. 2.3 zeigt eine Nacht, in welcher die Heizung im Anschiebetrieb läuft.

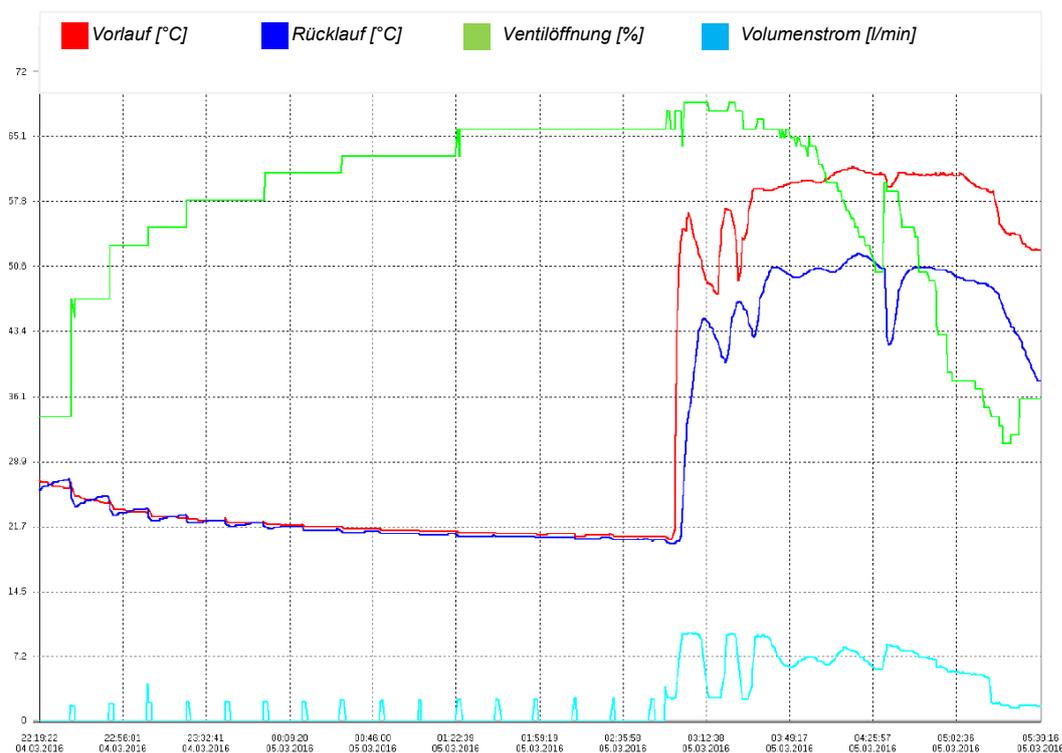


Abb. 2.3 Anschiebetrieb

Die Pumpe schaltet immer wieder ein, während der Mischer geschlossen bleibt (Vorlauf = Rücklauftemperatur). Gegen Morgen findet ein Niveauwechsel statt, d.h. die Sollventilöffnung sinkt, so dass der Heizbetrieb wieder startet.

### 2.3.5 Nachtabenkung

Auch wenn bei gut isolierten Häusern eine Nachtabenkung energetisch wenig Vorteile bringt, so hat sie doch immer noch ihren Sinn:

- 1 Für viele Menschen ist es ein Komfortgewinn, bei niedrigeren Temperaturen zu schlafen.
- 2 Viele Menschen möchten gerne auch in der Heizperiode nachts das Fenster zumindest gekippt lassen um genug frische Luft zu haben. Falls dabei die Thermostatventile nicht zuge dreht werden, würde ohne Nachtabenkung viel Wärme verschwendet.

Der Heizungsregler stellt dem Benutzer verschiedene Programme zur Verfügung, darunter befinden sich drei Zeitprogramme. Der Benutzer kann diese Zeitprogramme für sich so einstellen, dass zu bestimmten Zeiten im Niveau „Normal“ geheizt wird, zu anderen Zeiten im Niveau „Absenken“. Steht eine Raumtemperatur zur Verfügung, kann auch das Niveau „Komfort“ gewählt werden.

Im Niveau „Normal“ gilt eine Sollventilöffnung, die vom Einsteller „HydroKomfort“ abhängt, z.B. 50%. Im Niveau „Absenken“ gilt hingegen eine Sollventilöffnung von 90%. Beim Übergang vom Niveau „Normal“ oder „Komfort“ zu „Absenken“ wird daher in der Regel zunächst der Antriebs-Betrieb einsetzen, bis die Ventilöffnung 95% beträgt. Dann setzt der Heizbetrieb wieder ein, wobei nach demselben Prinzip wie tagsüber die nötige Vorlaufsolltemperatur berechnet wird aus der Abweichung der Ventilöffnung von der Sollventilöffnung.

Um beim Niveauwechsel schnell mit einer passenden Vorlaufsolltemperatur arbeiten zu können, merkt sich der Regler die zuletzt adaptierten Vorlaufsolltemperaturen für die Niveaus „Absenken“, „Normal“ und „Komfort“. Bei Niveauwechsel startet er mit diesen Werten und beginnt dann seine Adaption.

#### Charakteristiken der Nachtabenkung:

- Bei der klassischen Heizungsregelung bedeutet die Nachtabenkung lediglich eine Parallelverschiebung der Heizkennlinie nach unten. Der Benutzer gibt eine gewünschte Raumsolltemperatur für die Absenkphase ein, mittels der die Verschiebung berechnet wird. Allerdings wird diese Temperatur sogar in nicht isolierten Häusern praktisch nie erreicht, da das Haus zunächst noch warm ist und die Heizung auf niedrigerem Niveau durchläuft. Das Haus kühlt somit nur sehr langsam aus und ist meist zu Beginn der nächsten Heizphase um weniger als 1 K abgekühlt.
- Bei der volumenstromgeführten Heizung bedeutet Nachtabenkung, dass die Heizung zu Beginn der Absenkphase ganz ausgeht und somit eine schnelle Abkühlung erreicht wird. Durch den Antriebsbetrieb wird ermittelt, wann die Heizung auf niedrigem Niveau wieder einschalten muss, damit die Thermostatventile wieder ganz leicht ansprechen.
- Möchte man eine stärkere Abkühlung zulassen, kann man bei der volumenstromgeführten Heizung entweder einen Raumfühler anschließen, Raumeinfluss einstellen eine niedrige Absenktemperatur vorgeben, oder das Niveau „Aus“ einstellen. Dann wird gar nicht geheizt. Es wird nur nach 6 h Auskühlzeit, danach immer nach weiteren 4 h ein spezielles Messprogramm gemacht, bei dem mit geschlossenem Mischer 10 min die Heizkreispumpe angestellt wird, um zu ermitteln, ob die Vor- und Rücklauf temperatur auf unter 10°C unterkühlt sind. Wenn ja, dann wird die Heizung im Frostschutzmodus wieder aktiviert.

In Abb. 2.1 und Abb. 2.3 sind jeweils längere Phasen der Nachtabenkung zu sehen, wobei in Abb. 2.3 auch zu sehen ist, dass sich die Heizung bei Bedarf auch Nachts wieder einschaltet.

### 2.3.6 Morgendliches Aufheizen

Beim Übergang vom Niveau Absenken zu Normal oder Komfort, oder auch beim Übergang vom Niveau „Normal“ zu „Komfort“ beachtet der Regler, dass die gewünschten Raumtemperaturen zu Beginn des Niveaus möglichst bereits erreicht sein sollen. Dafür wird eine sog. „Vorhaltezeit“ verwendet, welche den Aufheizzeitpunkt entsprechend vorverlegt. Die maximale Vorhaltezeit ist beim klassischen Heizungsregler eine Einstellgröße, für die der Handwerker

Tabellenwerte je nach Isolierungsstandard des Hauses verwendet. Beim hier entwickelten neuartigen Heizungsregler wird der Wert selbst ermittelt.

Die aktuell nötige Vorhaltezeit wird aus einer Formel berechnet, welche eine maximale Vorhaltezeit zugrunde legt, die dann modifiziert wird je nach der aktuellen Außentemperatur, der aktuellen Raumtemperatur oder der Verweilzeit im aktuellen niedrigen Niveau, je nachdem welche Messgrößen zur Verfügung stehen.

Während der Vorhaltezeit wird die Vorlauf Solltemperatur nicht hochadaptiert, da sonst die Trägheit des Gebäudes zu unnötig hohen Anstiegen führen würde. Stattdessen wird als Startwert der Vorlauf Solltemperatur das arithmetische Mittel aus der Vorlauf Solltemperatur der selbst berechneten Heizkennlinie und der Vorlauf Solltemperatur genommen, die zuletzt im selben (zukünftigen) Niveau verwendet wurde.

Ist beim Erreichen des höheren Niveaus die Ventilöffnung noch zu groß, wird die max. Vorhaltezeit hochadaptiert. Wird die Sollventilöffnung bereits vor Ablauf der Vorhaltezeit erreicht, wird sie nach unten adaptiert.

### **2.3.7 Vorteile der volumenstromgeführten Heizung**

#### Vorteil der volumenstromgeführten Heizung bei der Inbetriebnahme:

- Für den Handwerker entfallen die vielen komplizierten Einstellungen, die er sich teils aus Tabellenwerten herauslesen müsste, teils schätzen und dann später nachkorrigieren.
- Eine Inbetriebnahmefunktion testet vollautomatisch viele Funktionen der Heizungsanlage und meldet dem Handwerker sofort zurück, welche Module erkannt wurden (z.B. wie viele Heizkreise, Warmwasserbereitung, Zirkulation etc.), ob sie betriebsbereit sind, welche Einstellungen gemacht werden müssen usw. (siehe Abschnitt 2.8.)

#### Vorteil bei der Bedienung:

- Wollen die Bewohner kurzzeitig ein höheres Temperaturniveau in einzelnen Räumen, dann reicht bei der volumenstromgeführten Heizung das Aufdrehen der Thermostatventile aus, denn die Vorlauf Solltemperatur wird automatisch angehoben. Dagegen müssen bei den konventionellen Heizkonzepten zusätzlich Einstellungsänderungen am Regler vorgenommen werden.
- Die Heizung erfasst durch die Volumenstromkontrolle den Wärmebedarf im ganzen Haus, nicht nur in einem Führungsraum, der evtl. nicht repräsentativ ist.
- Durch die Volumenstromsensoren in den Heizkreisen, im Kesselkreis und bei Verwendung des Speichers „AquaExpresso“ auch im Warmwasserkreis werden Wärmeerzeugung und Verbrauch transparent. Mit zusätzlichen externen Wärmemengenzählern können auch Volumenströme und Wärmeleistungen bei Zusatzkesseln wie einem Stückholzkessel oder Pellets-Ofen erfasst und in der App angezeigt werden.

#### Vorteil für die Energieeinsparung:

- Bei fehlender Wärmeabnahme aufgrund Sonneneinstrahlung oder interner Gewinne schaltet sich die Heizung selbständig komplett ab: Die Heizkreispumpe ist aus und weder der Kessel noch der Puffer werden auf Solltemperatur gehalten.
- Der Systemregler kann bei der Radiatorheizung durch die direkte Ansteuerung der Heizkreispumpe die beiden Steuergrößen Volumenstrom und Vorlauf-Solltemperatur so abstimmen, dass die richtige Wärmemenge in den Heizkreis eingebracht wird und dabei gleichzeitig Brennwertkessel mit besonders niedriger Rücklauf-temperatur arbeiten.

## 2.4 Optimierung der Kesselansteuerung

Im Kesselmodul des Reglers wird unterschieden nach:

- Hauptkessel
- Scheitholzessel, angeschlossen über eine Erweiterungsplatine
- Pelletsofen, angeschlossen über eine Erweiterungsplatine.

Die Scheitholzessel – und Pelletsofenregelung war bereits im bisherigen Heizungsregler sehr ausgereift und bewirkte den Vorrang oder auf Wunsch sogar das ausschließliche Heizen mit diesen Kesseltypen mit regenerativem Brennstoff. Diese Regel-Algorithmen wurden im Rahmen des Projekts nicht nennenswert verändert.

Bei der Ansteuerung des Hauptkessels gab es folgende Verbesserungen:

### 2.4.1 0-10V-Signal

Zusätzlich zu den Paradigma-eigenen Gasbrennwertkesseln, Pellets-Brennwertkesseln und Pelletskesseln, die automatisch erkannt werden, kann nun ein Fremdkessel auch mittels eine 0-10V-Signals angesteuert werden statt nur über den B1-Kontakt. So kann der Fremdkessel nicht nur ein – und ausgeschaltet werden, sondern es kann auch ein Sollwert übermittelt werden für eine gleichmäßigere und brennstoffsparende Betriebsweise.

### 2.4.2 Anfahrentlastung

Für Fremdkessel wurde eine Kessel-Anfahrentlastung entwickelt: Wurde eine minimale Kesseltemperatur am Regler eingestellt, dann wird der Kessel beim schnellen Erreichen dieser Temperatur unterstützt: Bekommt der Kessel einen Sollwert, dann wird ab und zu die Kesselpumpe kurz eingeschaltet, um am Kesselvorlauffühler die Kesseltemperatur zu messen. Erst wenn sie erreicht ist, wird die Kesselpumpe auf kleinster Stufe eingeschaltet. Nach einer Weile wird die Kesselpumpe dann so drehzahl geregelt dass die Kesselvorlauftemperatur ihren Sollwert erreicht. Ohne Kessel-Anfahrentlastung wäre die Kesseltemperatur über längere Zeit zu niedrig, was Korrosion begünstigt und die Abgaswerte verschlechtert.

### 2.4.3 Flexible Nachlaufzeit

Die Kesselpumpennachlaufzeit wird optimiert. Zwar gibt es für jeden Kesseltyp eine bestimmte feste Nachlaufzeit, aber die Kesselpumpe kann während dieser Nachlaufzeit ausschalten, falls die Kesselvorlauftemperatur schon unter die Speichertemperatur, unter die Rücklauftemperatur + 2 K oder unter die minimale Kesseltemperatur gefallen ist. Sie kann wieder einschalten, falls die Kesseltemperatur wieder steigt, was beim Pelletskessel durchaus der Fall sein kann. Nach einer Warmwasserbereitung wird die Restwärme des Kessels für den Heizbetrieb genutzt, falls entschieden wurde, dass ausreichend Heizbedarf vorhanden ist. Falls nicht, wird sie in den Warmwasserspeicher eingebracht. Diese angepasste Nachlaufzeit bewirkt, dass die Restwärme im Kessel optimal genutzt wird.

### 2.4.4 Neue Kesselpumpenansteuerung

Zu Beginn einer Speicherbeladung (Warmwasserbereitung oder Pufferbeladung), wenn der Speichersollwert weit unterschritten ist, wird die Kesselpumpe auf den Kesselsollwert – 1 K geregelt. Dies bewirkt, dass die interne Kesselregelung die Kesselleistung ständig erhöhen muss, damit der Sollwert gehalten wird. Das bewirkt einen schnellen Anstieg der Speichertemperatur. Beim Brennwertkessel wird dann, sobald die Speichertemperatur nur noch 2 K unter ihrem Sollwert liegt, die

Kesselpumpendrehzahl langsam wieder reduziert, um so auch die Kesselleistung indirekt zu reduzieren und den Wirkungsgrad zu verbessern.

### **2.4.5 Schaltdifferenzen bei der Pufferbeladung**

Beim bisherigen Heizungsregler war die Einschaltdifferenz bei der Pufferbeladung einstellbar (Standardeinstellung 5 K). Ausgeschaltet wurde wenn am Fühler TPO (Puffer oben) der Puffersollwert erreicht war UND wenn am Fühler TPU (Puffer unten) der Puffersollwert minus der halben Schaltdifferenz erreicht war. Problematisch daran ist, dass der Kesselrücklauf am Ende der Beladung fast dem Puffersollwert entspricht und damit sehr viel heißer ist als der Heizkreisrücklauf. Das verringert den Brennwertnutzen deutlich. Da beim Brennwertkessel ein Puffer oder Pufferbereich im Kombispeicher eigentlich unnötig ist und nur aufgrund einer Solaranlage zur Heizungsunterstützung eingesetzt wird, musste man diese Einbußen am Kesselwirkungsgrad streng genommen der Solaranlage anlasten, was dazu führte, dass bis zu 4 m<sup>2</sup> an Kollektorfläche nur dazu nötig waren um diesen Nachteil aufzuwiegen. Erst bei deutlich größeren Kollektorflächen sank der Primärenergieverbrauch durch die Solaranlage.

Der Heizungsregler „Ökoko“ verwendet für Brennwertkessel folgende Schaltdifferenzen / Schaltbedingungen:

#### Pufferbeladung beginnen wenn

$TPO < \text{Puffersollwert} - 4 \text{ K}$

#### Pufferbeladung beenden wenn

$TPO > \text{Puffersollwert} + 2 \text{ K}$     **UND**     $TPU > TPU_{\text{start}} + 2 \text{ K}$     **ODER**

$TPO > \text{Puffersollwert}$     **UND**     $TPU > TPU_{\text{anstieg}}$     **ODER**

$TPO > \text{Puffersollwert} + 6 \text{ K}$

Dabei ist TPUstart der Wert des TPU zu Beginn der Pufferbeladung und  $TPU_{\text{anstieg}} = (2 * TPU_{\text{start}} + \text{Puffersollwert}) / 3$ . So bleibt die Kesselrücklauftemperatur trotz Puffer fast so niedrig wie bei einer direkten Beladung des Heizkreises.

Bei allen anderen Kesseln (ohne Brennwertnutzen) gelten folgende Schaltbedingungen:

#### Die Pufferbeladung beginnt wenn:

$TPO < \text{Puffersollwert} - \text{Einschaltdifferenz}$ .

#### Die Pufferbeladung endet, wenn:

$TPO > \text{Puffersollwert} + \text{Ausschaltdifferenz}_{TPO}$  und  $TPU > \text{Puffersollwert} + \text{Ausschaltdifferenz}_{TPU}$  **ODER**

$TPO > \text{Maximum aus Puffersollwert} + 12 \text{ K und Mindestkesseltemperatur} + 8 \text{ K}$ .

In der folgenden Abbildung ist eine Pufferbeladung ohne Sollwerterhöhung dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass die Pufferbeladung stoppt bevor die Kesselrücklauftemperatur stark ansteigt.

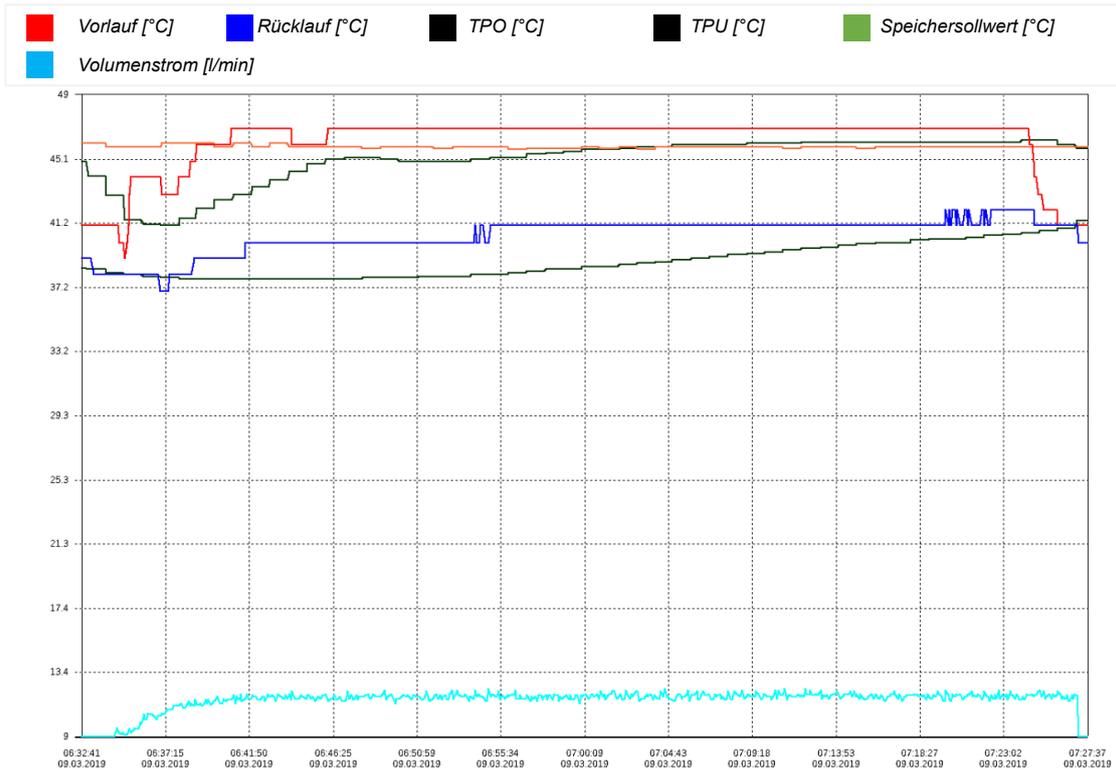


Abb. 2.4 Pufferbeladung ohne Sollwerterhöhung

Dazu im Vergleich die Pufferbeladung des konventionellen Heizungsreglers: Es wird versucht, den Puffer bzw. Pufferbereich (Fühler TPO bis Fühler TPU) im Kombispeicher möglichst voll zu beladen. Die Kesselrücklauftemperatur steigt stark an gegen Ende der Beladung, was den Brennwertnutzen und damit den Kesselwirkungsgrad verringert.

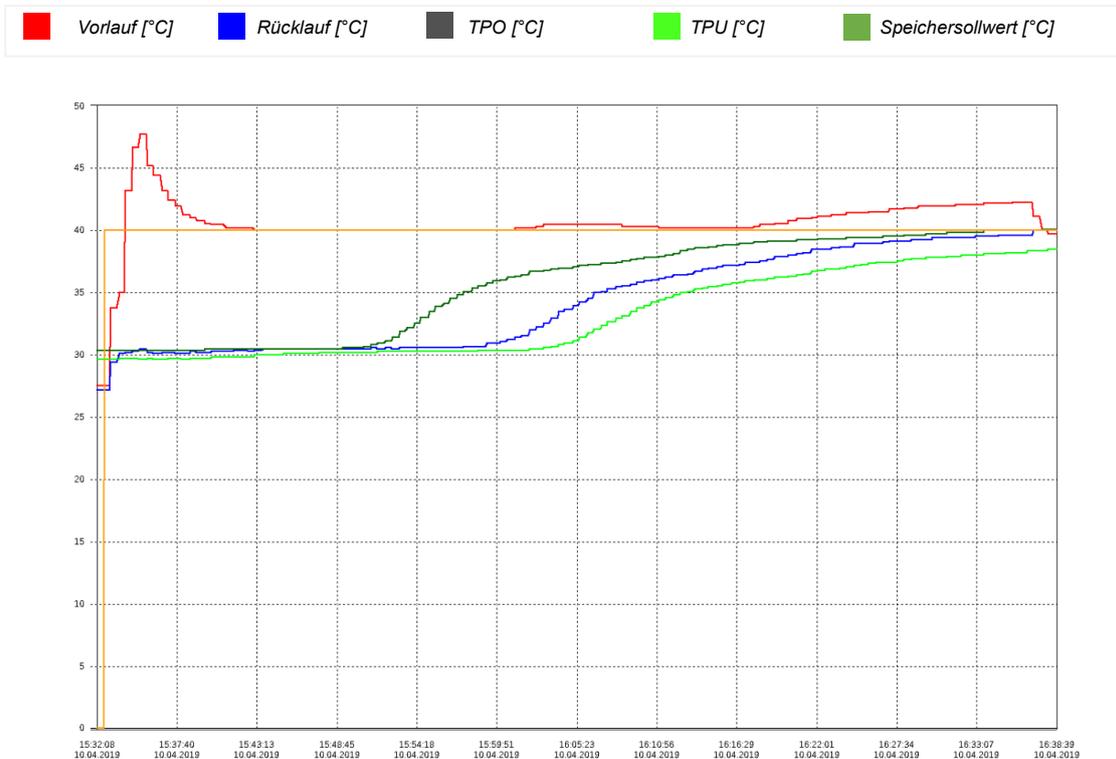


Abb. 2.5 Pufferbeladung mit „Standard“ Heizungsregler

Bei den Schaltdifferenzen wird unterschieden, ob der Kessel schwer oder leicht ist, und kalt oder nicht kalt. Als schwer gelten alle Pelletskessel, bei Fremdkessel ist der Default „schwer“ und es soll später anhand der Auskühlzeit bestimmt werden, ob es wirklich ein schwerer Kessel ist. Ein kalter Kessel ist einer, der seit mind. 2 h aus war wenn er einen neuen Sollwert bekommt.

*Tabelle 2.1 Ein- und Ausschaltdifferenzen für verschiedene Kesseltypen*

Schaltdifferenzen	Einschaltdiff.	Ausschaltdiff. TPO	Ausschaltdiff. TPU
Kessel schwer und kalt	1 K	6 K	0 K
Kessel schwer, nicht kalt	5 K	3 K	-2 K
Kessel leicht	4 K	2 K	-3 K

Die Schaltdifferenzen für schwere kalte Kessel wurden so gewählt, dass die Pufferbeladung einerseits nicht zu spät beginnt und dadurch der Heizkreis unterkühlt. Andererseits sollte ein selten laufender schwerer Kessel länger laufen, daher darf er den Puffer überladen. Die Temperaturdifferenz zwischen TPO und TPU bei Ende der Pufferbeladung sollte auch beim Nicht-Brennwertkessel nicht zu klein sein, damit es nicht zum Takten des Kessels kommt: Dies ist dann der Fall wenn die Kesselsolltemperatur aufgrund des heißen Rücklaufs so weit überschritten wird, dass die interne Kesselregelung den Kessel abschaltet.

Immer dann, wenn eine Ausschaltdifferenz TPO gilt, die größer als 0 ist, wird gegen Ende der Beladung der Kesselsollwert entsprechend erhöht.

#### **2.4.6 Kontinuierliche Pufferbeladung**

Der optimale Betriebszustand für jeden Kessel im Heizbetrieb wäre ein gleichmäßiges Durchlaufen während des ganzen Heizbetriebs, d.h. der Puffer wird ebenso schnell beladen wie entladen und der TPO hat immer annähernd den Puffersollwert, während der Kesselrücklauf kaum über der Heizkreisrücklauftemperatur liegt. Der Vorteil für den Brennwertkessel ist klar die niedrige Rücklauftemperatur. Der Vorteil für den Pelletskessel ist der kontinuierliche Betrieb ohne die vielen Start – und Ausbrandphasen, während derer sich die Abgaswerte verschlechtern, sowie mehr Asche anfällt und Verteerungsgefahr des Kessels besteht.

Durch die Durchflussmessung in den Heizkreisen ist es möglich, die mittlere Heizkreisleistung zu bestimmen und die Kesselleistung an sie anzupassen, so dass eine kontinuierliche Pufferbeladung erreicht wird. Beim Gasbrennwertkessel kann über das OpenTherm-Protokoll die aktuelle Kesselleistung ausgelesen werden sowie eine maximale Leistung übermittelt werden. Bei anderen Kesseln kann die Kesselleistung indirekt über die Kesselpumpendrehzahl beeinflusst werden, falls die Kesselpumpe am Heizungsregler angeschlossen ist und ein Durchflusssensor im Kesselkreis vorhanden ist: Dann wird der Kesselvolumenstrom so begrenzt, dass die Kesselleistung der Summe der Leistung in den Heizkreisen entspricht. Die interne Kesselregelung sorgt selbst dafür, dass die Kesselleistung reduziert wird, wenn die Kesselvorlauftemperatur aufgrund eines verringerten Durchsatzes zu hoch wird.

Sind die erwähnten Grundvoraussetzungen gegeben, dann beginnt der Modus „kontinuierliche Pufferbeladung“ während einer Pufferbeladung dann, wenn die aktuelle gemittelte Heizkreisleistung nur wenig unter der minimalen Kesselleistung liegt und der Puffer oben schon relativ nah an seinem Sollwert ist. In Abb. 2.6 ist die kontinuierliche Pufferbeladung zu sehen.

#### **2.4.7 Dynamische Kesselsollwerterhöhung**

Gibt es keinen Puffer, dann bekommt der Kessel im Heizbetrieb als Sollwert das Maximum des Vorlauf Sollwerts aller Heizkreise. Gibt es einen Puffer, dann ist der Puffersollwert das Maximum des Vorlauf Sollwerts aller Heizkreise, und der Kessel wird bei Bedarf eingeschaltet, um den Puffer nachzuheizen wie in Abschnitt 2.4.6 erklärt.

Es gibt allerdings Fälle, bei denen ein Aufschlag auf den so berechneten Kesselsollwert nötig wird:

- Bei einem Puffersystem kann es bei starkem Durchsatz im Heizkreis und geringerem Durchsatz im Kesselkreis dazu kommen, dass der Puffer schneller entladen wird als beladen, wodurch die Heizkreisvorlauftemperatur zu kühl bleibt. Gerade bei modernen Gasbrennwertkesseln mit integrierter Hocheffizienzpumpe darf der Heizungsregler die Kesselpumpe nicht mehr selbst ansteuern. Daher kommt es vor, dass die Kesselpumpe mit zu niedriger Drehzahl läuft. Der Kessel hält dann zwar die über OpenTherm übermittelte Vorlaufsolltemperatur ein, aber bleibt auf einem Arbeitspunkt mit niedriger Leistung hängen, während der Heizkreis unterkühlt.
- Ein anderer Fall ist ein Heizsystem ohne Puffer, aber mit einer hydraulischen Weiche zwischen Kessel und Heizkreisen. Diese wird von Handwerkern manchmal eingesetzt, um bei diffusionsoffenen Fußbodenheizkreisen den Kessel vor Sauerstoffeintrag zu schützen, manchmal aber auch nur, um sich nicht um die hydraulische Abstimmung kümmern zu müssen und den Kessel mit seiner internen Pumpe sowie die Heizkreisstation mit ihrer eingebauten Pumpe ohne Änderung verwenden zu können. Die hydraulische Weiche hat, abgesehen vom Verlust an Brennwertnutzen durch das Hochmischen der Rücklauftemperatur, den Nachteil dass die Kesselvorlauftemperatur heruntergemischt wird und der Heizkreisvorlauf zu kühl bleibt.

Dieses Problem löste der bisherige Heizungsregler durch einen Einsteller „Kesselüberhöhung“, der nicht nur einen Aufschlag auf die Kesselvorlauftemperatur bewirkte, sondern auch auf den Puffersollwert. Ungünstig an so einem festen Einstellwert ist, dass er jedes Mal wenn es im Heizkreis nicht warm genug wird, erhöht wird, aber meist nie wieder verringert. Das führt zu deutlichen Systemverlusten, da der Speicher dauerhaft wärmer bleibt und dadurch mehr Wärmeverluste hat, zudem ist die Kesselrücklauftemperatur erhöht, wodurch der Brennwertnutzen leidet. Beim Systemregler „Ecoquenz“ wird daher nur unter bestimmten Bedingungen ein Aufschlag auf die Kesselsolltemperatur gemacht:

### Beim Puffersystem:

- Beim Gasbrennwertkessel: Wenn der Kessel schon seit ein paar Minuten läuft und der Kesselsollwert erreicht ist, aber der TPO deutlich zu kalt bleibt und auch nicht ansteigt, dann wird nach 5 min die Kesselsolltemperatur maximal hochgesetzt, d.h. auf die Kesselrücklauftemperatur plus der maximalen Kesselspreizung. Dies bewirkt ein Hochregeln der Kesselpumpe und der Kesselleistung. Sobald der TPO seinen Sollwert fast erreicht hat, wird auf „kontinuierliche Pufferbeladung“ umgeschaltet, d.h. die Kesselleistung wird begrenzt so dass die Pufferbeladung mit angepasster Leistung weiterläuft.
- Beim Pelletskessel mit ModBus-Ansteuerung: Hier ist es möglich, die Drehzahl der internen Kesselpumpe indirekt zu beeinflussen. Daher wird im o.g. Betriebszustand die minimale Kesselpumpendrehzahl nach und nach immer weiter erhöht. Dies bewirkt, dass der Kessel auch seine Leistung steigern muss, da er sonst seinen Sollwert nicht mehr erreicht. Es bewirkt außerdem ein Angleichen der Volumenströme im Kesselkreis und Heizkreis.
- Bei allen anderen Kesseln wird der Kesselsollwert allmählich immer weiter erhöht.

### Ohne Puffer:

Wenn Heizbetrieb ist und die Heizkreisvorlauftemperatur bleibt dauerhaft deutlich unter ihrem Sollwert, obwohl der Kessel seinen Sollwert erreicht, dann wird nach und nach ein immer größerer Aufschlag auf den Kesselsollwert gemacht.

Endet die Pufferbeladung bzw. der Heizbetrieb, wird der Aufschlag auf den Kesselsollwert wieder gelöscht. Denn in Zeiten geringerer Heizlast ist der Aufschlag vermutlich wieder unnötig. Abb. 2.6 zeigt eine Pufferbeladung, bei welcher der Puffer gleichzeitig stark entladen wird von einem Fußbodenheizkreis, mit einem Heizkreisvorlaufsollwert von 35°C. Da die obere Puffertemperatur zu langsam ansteigt, wird der Kesselsollwert erhöht. Dadurch steigt die Kesselleistung an. Sobald der Puffer oben den Heizkreisvorlaufsollwert hat, beginnt der Modus „kontinuierliche Pufferbeladung“, bei dem die Kesselleistung limitiert wird. Im Ergebnis bekommt der Heizkreis die richtige Temperatur während die Kesselrücklauftemperatur nicht über die Heizkreisrücklauftemperatur ansteigt und somit der Brennwertnutzen optimal ist.

In komplexen Systemen gibt es immer wieder Fehlfunktionen. Die Fehlersuche kostet Zeit und Geld, daher unterstützt der Heizungsregler „Ökoko“ den Handwerker und auch den Anlagenbetreiber sehr weitgehend dabei:

- Es werden aktuell 132 Mess- und Kontrollwerte im 5s- oder 1 min-Takt auf eine SD-Karte geloggt, die in den Regler eingesteckt werden kann. Im Fehlerfall können die Datenfiles mit einem kostenlos zur Verfügung gestellten Programm grafisch oder tabellarisch dargestellt werden und in verschiedene Ausgabeformate konvertiert werden.
- Auf der SD-Karte wird auch eine sog. Parameter-Datei angelegt, in die besondere Ereignisse mit Datum und Uhrzeit eingetragen werden: Störmeldungen, Inbetriebnahme, erfolgreich durchlaufene Messprogramme, Software-Updates, Stromunterbrechungen, Änderungen bei der Netzwerkverbindung und Einstellungsänderungen über App oder die internetbasierte Fernüberwachung. Zudem wird in zyklischen Abständen der ganze Satz der aktuellen Einsteller ausgegeben, denn nur wenn die Einstellungen bekannt sind, können die Messdaten sinnvoll ausgewertet werden.
- Störmeldungen werden sehr spezifisch ausgegeben: Der Störcode enthält zunächst die Modulnummer, danach die Art der Störung. Zurzeit gibt es 12 Module und 24 verschiedene Störungsarten.
- Zur Unterstützung des Handwerkers bei der Optimierung der Anlage gibt es auch Warnungen, beispielsweise, dass der Raumtemperaturfühler immer wieder verdächtig warm wird. Hier besteht vom Anschluss auf der Platine her Verwechslungsgefahr mit dem Rücklauffühler. Es gibt auch Warnungen, wenn bei der Kalibrierung im Heizkreis eine ungünstig hohe Abweichung zwischen Vor- und Rücklauffühler festgestellt wurde, denn dann ist eine zuverlässige Wärmemengenzählung nicht mehr möglich. Das System der Warnungen soll erweitert werden und künftig auch bei energetisch ungünstigen Zuständen warnen.

Der Heizungsregler verfügt über ein Diagnose-Modul, welches den anderen Modulen Funktionen zur Verfügung stellt, um Störungen und Warnungen zu setzen und Einträge in die Parameter-Datei zu schreiben. Das Diagnose-Modul berechnet zudem, wann die App auf die jährliche Wartung der Heizungsanlage hinweisen soll. Es erkennt, wenn externe Regler wie der Solarregler oder der Frischwasserregler sich nicht mehr auf dem Bus melden, wenn externe Wärmemengenzähler, die über MBus angeschlossen waren, sich nicht mehr melden, und auch wenn Erweiterungsplatinen für Scheitholzkessel, Pelletsofen etc. plötzlich nicht mehr gefunden werden können. Nach einer gewissen Wartezeit wird dann eine Störmeldung gesetzt.

Alleine die Tatsache, dass Volumenströme in Heiz- und Kesselkreis gemessen werden und dass diese Messwerte sekundenaktuell in der App angezeigt werden, hilft enorm bei der Fehlersuche. Es ist geplant, nach und nach immer mehr automatisierte Diagnostik einzuführen.

Die folgende Abbildung zeigt eine Pufferbeladung mit dynamischer Sollwerterhöhung.

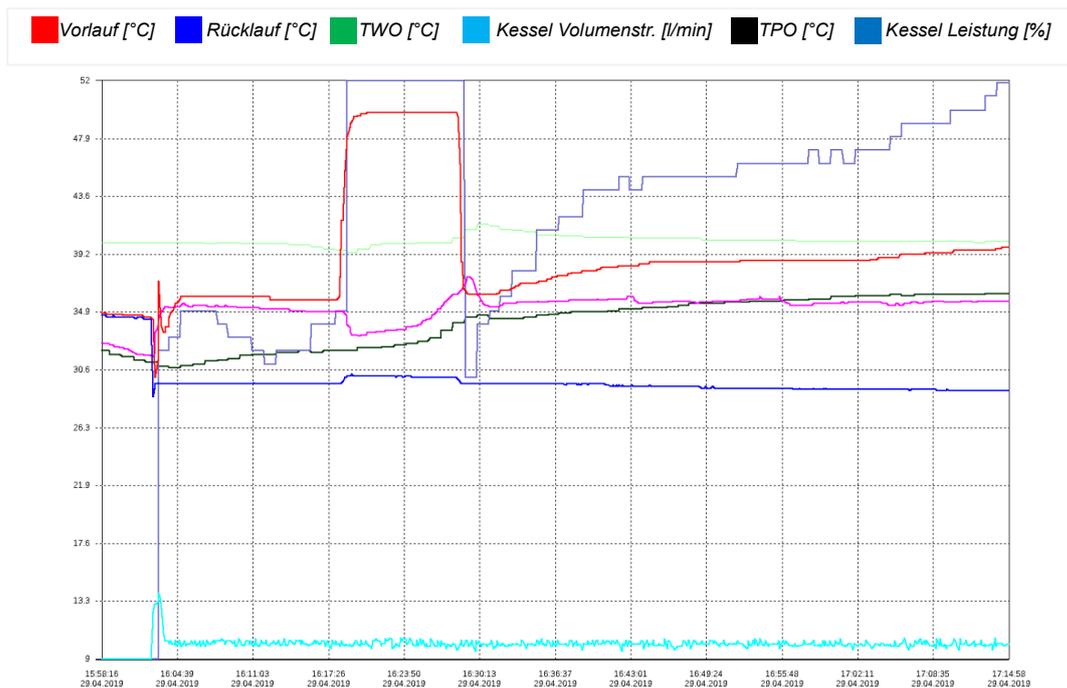


Abb. 2.6 Pufferbeladung mit dynamischer Sollwerterhöhung und anschließender kontinuierlicher Pufferbeladung, Heizkreisvolumenstrom = 15 l/min

Der Heizkreisvorlaufsollwert beträgt 36°C, aber der TPO bleibt zu kalt und steigt nur langsam. Daher wird der Heizkreisvorlauf stetig kälter. Die dynamische Sollwerterhöhung bringt einen schnellen Anstieg der Puffertemperatur. Anschließend wird die Kesselleistung (gelb) wieder begrenzt, so dass der Puffer ebenso schnell beladen wie entladen wird. Die Kesselrücklauftemperatur bleibt auf dem Niveau der Heizkreisrücklauftemperatur.

### 2.4.8 Warmwasservorrangschaltung

Gibt es keinen Puffer, dann ist klar, dass der Kessel bei Warmwasserbedarf sofort auf den Warmwasserspeicher umschaltet, um diesen zu beladen. Die Heizkreispumpen schalten währenddessen ab. Bei einem Kombispeicher wäre dies nicht nötig, kann aber sinnvoll sein, falls der Kessel schwach ist im Vergleich zur benötigten Heizleistung, denn dann dauert die Warmwasserbereitung sehr lange, was zu Komforteinbußen führen kann. Beim konventionellen Heizungsregler ist „Warmwasservorrang“ ein Einsteller im Handwerkerbereich. Beim Systemregler „Ökoko“ wird hingegen gemessen, wie lange die Warmwasserbereitung ohne Warmwasservorrang gedauert hat. Waren es mehr als 50 min, dann wird für 31 Tag Warmwasservorrang gesetzt. Danach wird der Warmwasservorrang neu ermittelt, denn bei schwächerem Heizbedarf ist er evtl. gar nicht nötig.

## 2.5 Vorrang für die Solaranlage

Gerade Besitzer einer größeren thermischen Solaranlage, die auch Heizungsunterstützung macht, möchten gerne Einfluss auf den Heizbetrieb nehmen, um der Solaranlage Vorrang zu verschaffen. Manchmal möchten sie auch den Kessel für einige Zeit komplett unterdrücken, um zu sehen wie gut die Solaranlage alleine für Warmwasser und Heizwärme sorgt.

Der Heizungsregler „Ökoko“ bietet dem Anlagenbetreiber dafür den Einsteller „Solarvorrang“ in 3 Stufen an, wenn ein Solarregler des richtigen Typs über die Busleitung mit dem Heizungsregler verbunden ist und seine Werte übermittelt. Der Einsteller kann folgende Werte annehmen:

- kein Solarvorrang

- *Normal*
- *Nur Solar*

Bei Solarvorrang = „Nur Solar“ wird der Kessel nicht mehr eingeschaltet, weder zur Warmwasserbereitung noch für die Heizung. Es ist aber möglich, durch den Schalter „Warmwasser einmal aufheizen“ eine einmalige Beladung des Warmwasserspeichers auf den Sollwert auszulösen. Die Auswirkung des „normalen Solarvorrangs“ auf die Warmwasserbereitung sieht folgendermaßen aus:

- Wenn der Kollektor warm genug ist, so dass bald solare Leistung zu erwarten ist
- und der Warmwasserspeicher ist noch nicht zu kalt ( $T_{WO} > \text{Sollwert} - 12 \text{ K}$  und  $T_{WO} > 35^\circ\text{C}$ )
- dann wird der Kessel für maximal 30 min gesperrt, wobei die Wartezeit nur dann gezählt ist wenn die Warmwassertemperatur unter dem Sollwert  $-4 \text{ K}$  liegt.
- Die während der Kesselsperrzeit ermittelten Solargewinne werden extra gezählt und dem Betreiber angezeigt.

Bei der Pufferbeladung gibt es die entsprechenden Bedingungen für den Beladungszustand des Pufferspeichers und zusätzlich weitere Bedingungen, da nicht alle Solaranlagen groß genug sind für eine Heizungsunterstützung: Es muss einen Kombispeicher geben oder einen Puffer, der von der Solaranlage beladen werden kann, zudem muss die Solaranlage es geschafft haben, in den letzten 7 Tagen mind. einmal 30% des Heizbedarfs zu erbringen.

In der Simulation mit einer Solaranlage von  $9 \text{ m}^2$  hat sich gezeigt, dass eine längere Wartezeit als 30 min (getestet wurden bis zu 100 min) nicht zu mehr Solargewinnen während der Sperrzeit führt. Es ist tatsächlich so, dass der Solarvorrang in Stufe 1 nicht zu deutlich mehr Gesamt-Solargewinn führt. Denn im Sommer hält die Solaranlage den Speicher sowieso auf hoher Temperatur, d.h. der Kessel bleibt auch ohne Solarvorrang aus. Im Winter hingegen sind die Lasten zu hoch und die Einstrahlung zu niedrig. In der Übergangszeit kommt es zwar schon vor, dass die Solaranlage Vorrang bekommt und zunächst einen Kessellauf verzögert oder ersetzt, Aber da der Speicher für den Sommer ausgelegt wird, wird er in der Übergangszeit nie voll beladen, d.h. die Solaranlage hätte ohnehin all ihre Gewinne im Speicher untergebracht. Dadurch steigt der Solargewinn durch den Solarvorrang kaum an. Die Primärenergieeinsparung ist aus denselben Gründen auch gering, denn wenn die komplette Solarwärme gespeichert werden kann, dann wird sie in jedem Fall auch genutzt um Nachheizenergie einzusparen. Es ist aber anzunehmen, dass bei deutlich größeren Solaranlagen, die schon während der Übergangszeit, wenn noch Heizbedarf ist, in Stagnation gehen, der Einfluss des Solarvorrangs größer ist.

## 2.6 Energiemonitoring

In den Heizkreisen und im Kesselkreis wird aus Vor- und Rücklauftemperatur und dem Durchsatz ständig die aktuelle Leistung berechnet sowie die Wärmemengen aufaddiert.

Für die Wärmekapazität und Dichte des Wassers wird die temperaturabhängige Formel aus den Eichvorschriften für geeichte Wärmemengenzähler verwendet. [6]

Die Analyse zeigte, dass der Hauptfehler bei der Wärmemengenzählung nicht von der Durchsatzmessung mit dem Vortexsensor herrührt, sondern von den Abweichungen der Temperatursensoren. Zwar werden in Vor – und Rücklauf jeweils PT1000-Sensoren verwendet, aber es zeigte sich, dass der im Sensor integrierte Fühler für den Rücklauf eine sehr eigene Fehler-Charakteristik aufweist, und zwar eine praktisch temperaturunabhängige Abweichung nach oben von mehr als  $1 \text{ K}$ . Der Vorlauffühler hingegen zeigt eine kleinere Abweichung, die aber temperaturabhängig ist und von der Isolierung der Fühlerhülse abhängt. Allgemein wird bei diesem Regler verlangt, dass der Vorlauffühler in einer Fühlerhülse stecken muss (nicht als Anlegefühler ausgeführt), die ihrerseits gut gegen die Umgebung isoliert sein muss.

In Kapitel 7.3.1 wird beschrieben, wie die Messgenauigkeit der Differenz Vorlauf – Rücklaufemperatur durch eine Kalibriermessung verbessert werden konnte.

Der Heizungsregler bietet zudem die Möglichkeit, externe geeichte Wärmemengenzähler sowie einen Gaszähler über MBus anzuschließen. Gibt es solche externen Wärmemengenzähler für die Heizkreise bzw. den Kesselkreis, dann verwendet der Regler deren Werte für die Berechnung der Wärmemengen.

### 2.7 Solarer Autarkiegrad

Der Autarkiegrad für die thermische Solarenergie ist definiert als  $\text{Autarkie} = \frac{\text{Solarertrag}}{\text{Gesamtwärmelast}}$ . Der Autarkiegrad wird in der App berechnet und angezeigt. Um ihn möglichst genau zu berechnen, wird berücksichtigt, dass die an einem Tag nicht verbrauchte Solarwärme im Speicher aufgehoben werden kann und im nächsten Tag dann noch die Autarkie verbessert. Daher stellt der Regler der App eigene Variablen zur Berechnung des Autarkiegrads zur Verfügung, und zwar einen modifizierten Tages-Solarertrag, der eben diese gespeicherten Überschüsse vom Vortag enthält, und die Gesamtwärmelast inkl. Speicherverlusten (s.u.).

#### Berechnung der Gesamtwärmelast:

Die Gesamtwärmelast ist gegeben durch die Summe aus Warmwasser-, Zirkulations- und Heizkreisverbrauch plus den Speicherverlusten des aktuellen Tages, bis jetzt. Werden die Verbrauchsdaten nicht alle erfasst, z.B. weil nicht der Paradigma-eigene Frischwasserspeicher verwendet wird, dann wird die Gesamtwärmelast berechnet aus Solarertrag + Kesselverbrauch + evtl. Wärmeeintrag durch den Scheitholzessel oder Pelletsofen, falls vorhanden. Denn der Energieeintrag in den Speicher durch alle Wärmeerzeuger muss zumindest im Mittel dem Energieaustrag aus dem Speicher durch alle Wärmeverbraucher plus der Speicherverluste entsprechen.

#### 2.7.1 Berechnung der Speicherverluste

Falls als Speichertyp „Warmwasserspeicher“ gewählt wurde, gehen wir von einem 300Liter-Warmwasserspeicher mit täglichen Verlusten von 1,586 kWh aus, dies entspricht 66 W. [7] In allen anderen Fällen wird von einem 800-Liter-Kombispeicher mit täglichen Verlusten von 2,345 kWh ausgegangen, dies entspricht 98 W. [8]

#### 2.7.2 Berechnung des modifizierten Solarertrags

**Fall 1:** Die aktuelle Gesamtwärmelast ist größer als der heutige Solarertrag plus dem gespeicherten Solarüberschuss von gestern: Dann werden heute keine neuen Solarüberschüsse gespeichert. Die an die App übergebene Solarwärme entspricht dem heutigen Solarertrag plus dem von gestern gespeicherten Solarüberschuss. Es ergibt sich damit ein Autarkiegrad von unter 100%.

**Fall 2:** Die aktuelle Gesamtwärmelast ist kleiner als der heutige Solarertrag plus dem gespeicherten Solarüberschuss von gestern: Dann wird die an die App übergebene Solarwärme genau auf den Wert der Gesamtwärmelast gesetzt, damit sich ein Autarkiegrad von 100% ergibt. Es wird ein Solarüberschuss erzielt, und zwar der gemessene Solarertrag von heute plus dem gespeicherten Solarüberschuss von gestern, minus der heutigen Gesamtwärmelast. Dieser Solarüberschuss wird ständig neu berechnet und stromausfallsicher gespeichert.

Das Rechenverfahren ist sinnvoll, da ein Speicher in Wirklichkeit auch dazu beiträgt, Solarwärme für den nächsten Tag aufzuheben, um den Autarkiegrad zu steigern. Die Speicherverluste werden separat berücksichtigt.

## 2.8 Diagnosefunktionen

In komplexen Systemen gibt es immer wieder Fehlfunktionen. Die Fehlersuche kostet Zeit und Geld, daher unterstützt der Heizungsregler „Ökoko“ den Handwerker und auch den Anlagenbetreiber sehr weitgehend dabei:

- Es werden aktuell 132 Mess- und Kontrollwerte im 5s- oder 1 min-Takt auf eine SD-Karte geloggt, die in den Regler eingesteckt werden kann. Im Fehlerfall können die Datenfiles mit einem kostenlos zur Verfügung gestellten Programm grafisch oder tabellarisch dargestellt werden und in verschiedene Ausgabeformate konvertiert werden.
- Auf der SD-Karte wird auch eine sog. Parameter-Datei angelegt, in die besondere Ereignisse mit Datum und Uhrzeit eingetragen werden: Störmeldungen, Inbetriebnahme, erfolgreich durchlaufene Messprogramme, Software-Updates, Stromunterbrechungen, Änderungen bei der Netzwerkverbindung und Einstellungsänderungen über App oder die internetbasierte Fernüberwachung. Zudem wird in zyklischen Abständen der ganze Satz der aktuellen Einsteller ausgegeben, denn nur wenn die Einstellungen bekannt sind, können die Messdaten sinnvoll ausgewertet werden.
- Störmeldungen werden sehr spezifisch ausgegeben: Der Störcode enthält zunächst die Modulnummer, danach die Art der Störung. Zurzeit gibt es 12 Module und 24 verschiedene Störungsarten.
- Zur Unterstützung des Handwerkers bei der Optimierung der Anlage gibt es auch Warnungen, beispielsweise, dass der Raumtemperaturfühler immer wieder verdächtig warm wird. Hier besteht vom Anschluss auf der Platine her Verwechslungsgefahr mit dem Rücklauffühler. Es gibt auch Warnungen, wenn bei der Kalibrierung im Heizkreis eine ungünstig hohe Abweichung zwischen Vor- und Rücklauffühler festgestellt wurde, denn dann ist eine zuverlässige Wärmemengenzählung nicht mehr möglich. Das System der Warnungen soll erweitert werden und künftig auch bei energetisch ungünstigen Zuständen warnen.

Der Heizungsregler verfügt über ein Diagnose-Modul, welches den anderen Modulen Funktionen zur Verfügung stellt, um Störungen und Warnungen zu setzen und Einträge in die Parameter-Datei zu schreiben. Das Diagnose-Modul berechnet zudem, wann die App auf die jährliche Wartung der Heizungsanlage hinweisen soll. Es erkennt, wenn externe Regler wie der Solarregler oder der Frischwasserregler sich nicht mehr auf dem Bus melden, wenn externe Wärmemengenzähler, die über MBus angeschlossen waren, sich nicht mehr melden, und auch wenn Erweiterungsplatinen für Scheitholzkessel, Pelletsofen etc. plötzlich nicht mehr gefunden werden können. Nach einer gewissen Wartezeit wird dann eine Störmeldung gesetzt.

Alleine die Tatsache, dass Volumenströme in Heiz- und Kesselkreis gemessen werden und dass diese Messwerte sekundenaktuell in der App angezeigt werden, hilft enorm bei der Fehlersuche. Es ist geplant, nach und nach immer mehr automatisierte Diagnostik einzuführen.

## 2.9 Übersicht der zu regelnden Heizungssysteme

In der folgenden Abbildung ist eine typische Anlagenhydraulik mit einer thermischen Solaranlage (gestrichelt links), einem Kombispeicher mit Frischwasserstation (mittig), einem Kessel und zwei gemischten Heizkreisen abgebildet. Der Heizungsregler gibt den berechneten Sollwert an den Wärmeerzeuger und die thermische Solaranlage weiter.

Über die Ansteuerung der Heizkreispumpen (PHK) und den Mischern wird die Wärmeabgabe an den Heizkreis geregelt. Die Mischer sind notwendig, um unterschiedliche Temperaturniveaus der Heizkreise bedienen zu können und aufgrund der oftmals über dem Heizkreissollwert liegenden Speichertemperatur. Ursachen sind minimale Kesselsollwerte (z.B. Pelletskessel 65°C) oder eine thermische Solaranlage. Die Trinkwasserbereitung erfolgt mittels des Fühlers TWO. Die Pufferbeladung für die Heizung wird anhand der Fühlern TPO und TPU durchgeführt.

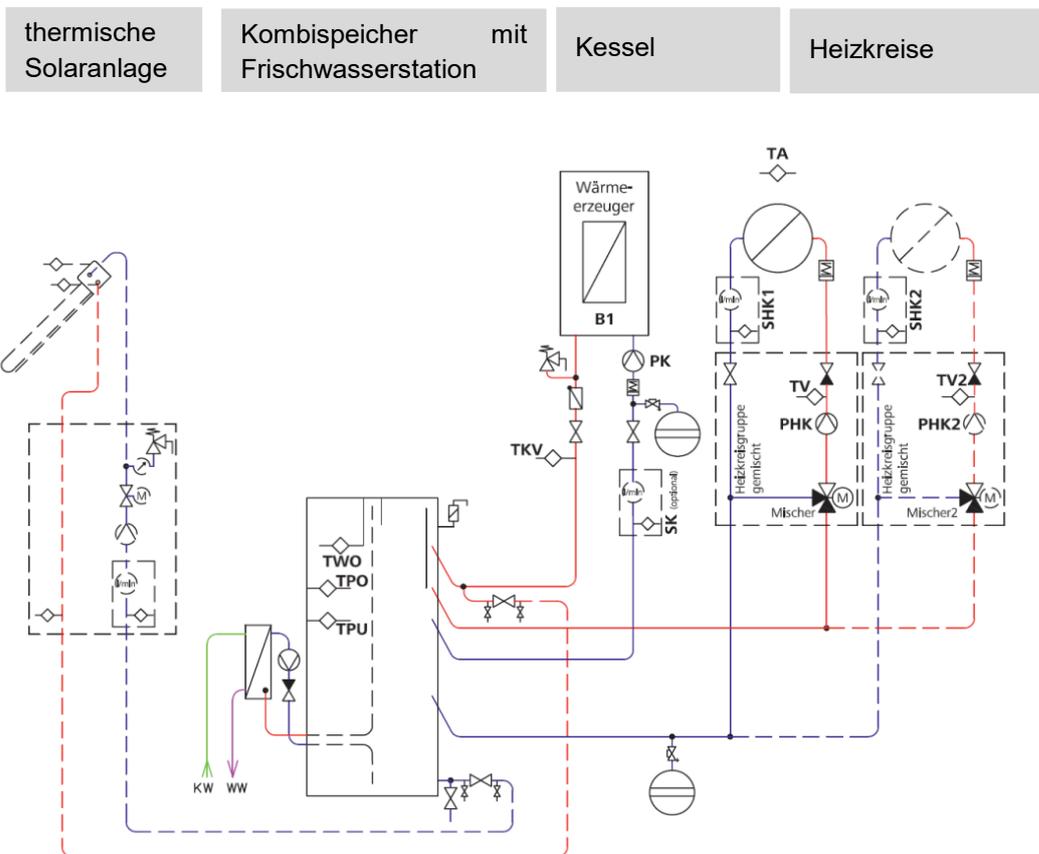


Abb. 2.7 Anlagenhydraulik Kombispeicher: Thermische Solaranlage (links), Kombispeicher mit Frischwasserstation (mittig), Wärmeerzeuger und zwei gemischte Heizkreise (rechts)

Ein Spezialfall stellt die Anbindung des Scheitholzessels, welcher am untersten Speicheranschluss angeschlossen wird, dar. Der Heizungsregler regelt den Sollwert über die Ansteuerung der Scheitholzesselpumpe (PKH) ein. Die entsprechende Anlagenhydraulik ist im Anhang im Kapitel 9.5 aufgeführt.

### 3 Entwicklung: Softwarearchitektur

Die Entwicklung der Software erfolgte in unterschiedlichen Projektgruppen die jeweils unterschiedliche Softwaremodule entworfen, programmiert und gepflegt haben. Um diese modularisierte Programmentwicklung zu ermöglichen, wurde die Versionsverwaltung *GIT* und zur Dokumentation des Codes *doxygen* eingesetzt. Da es den Entwicklern ermöglicht werden sollte Ihre bevorzugte Entwicklungsumgebung, incl. des darunterliegenden Betriebssystems, frei zu wählen, wurde der multiplattform Crosscompiler *arm-none-eabi-gcc* und ein entsprechend angepasstes *gnu-makefile* verwendet.

Um die Arbeit der Projektgruppen anhand des Programmcodes zu synchronisieren, wurde eine custom Präprozessor entwickelt und eingesetzt, der sicherstellt, dass die Integrität des Anwendung stets gewährt bleibt. Als Programmiersprachen kam für die hardwarenahen Treiber *c* und für die eigentliche Applikation *c++* zum Einsatz. Um die in unterschiedlichen Programmiersprachen erstellten Teile zu verbinden, kommt ein in *c* geschriebener aber mit dem *c++*-Compiler (*arm-none-eabi-g++*) übersetzte Wrapper zum Einsatz. Das folgende Bild zeigt den strukturellen Aufbau der Software.

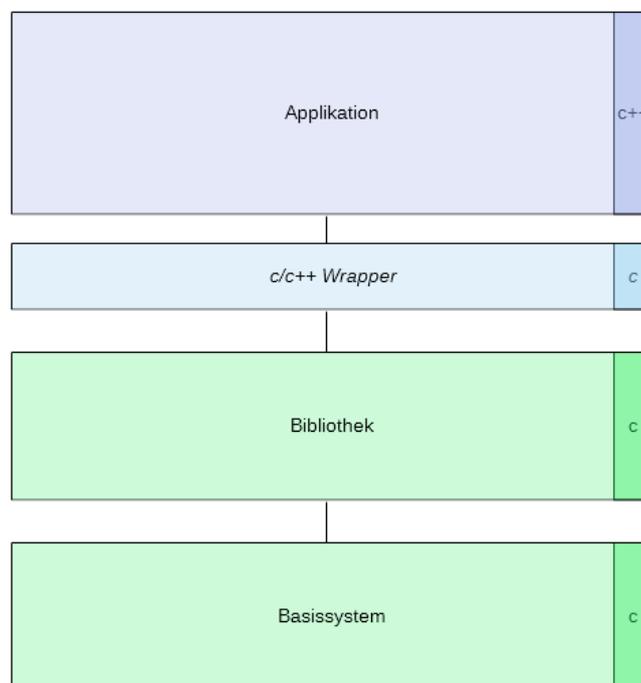


Abb. 3.1 Übersicht Softwarestruktur

### 3.1 Das Basissystem

Das Basissystem hat die Aufgabe den verwendeten Mikrocontroller zu initialisieren und das Aufspielen von Softwareupdates zu ermöglichen. Das Basissystem selber kann dadurch upgedatete werden, dass es als Applikation getarnt eingespielt, das eigentliche Basissystem löscht und durch das Update ersetzt wird. Bei diesem Prozess gibt es eine kurze Zeitspanne in der der Regler nicht vom Netz getrennt werden darf, da er sonst ohne Basissystem ist und im Feld nicht mehr aktiviert werden kann. Das folgende Bild zeigt die Funktionsblöcke, die das Basissystem realisiert.

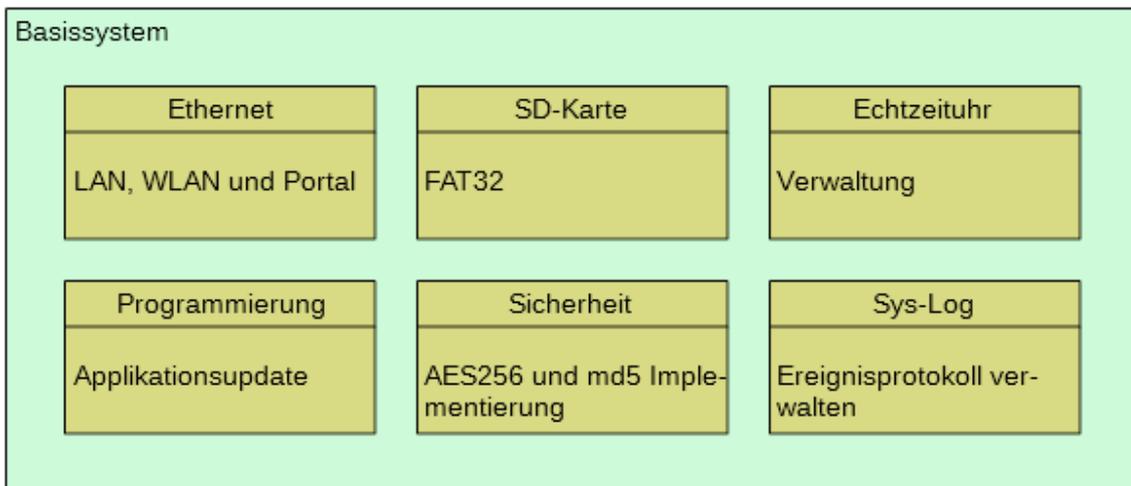


Abb. 3.2 Funktionsblöcke des Basissystems

Das Basissystem ermöglicht das Updaten des Reglers über LAN, WLAN und SD-Karte. Neben dem Update verwaltet das Basissystem auch ein Ereignisprotokoll, das auf eine vorhandene SD-Karte geschrieben wird, in dem verschiedene Ereignisse wie zum Beispiel das Aufspielen eines Updates, das Umschalten des Accesspointmodus oder das Auftreten eines unerwarteten Fehlers vermerkt werden.

Als weitere Aufgabe fällt dem Basissystem die Realisierung einer Echtzeituhr zu, da die Echtzeituhr des Mikrocontrollers durch die Ausführung des Programmcodes erheblich gestört wird und die damit einhergehende Ungenauigkeit der Zeitermittlung nicht tolerierbar war.

## 3.2 Die Bibliothek

Die Bibliothek beinhaltet die Treiber um die auf der Leiterplatte vorhandene Hardware ansprechen und auswerten zu können. Das folgende Bild zeigt die einzelnen Funktionsblöcke.

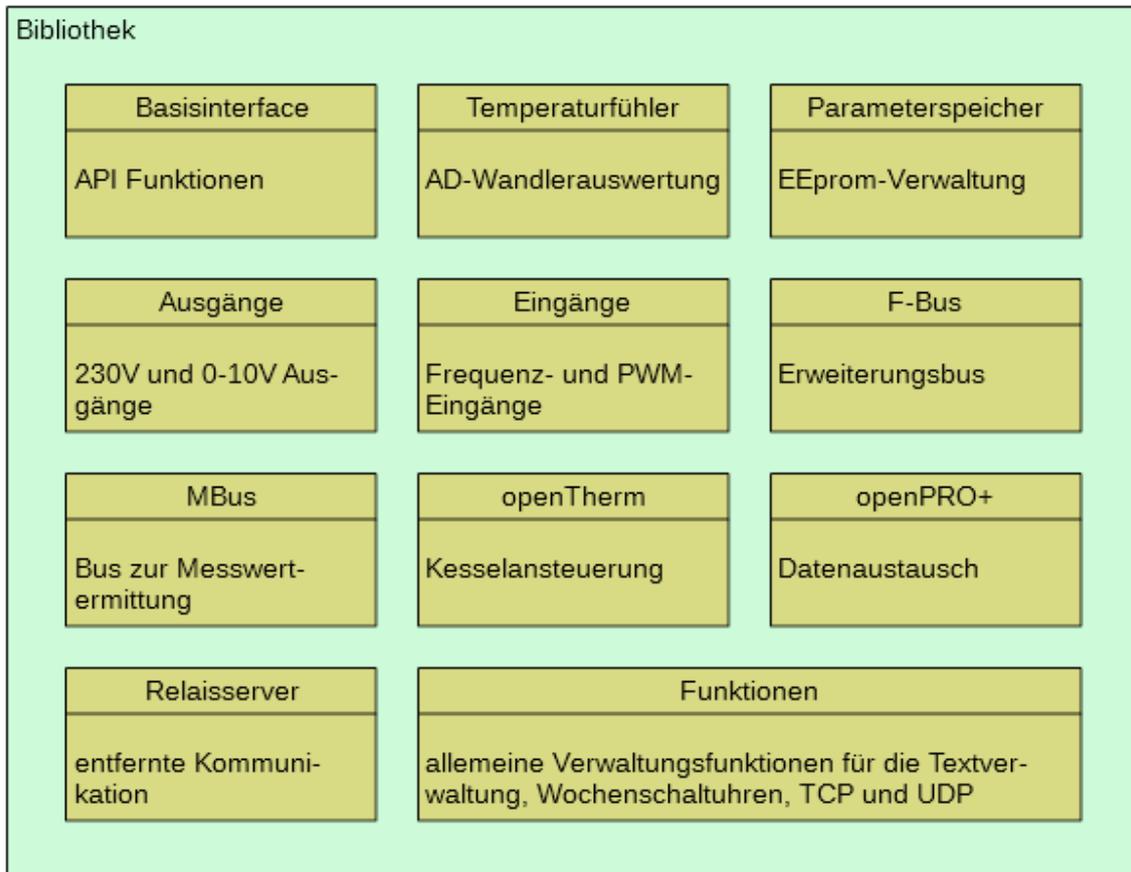


Abb. 3.3 Funktionsblöcke der Bibliothek

### Basisinterface

Mit dem Basisinterface wird die Verbindung zwischen Applikation und Basissystem realisiert. Es wird sowohl die Verzweigung des Programmablaufs vom Basissystem in die Applikation als auch von der Applikation ins Basissystem ermöglicht.

### Temperaturfühler

Der Treiber bestimmt die aktuellen Werte der angeschlossenen Temperaturfühler und kann für jeden einzelnen Fühler für PT1000- oder NTC-Sensorelemente konfiguriert werden.

### Parameterspeicher

Der Treiber ermöglicht das netzausfallsichere Speichern von Datenpunkte mit der Besonderheit, dass Werte über eindeutige IDs referenziert werden und deshalb sowohl bei einem Update als auch bei einem Downgrade erhalten bleiben.

### Ausgänge

Der Treiber gibt den von der Applikation gewünschten Zustand der Ausgänge netzsynchron an den Ausgängen aus. Auf diese Weise werden die Ausgänge immer nahe des Nulldurchgangs der Netzspannung geschaltet und verursachen weniger Störungen. Die 0-10V-Ausgänge können einzeln auch als PWM-Ausgang konfiguriert werden.

### Eingänge

Dieses Modul dient zur Auswertung der Frequenz-, PWM- und 0..10V-Eingänge der Hardware. Die ermittelten Werte werden der Applikation in [1/10Hz], [%] und [mV] zur Verfügung gestellt.

#### **F-Bus, MBus und openTherm**

Die drei Module realisieren die Kommunikation zwischen an die Bussysteme angeschlossener Geräte und der Applikation.

#### **openPRO+ und Relaisserver**

Die openPRO+Schnittstelle ermöglicht es einem Kommunikationspartner, z.Bsp. einer Gebäudeleittechnik, Datenpunkte mit dem Regler auszutauschen.

#### **Der c/c++Wrapper**

Die Aufgabe des Wrappers ist es, die objektorientierten Module der Applikation mit der Bibliothek zu verbinden. Hierzu werden die Aufrufe der Bibliothek an das zuständige Modul weitergeleitet und die Antworten der Module an die Bibliothek durchgereicht. Die zweite Aufgabe des Wrappers ist die Verwaltung der automatisch gespeicherten Variablen die, wenn sich ihr Wert verändert hat, alle 10 Minuten gespeichert werden.

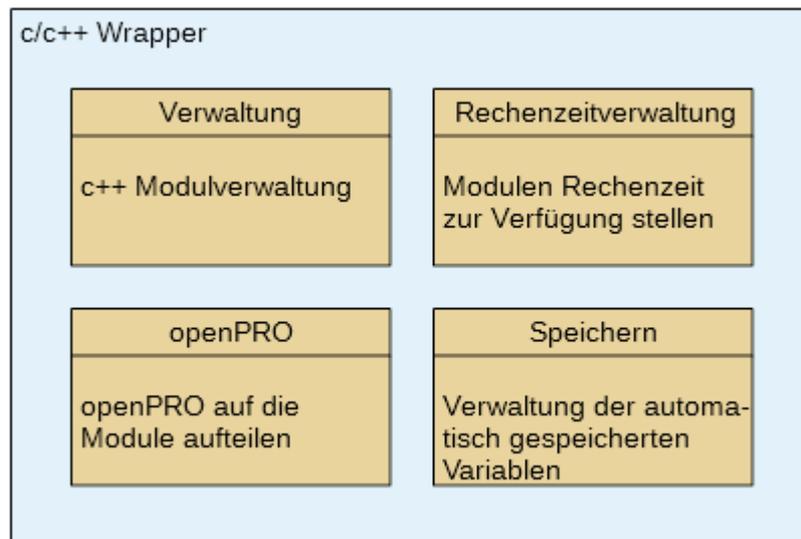


Abb. 3.4 Aufgaben des Wrappers

### 3.3 Die Applikation

Die Applikation besteht derzeit aus 15 Modulen die für verschiedene Aufgaben zuständig sind. Bis auf das SmartHome-Modul, das eine Sonderstellung einnimmt, sind alle Module von der Basisklasse „clModul“ abgeleitet und können somit Datenpunkte im System bekanntmachen und erhalten Rechenzeit zugeteilt. Das folgende Bild zeigt die 15 Module der Applikation.

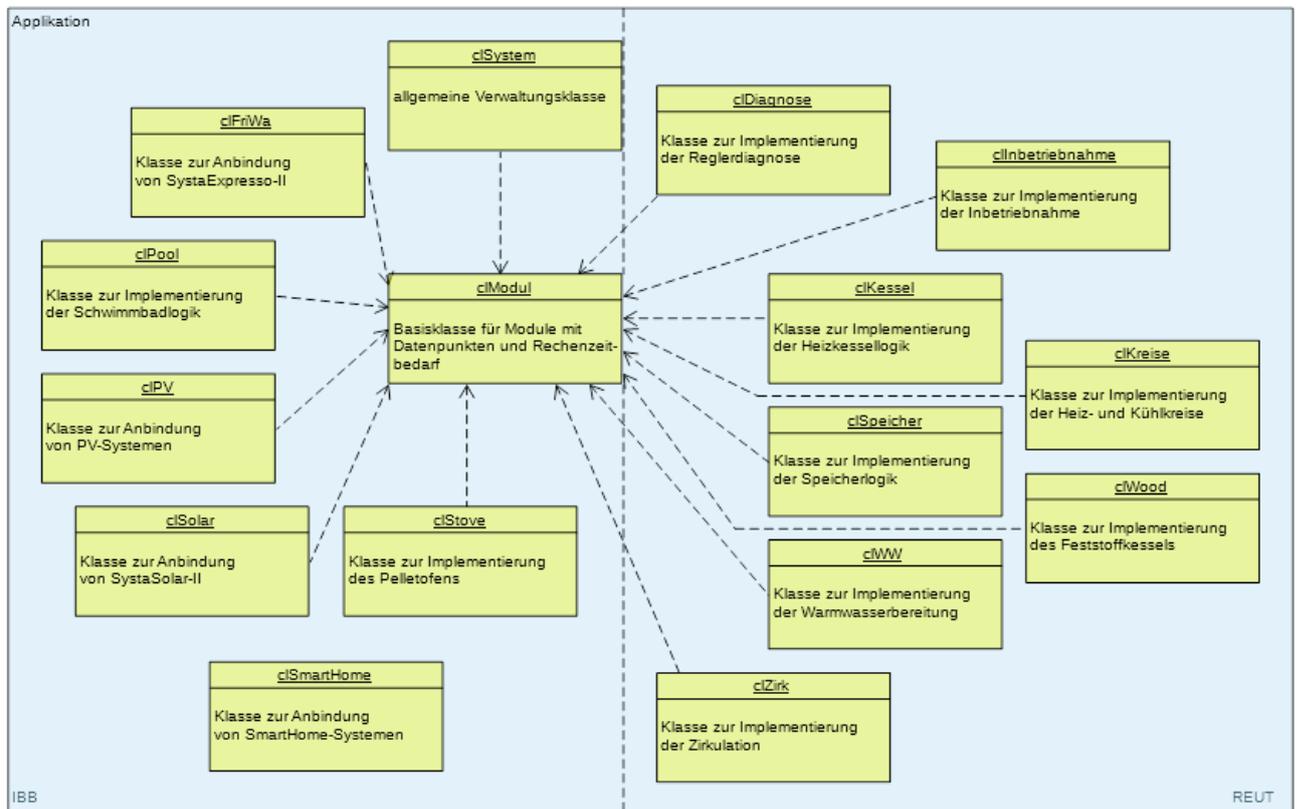


Abb. 3.5 Übersicht der Module der Applikation

### Das Modul „cISystem“

Das Modul hat mehrere Aufgaben, die im folgenden Bild zusammengefasst sind.

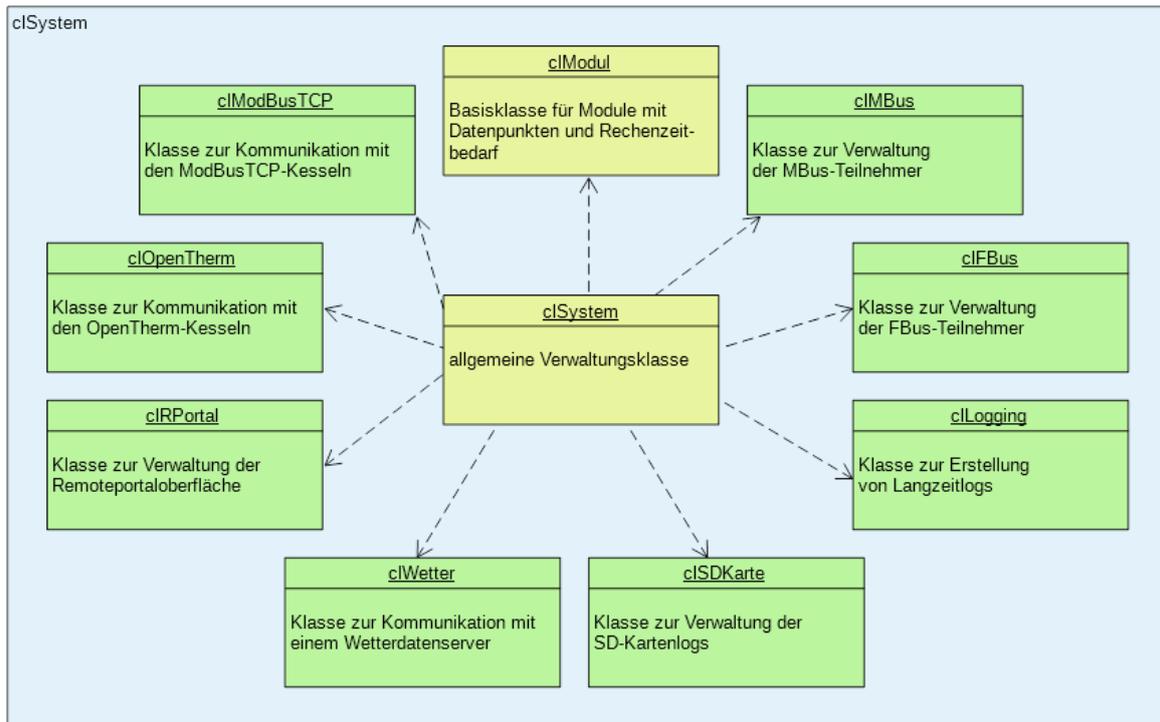


Abb. 3.6 Aufgaben des Modul System

## 4 Entwicklung: Reglerhardware

Aus dem Projekt ergaben sich verschiedenste Anforderungen an die Entwicklung einer neuen Hardware die wie folgt spezifiziert werden können:

*Tabelle 4.1 Übersicht Aus- und Eingänge*

Typ	Anzahl	Beschreibung
Temperaturfühlereingänge	10	NTC oder PT1000 per Software umschaltbar
Digitaleingang	1	24V=
Eingänge für Hubasensoren	3	Frequenzeingang und PT1000 Eingang
230V-Halbleiterausgänge	5	Ausführung als Triac
230V-Ausgänge	4	Ausführung als Relais
Potentialfreie Ausgänge	1	Ausführung als Relais
Analogausgang / PWM-Eingang	3	Ausgang 0..10V oder PWM, Eingang PWM nicht galvanisch getrennt
Analogausgang	1	Ausgang 0..10V oder PWM galvanisch getrennt
OpenTherm	1	Open Therm Bus, galvanisch getrennte Ausführung
Ethernet	1+1	Integrierter Ethernet Switch um die Installation zu vereinfachen Anzeige LED LAN Zustand
MBUS	1	M-Bus galvanisch getrennte Ausführung
Analogeingang	2	0..10V, Versorgung auf 24V= begrenzt, 2x50mA
WLAN	1	Mit der Möglichkeit eine externe Antenne anzuschließen, Aktivierung Accespoint durch Taster von aussen Anzeige LED WLAN Zustand
SD-Karte	1	Micro SD
Anzeige LED's	4	Betrieb / Störung / LAN / WLAN

Durch die Anforderungen an die Bedienbarkeit und um die Akzeptanz und Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen ergaben die folgende Anordnung der Anzeige-/ Bedienelemente, der SD-Memory Card, der Anzeige LED's sowie der Taste zur Aktivierung des WLAN Accespoint:

## 5 Entwicklung: Bedienoberfläche

### 5.1 Anforderungen an die Bedienoberfläche

Produkte der Marke Paradigma werden meist im Gebäudebestand angeboten. Die Kunden sind technikaffin und stellen hohe ökologische Anforderungen an ein Heizsystem. Der potentielle Käufer des Heizungsreglers „Ökoko“ kann weiterhin als smartphone-affin, mit einer hohen Aufgeschlossenheit gegenüber neuen Technologien beschrieben werden. Smartphones und Apps haben in Deutschland inzwischen eine sehr hohe Durchdringung erreicht. Auch in der Altersgruppe ab 65 Jahre nutzen bereits 41 % ein Smartphone. [9]

Im angestrebten Marktsegment ist die Reglerbedienung mit einer App, im Heimnetzwerk und über das Internet, eine klare Marktanforderung. Durch die Nutzung mobiler Endgeräte für die Bedienung wird eine Entkopplung von Regelungshardware und Benutzerschnittstelle erreicht. Für die Visualisierung können so performantere Anzeigeegeräte verwendet werden, die viel kürzeren Entwicklungszyklen unterliegen als stationäre Touch-Screens. Nachteil an der App-Bedienung sind der stetige Anpassungsbedarf, aufgrund von Betriebssystemänderungen, sowie die hohe Anzahl von unterschiedlichen Geräten, Softwareversionen und Bildschirmgrößen. Dies ist vor allem auf der Plattform „Android“ der Fall, wo bereits im Jahr 2015 ca. 24.000 unterschiedliche Android- Geräte gezählt wurden. [10]

Die Entwicklung einer Benutzeroberfläche ist zeitaufwendig und kostenintensiv. Die Programmierkosten eines Touch-Screens für die aktuelle Reglerhardware liegen im mittleren fünfstelligen Bereich. Die Entwicklung einer Touch-Screen-Bedienung und einer App hätten den Rahmen des Projektes bei Weitem gesprengt. Innerhalb des Projektes wurde deswegen ausschließlich eine App-Bedienoberfläche für den Regler entwickelt.

### 5.2 Entwicklung App - Bedienoberfläche

Der Entwicklungsprozess der Bedienoberfläche kann grob in die folgenden Schritte eingeteilt werden:

1. Anforderungserstellung und Ideensammlung
  - a. Recherche Funktionsumfang und Darstellungsmöglichkeiten
  - b. Online-Umfrage zur Nutzung und Anforderungen an die Bedienoberfläche
2. Konzepterstellung
  - a. Kreativ-Workshop für die Erstellung der wichtigsten Layouts (vgl. Anhang Kapitel 9.2)
  - b. Erstellung und Optimierung eines „Klickdummys“ (=reduzierte Bedienoberfläche ohne Funktion mit der ohne großen Aufwand Navigation und Darstellung entwickelt werden können)
3. App-Programmierung (vgl. Kapitel 5.3)
4. Test im Feld
  - a. Feldversuch mit mehreren Nutzern (vgl. Kapitel 7.1)
  - b. Online-Umfrage zur App (vgl. Kapitel 7.5)

### 5.3 App – Programmierung

Die App-Programmierung erfolgte für die beiden Plattformen iOS (Apple) und Android (Google) nativ. Native Apps werden speziell für das jeweilige Betriebssystem geschrieben. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Schnittstellen zur Hardware (z.B. Kamera) einheitlich und fehlerfrei funktionieren. Durch die native Programmierung erhält man eine leistungsfähige und intuitiv bedienbare App. Nachteil an dieser Lösung ist, der erhöhte Pflege- und Entwicklungsaufwand aufgrund der unterschiedlichen Programmiersprachen.

Um diesen Nachteil etwas abzumildern, wurde ein Großteil der App-Programmierung mittels einer Konfigurationsdatei durchgeführt, die beide Apps (Android und iOS) einlesen und verarbeiten können.

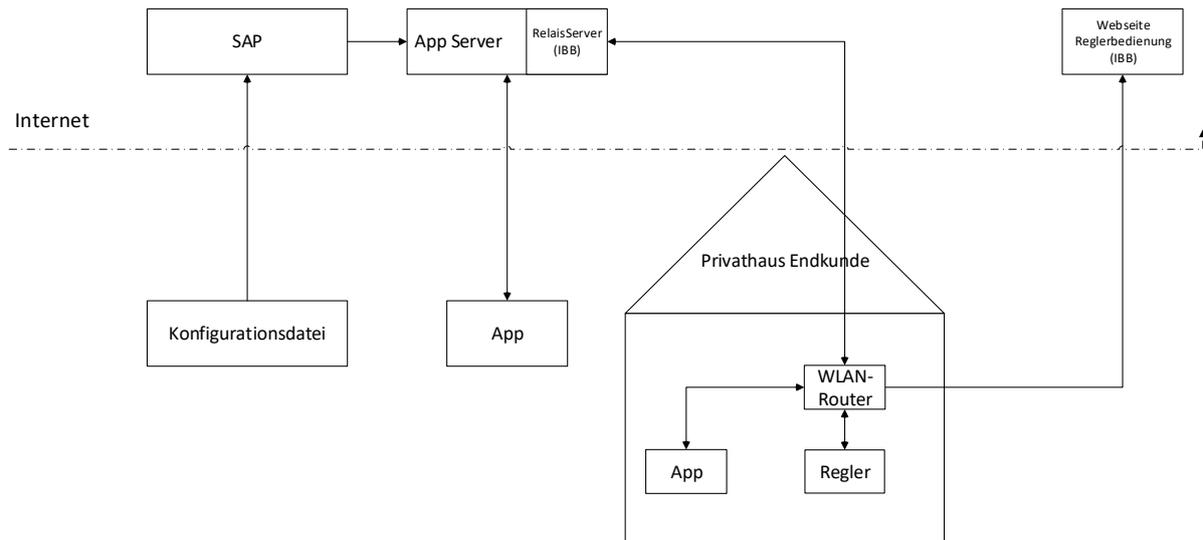


Abb. 5.1 Kommunikationsübersicht Regler – App

### 5.4 App Layouts

In unten stehender Abbildung ist der Layout-Typ „Home“ mit 40 füllbaren Positionen dargestellt. Links ist die Anzeige der Solarerträge, Messwerte und Status abgebildet. Mittig ist ein Schnellzugriff auf oft benötigte Einstellungen der Heizung (z.B. Auswahl der Programme) und interessante Informationen.



Abb. 5.2 Layout „Home“: Heizungssteuerung

Ist der Regler mit einem Smarthome verbunden, verändert sich die Ansicht der Heizungssteuerung, da die Sollwerte für Heizung und Warmwasser vom Smarthome gesetzt werden. Diesbezügliche Einstellungen sind am Regler dann nicht mehr möglich und die entsprechenden Punkte werden ausgeblendet.

Störungen werden oben rechts über einen roten Punkt visualisiert. Dem Fachhandwerker werden über ein PopUp Informationen zur Störungsbehebung angezeigt, die die App aus einer Datenbank abruft.

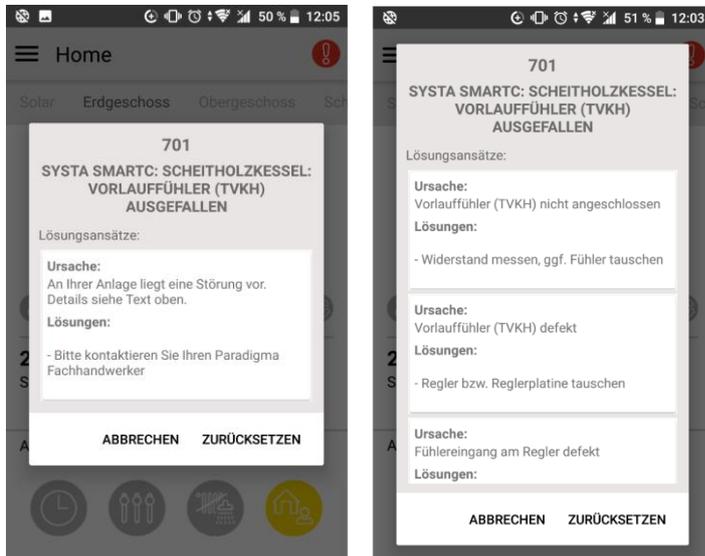


Abb. 5.3 Anzeige einer Störung: Anlagenbetreiber (links) und Fachhandwerker (rechts)

Die Parametrierung des Reglers erfolgt hauptsächlich über Wertlisten mit vier möglichen Positionen pro Zeile. Im Layout „Wertliste“ können Hilfetexte angezeigt (vgl. Abb. 5.4 rechts), die Regler Parametrierung (vgl. Abb. 5.4 mittig) vorgenommen und Messwerte angezeigt werden.

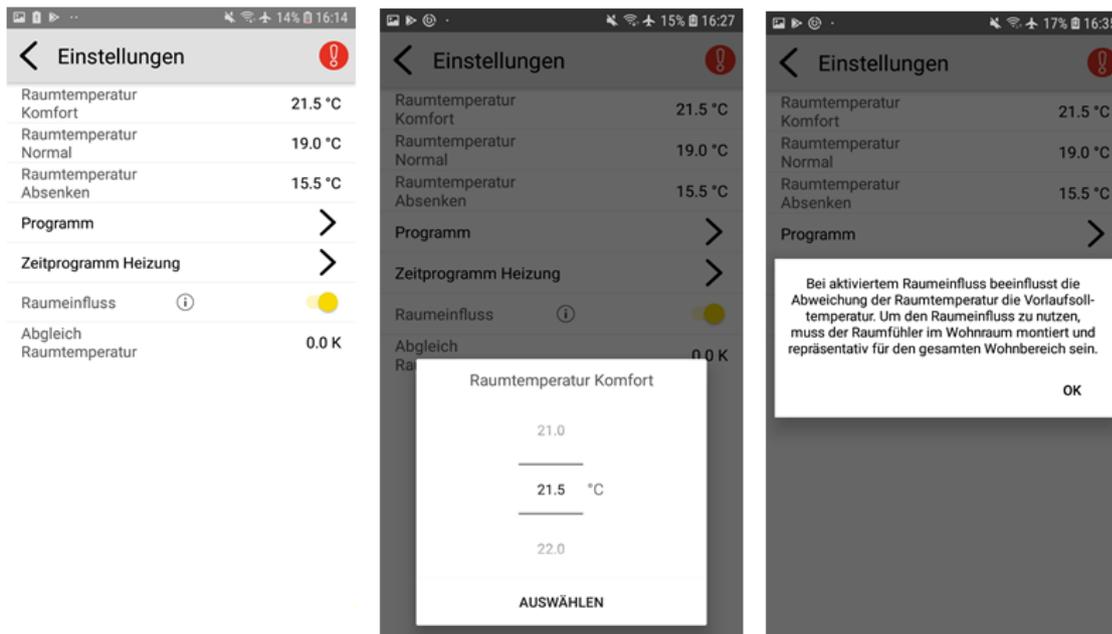


Abb. 5.4 Layout „Wertliste“, Einstellungen ändern (links und mittig) und Anzeige Hilfetext (rechts)

Im Layout „Information“ sind pro Block drei vertikal untereinander angeordnete Positionen verfügbar, die mit Inhalt gefüllt werden können. Mit diesem Layout wurde die Steuerung und Visualisierung der

Reglerinbetriebnahme (vgl. Abb. 5.5 links und Kapitel 2.8), sowie die Ersteinrichtung (vgl. Abb. rechts) in der App umgesetzt.



Abb. 5.5 Layout „Information“, und Ersteinrichtung (rechts)

Im Layout „Statistik“ werden die Tagessummen der letzten 31 Tage, Monatssummen der letzten 13 Monate und die Jahressummen der letzten 30 Jahre visualisiert. Weiterhin ist es möglich Rechnungen innerhalb des Bildschirms durchzuführen, sodass z.B. auch der Beitrag der solarthermischen Anlage zum Gesamtverbrauch dargestellt werden kann (vgl. Abb. 5.6 rechts).

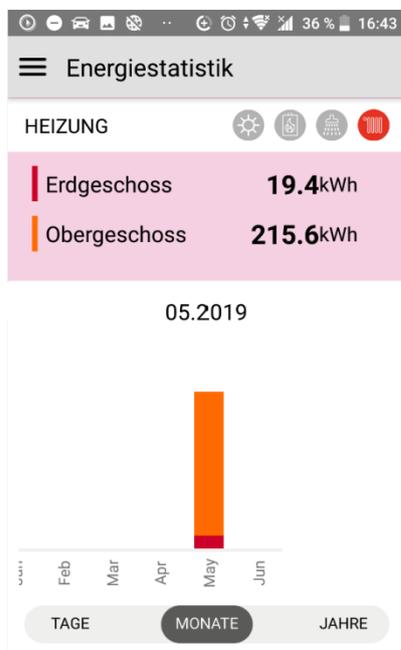


Abb. 5.6 Layout „Energienstatistik“ Heizung

## 6 Erprobung in der Simulation

### 6.1 Simulation von Heizungssystemen mit ColSim

Die numerischen Simulationen von solarunterstützten Heizungssystemen werden in dieser Arbeit mit dem linux-basierten Simulationsprogramm ColSim durchgeführt. Das Programm entstand im Zuge einer Dissertation am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme und ist für die Erprobung von Regelungsalgorithmen für solarthermischen Kombianlagen entwickelt worden. Die Struktur und Philosophie orientiert sich stark an der weit verbreiteten Software TRNSYS (TRaNsient Systems Simulation).

ColSim ist eine nichtkommerzielle Simulationsumgebung, in der mathematische Probleme in viele Teilprobleme zerlegt werden. Diese werden in Modulen in C-Code beschrieben und sind in einem *Deck-File* miteinander verknüpft. Die einzelnen Komponenten, dieser *Decks*, werden als *Units* bezeichnet. *Types* sind Prototypen dieser *Units* und sind mit dem jeweiligen Modellcode verknüpft. [11]

Die hydraulische Verbindung, sowie die Übergabe sonstiger Informationen der *Units*, erfolgt graphisch mit dem Zeichenprogramm XFIG. Auch die Modellparameter, wie zum Beispiel die Wärmeverlustrate des Speichers, werden in dem Grafikobjekt abgelegt und können in XFIG editiert werden. Aus der graphischen Oberfläche wird mit einer Konvertierungsroutine das Simulationsdeck erstellt. In der folgenden Abbildung ist das Schema des Simulationsablaufes dargestellt.

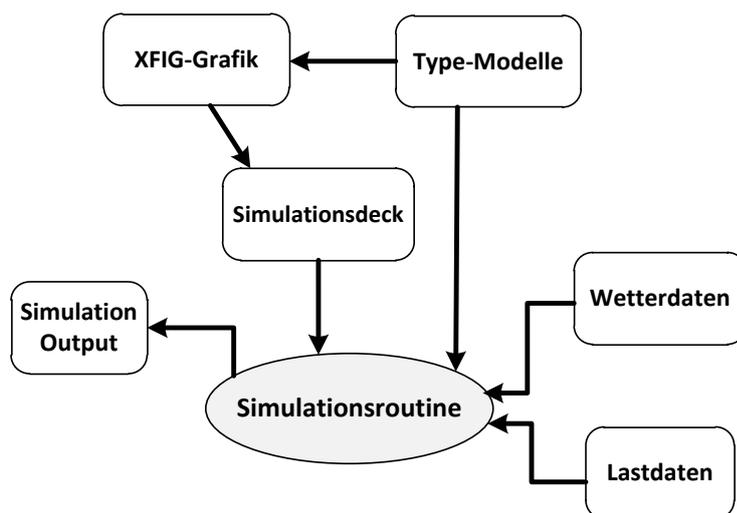


Abb. 6.1 Schema des ColSim Programmaufbaus

Wetterdaten und Zapfprofile oder Heizlastdatenfiles können mithilfe einer Einlese-Routine, der Simulationsroutine, als veränderliche Randbedingungen berücksichtigt werden. Als Ausgabe kann ein Aufzeichnungstyp (*printer*) verwendet werden, der die ausgewählten Größen, wie zum Beispiel der Solarkreisvolumenstrom, in eine Textdatei schreibt.

In der folgenden Abbildung ist exemplarisch eine graphische Repräsentation einer solarthermischen Anlage mit einem Kombispeicher ohne externe Nachheizung und mit einer Entnahme von Trinkwarmwasser im Zeichenprogramm XFIG dargestellt.

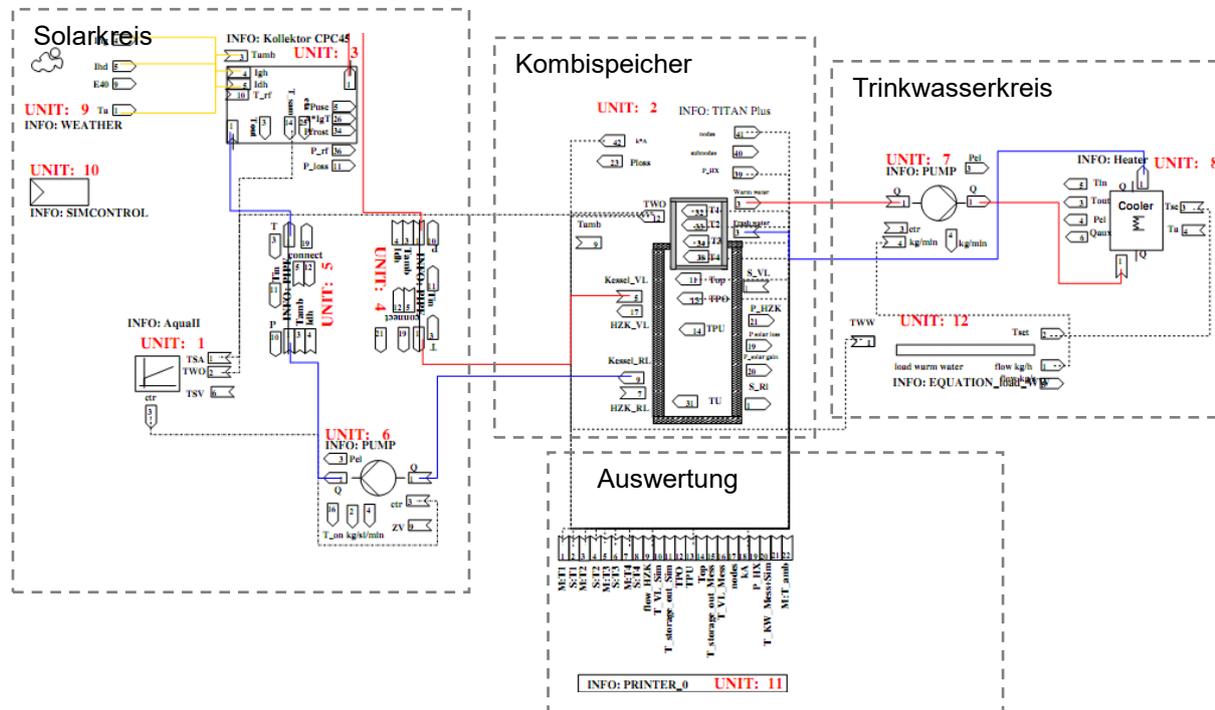


Abb. 6.2 Graphische Darstellung einer solarthermischen Anlage in XFIG

ColSim arbeitet mit hydraulisch geschlossenen Kreisen. Daher wird zum Beispiel das dem Speicher entnommene Trinkwarmwasser in einem Kühler wieder auf die vorgegebene Kaltwasser-Netztemperatur gekühlt.

Die Berechnungsreihenfolge während eines Zeitschrittes ergibt sich aus der hydraulischen Verschaltung und der Art der Komponenten. Regler-Types und sogenannte *Equation-Types*, die zur flexiblen Berechnung und Bereitstellung von Werten dienen, werden zuerst aufgerufen. Hydraulische Types werden, beginnend von der Pumpe, nacheinander in Fließrichtung des Mediums aufgerufen. Anschließend wird der aus der Pumpe austretende und in die Pumpe eintretende Massestrom bilanziert und bei einer Verletzung der Massenbilanz die Simulation abgebrochen. Die nach der Pumpe angeordneten Komponenten erhalten so stets einen aktuellen Input.

Durch energetische Bilanzierung der Wärmeströme  $\dot{Q}_i$  kann die Temperatur  $\vartheta$  an der Berechnungsstelle  $i$  nach Glg. 6.1 bestimmt werden. Der Berechnungsstelle die im Folgenden als Knoten bezeichnet wird ist dabei stets eine Masse  $m_i$  und eine Wärmekapazität  $cp_i$  zugeordnet.

$$m_i cp_i \frac{d\vartheta_i}{dt} = \dot{Q}_{i, \text{Eintritt}} - \dot{Q}_{i, \text{Austritt}} + \dot{Q}_{i, \text{Gewinn}} - \dot{Q}_{i, \text{Verlust}} \quad \text{Glg. 6.1}$$

Am Ende eines Zeitschrittes wird eine globale- und, bei speziellen Types, wie zum Beispiel, dem Speicher, eine lokale Energiebilanz durchgeführt. Beim Überschreiten eines tolerierten Bilanzfehlers wird die Simulation abgebrochen.

Bei der mathematischen Beschreibung von thermischen Energiewandlungs-Systemen erhält man ein Differentialgleichungssystem höherer Ordnung, welches in Differentialgleichungen erster Ordnung

umgewandelt werden kann. Diese können mit einem geeigneten Integrationsverfahren gelöst werden. In ColSim wird für die numerische Integration das *explizite Euler Verfahren* verwendet, welches auf der finiten Differenzentechnik basiert. Die diskretisierte Form kann aus der Taylorreihe (Abbruch nach dem zweiten Glied) bestimmt werden.

$$\frac{d\vartheta_i^{k+1}}{dt} \approx \frac{\vartheta_i^{k+1} - \vartheta_i^k}{\Delta t} \quad \text{Glg. 6.2}$$

Das Lösungsverfahren ist nur stabil, wenn die Energieänderung pro Zeitschritt nicht zu groß wird, so dass im Modellcode die Stabilität des Lösungsverfahrens stets überprüft werden muss.

## 6.2 ColSim Gebäudemodell

Verwendet wird das sogenannte Zweisternmodell, bei dem der Wärmeaustausch durch Strahlung mithilfe eines Strahlungsknotens (ohne thermische Masse mit unendlicher Wärmeleitfähigkeit und schwarzer Oberfläche) und der durch Konvektion mithilfe eines Luftknotens mit einer thermischen Masse beschrieben wird.

Da die übertragenen Wärmeströme von den jeweiligen Knotentemperaturen abhängig sind, können sie nicht separat voneinander bestimmt werden. Aus diesem Grund wird durch Bilanzierung der Wärmeströme, an den als massenlos betrachteten freien Oberflächen, ein nichtlineares Gleichungssystem aufgestellt und mit einer Newton-Iteration gelöst [12].

In Abb. 6.1 ist das Schema der elektrischen Ersatzschaltung einer thermischen Zone mit Strahlungs- und Luftknoten dargestellt. Das Luftvolumen mit der Temperatur ( $T_{\text{Air}}$ ) wird konvektiv durch die Heizflächen, den Pelletofen und direkt durch gebäudeinterne Wärmequellen erwärmt und durch Luftaustausch mit der Umgebung (Temperaturniveau  $T_{\text{Umg}}$ ) abgekühlt. Der mit dem Heizkörperexponenten quantifizierte Strahlungsanteil der Heizflächen wird dabei dem Strahlungsknoten (Temperatur  $T_{\text{Star}}$ ), mit dem die Innenwände im Strahlungsaustausch stehen, zugeführt.

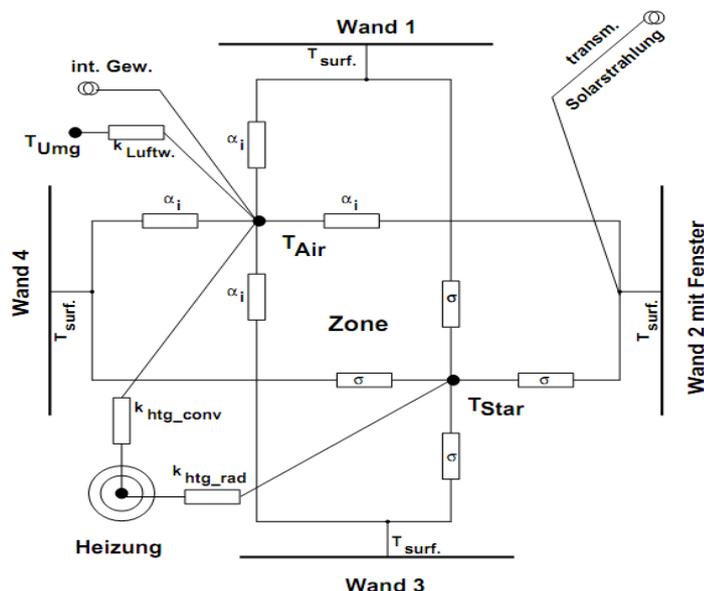


Abb. 6.3 Darstellung des Zweisternmodells einer thermischen Zone [13]

Die durch die Fensterflächen transmittierte, direkte Solarstrahlung wird dem Fußboden und die diffuse Strahlung allen Umschließungswänden des Raumes übertragen. Sekundärgewinne aufgrund der Absorption der Solarstrahlung und der daraus resultierenden konvektiven Erwärmung der Luft werden ebenso berücksichtigt. Mit dem Wärmeverlustkennwert (U-Wert) des Fensters und der

Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Raumtemperatur (Mittelwert aus Strahlungs- und Luftknotentemperatur) werden die Wärmeverluste der Fenster ermittelt.

Das Gebäude wird in vier beheizte und eine unbeheizte thermische Zonen unterteilt, die durch ein vertikales Wandelement miteinander verbunden sind. Angrenzende Wände sind blau markiert. Die Fensterflächen sind grau markiert.

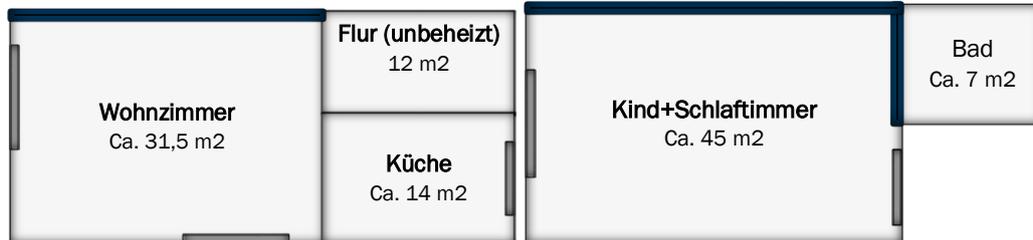


Abb. 6.4 Aufbau Simulationsmodell Erdgeschoss und Obergeschoss

Der Querschnitt durch das Simulationsmodell ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abb. 6.5 Querschnitt Gebäudemodell

Die Zonen im Erdgeschoss schließen nach unten hin mit einem Boden ab, der in direktem Kontakt zum Erdreich mit einer konstanten Temperatur steht. Der Dachstuhl wird als unbeheizte thermische Zone ohne Fenster abgebildet.

Die Thermostatventile werden in ColSim mit einem eigenen Modell abgebildet welches in jedem Simulationszeitschritt, in Abhängigkeit von der Regelabweichung, die Ventilstellung anpasst und den entsprechenden Druckverlustbeiwert an den Hydrauliklöser (vgl. Kapitel 6.3) übergibt. Die hydraulische Verschaltung ist in Abb. 6.4 dargestellt.

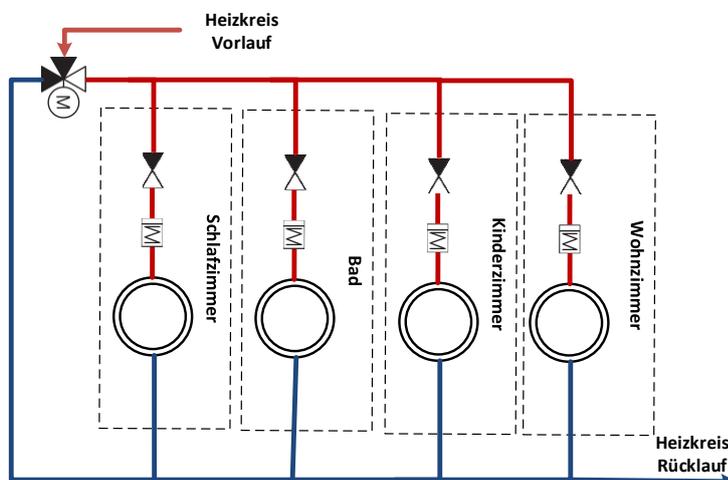


Abb. 6.6 Hydraulische Verschaltung

Die detaillierte graphische Repräsentation des CoSim Gebäudemodells einer thermischen Zone ist in Abb. 6.5 abgebildet.

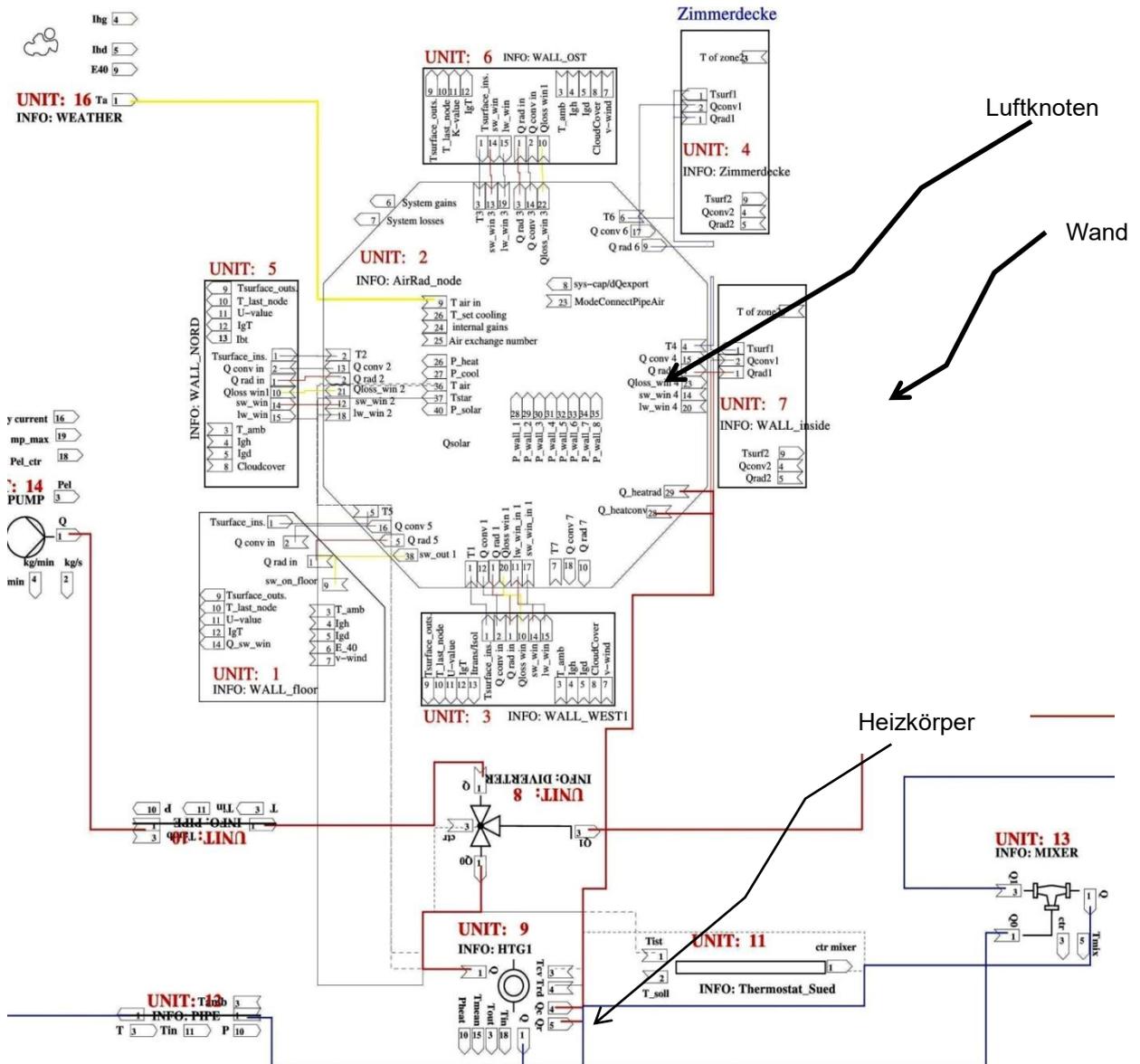


Abb. 6.7 Aufbau einer thermischen Zone mit Wärmeabgabesystem in CoSim

### 6.3 ColSim Hydrauliklöser

Im Simulationsprogramm „ColSim“ können Fluid – oder Lüftungskreise ganz einfach simuliert werden, indem man der Pumpe / dem Ventilator im Kreis einen Volumenstrom aufträgt. Dann wird in jedem Simulationszeitschritt jeder Kreis durchlaufen und für jeden Knoten die Energiezuflüsse, -Abflüsse, Verluste und Gewinne bilanziert, um die neuen Knotentemperaturen zu bestimmen.

Für die realistische Simulation einer Heizungsanlage reicht das allerdings nicht aus, denn hier soll ja gerade auch die Reaktion der Thermostatventile auf interne Lasten, Sonneneinstrahlung etc. berücksichtigt werden. Ändern sich aber die Ventilstellungen, dann ändern sich die hydraulischen Widerstände im Heizkreis, wodurch sich zum einen der Gesamtdurchsatz ändert, zum anderen auch die Durchflüsse durch die Heizkörper in den verschiedenen Räumen.

Die volumenstromgeführte Heizung reagiert direkt auf Durchflussänderungen, daher war es notwendig, den in ColSim integrierten Hydrauliklöser in Betrieb zu nehmen und zu überarbeiten.

Der Ablauf der Simulation mit hydraulischer Berechnung ist folgendermaßen:

1. Im ersten Simulationszeitschritt wird die gegebene Hydraulik des Inputfiles analysiert und die Kreise, Knoten und Zweige identifiziert. Kreise sind in sich geschlossene Gebilde mit mindestens einer Pumpe. Knoten sind Verzweigungspunkte im Kreis, d.h. alle Mischer und Diverter. Zweige sind die Strecken dazwischen.
2. Dann werden die hydraulischen Gleichungen für jeden Kreis separat aufgestellt: Der Druckabfall in parallel verlaufenden Zweigen muss gleich sein, der Druckabfall in hintereinander angeordneten Elementen addiert sich. Die Druckabfälle in den Rohren enthalten je einen Term, der linear und einen der quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit ansteigt. Die zugehörigen Koeffizienten werden aus der Reynoldszahl und der (temperaturabhängigen) kinematischen Viskosität berechnet. Für viele weitere hydraulische Komponenten sind die Druckverlustkurven hinterlegt. Der Gesamt-Druckabfall im Kreis („Anlagenkennlinie“) muss dem Druckaufbau der Pumpe im Kreis („Pumpenkennlinie“) entsprechen. Ziel ist also, für jeden Zweig einen Volumenstrom zu finden, der bewirkt, dass die Druckbilanz stimmt, zudem müssen die Teilvolumenströme sich richtig zum Gesamtvolumenstrom addieren, der von der Pumpe erzeugt wird. Jeder Pumpentyp hat ein Set von Kennlinien, welches für jede von z.B. 10 Pumpenstufen (entsprechend dem PWM-Ansteuersignal in 10 Stufen) angibt, welche Druckdifferenz sie bei welchem Volumenstrom aufbaut.
3. Die hydraulischen Gleichungen werden gelöst, indem sie als Matrixgleichung  $A \cdot x = 0$  formuliert werden. Diese Matrixgleichung wird dann numerischen Funktionen übergeben, die durch Variation von  $x$  die Nullstelle finden. Die analytische Lösung ist nicht möglich, da die hydraulischen Widerstände von den Volumenströmen abhängen. Daher wird das Gleichungssystem iterativ gelöst mit Hilfe von Funktionen aus „Numerical Recipes“. [14]

Der in ColSim zunächst vorgefundene Hydrauliklöser kam nur mit konstanten Pumpenansteuersignalen und konstanten Ventilstellungen zurecht. Es mussten Modifikationen vorgenommen werden, so dass die Druckverlustkoeffizienten jeweils neu berechnet werden, sobald sich diese Einfluss-Größen ändern. Dann muss eine neue Volumenstrom-Lösung gefunden werden. Die Fehlertoleranzen für den Hydrauliklöser müssen sorgfältig angepasst werden, damit einerseits die Iterationen nicht zu lange dauern für eine Ganzjahres-Rechnung, andererseits nicht der Fall eintritt, dass eine falsche Lösung gefunden wird oder auf eine Änderung der Ventilstellung nicht mit der Suche nach einer neuen Lösung reagiert wird.

Es wurden Druckverlustkoeffizienten für verschiedene Heizkörpertypen und Heizkörperventile hinterlegt. Der Hydrauliklöser hat Schwierigkeiten, bei komplett geschlossenen Thermostatventilen in annehmbarer Zeit eine Lösung zu finden, daher musste dieser Fall erkannt werden und die Pumpe abgestellt werden. Dennoch gab es in Fällen, wo fast alle Thermostatventile geschlossen waren und

der Widerstand im Kreis enorm hoch war, noch zahlreiche zu lösende Probleme für eine selbständig durchlaufende, zuverlässige Jahresrechnung im Sekundenzeitschritt.

### 6.4 Randbedingungen für die Simulation

Als meteorologische Randbedingung wird für die Jahressimulation das Testreferenzjahr TRY 05 für den Standort Würzburg verwendet. Zwischen den stündlichen Werten des Wetterdatenfiles findet in der ColSim - Einleseroutine eine Interpolation statt. Die geringste Tagesdurchschnittstemperatur liegt bei  $-13.2\text{ °C}$  und die Jahresdurchschnittstemperatur bei  $9,0\text{ °C}$ . In Kollektorebene wird innerhalb des Testreferenzjahres  $1194\text{ kWh/m}^2$  solare Einstrahlung verzeichnet.

Das simulierte Gebäude hat einen Jahresheizbedarf von ca.  $12000\text{ kWh}$  bei einer Wohnfläche von  $110\text{ m}^2$ , d.h. es entspricht ungefähr dem Baustandard der Wärmeschutzverordnung 95. Der Grund, warum dieses Gebäudemodell gewählt wurde, ist dass es einem der beiden Feldversuchhäusern im redundanten Monitoring nachgebildet wurde. Die Parameter der Simulation (Dicke der Wände, kA-Werte von Wänden und Fenstern, Wärmeübergang zwischen den Zimmern, etc. ) wurden anhand der sehr ausführlichen Messdaten des IGTE angepasst. Durch zahlreiche Simulationen, bei denen die Messdaten direkt verglichen wurden mit dem Respons des simulierten Gebäudes, konnte sichergestellt werden, dass die Gebäudesimulation ausreichend realistisch ist.

Allerdings hätte die volumenstromgeführte Heizung ihr bestes Einsparpotential eher bei Niedrigenergie- und Passivhäuser, da hier der Heizbedarf nicht mehr ausschließlich von der Außentemperatur abhängt sondern auch sehr stark von internen Lasten und der Sonneneinstrahlung. Das Heizungssystem besteht entweder aus einem Gasbrennwertkessel mit  $15\text{ kW}$  oder einem Pelletskessel derselben Leistung. Dazu ein Frischwasserspeicher des Typs AquaExpresso 800 mit einem Gesamtvolumen von  $836\text{ l}$  und einem kA-Wert von  $2,71\text{ W/K}$ . Der Speicher steht in einem nicht mitsimulierten Kellerraum bei einer Umgebungstemperatur von  $15\text{ °C}$ . Die Rohrleitungen zu den Heizkörpern bzw. Fußbodenheizschleifen haben  $10\text{ m}$  einfache Länge vor der Aufteilung in die einzelnen Stränge, danach noch  $4\text{ m}$  einfache Länge. Beim Fußbodenheizungssystem wird zwischen 21 Uhr und 7 Uhr das Niveau „Absenken“ eingenommen, beim Radiatorheizungssystem zwischen 22 Uhr und 7 Uhr.

Dem Frischwasserspeicher werden über einen externen Wärmetauscher  $40\text{ Liter}$  Trinkwarmwasser pro Person und Tag auf einem Temperaturniveau von  $45\text{ °C}$  entnommen, wobei die Speicherpumpe des Wärmetauscher drehzahl geregelt betrieben wird und der Wärmetauscher als verlustfrei angenommen wird, mit einem Wärmeübertragungskoeffizient von  $5\text{ kW/K}$ . Das Wasser wird in einem  $15\text{ m}$  langen gut isolierten Rohr (Rohr Cu18, Wärmeverlustkoeffizient  $0,2\text{ W/mK}$ ) zu den Zapfstellen transportiert. Wochentags wird um 8 Uhr, 12 Uhr, 15 Uhr und 19 Uhr gezapft, je  $\frac{1}{4}$  der Gesamtmenge. Am Wochenende wird um 11 Uhr und 17 Uhr je die Hälfte der Gesamtmenge gezapft. mit einem Volumenstrom von  $200\text{ l/h}$  entnommen. Als Kaltwassertemperatur werden jahreszeitunabhängig  $10\text{ °C}$  angesetzt. Zwischen 7 Uhr morgens und 21 Uhr abends wird der Trinkwasserteil des Kombispeichers auf Trinkwassersolltemperatur gehalten. Bei Unterschreiten der Grenztemperatur am Trinkwassersensor (TWO) um  $5\text{ K}$  wird innerhalb dieses Zeitraumes nachgeheizt. Eine Zirkulation von erwärmtem Trinkwasser ist, aufgrund der Beschränkung der betrachteten Gebäudeart auf Einfamilienhäuser und den hohen thermischen Verlusten in den Simulationsrechnungen, nicht vorgesehen.

Als Solarkollektoren werden jeweils 2 CPC 45 Star Azurro Kollektoren der Paradigma Deutschland GmbH verwendet. Es handelt sich um CPC (Compound Parabolic Concentrator)- Vakuum-Röhrenkollektoren mit einer Aperturfläche von insgesamt  $9,0\text{ m}^2$ , die mit einer Neigung von  $45\text{ °}$  nach Süden ausgerichtet sind.

Die Kollektormodellierung wird in ColSim mit ca. 8 Knoten in Fluid-Fließrichtung und zwei Knoten senkrecht dazu durchgeführt: Die Wärmekapazitäten von Absorber (Glasröhre und Wärmeleitblech) und Kollektorflüssigkeit inklusive Kollektorregister werden getrennt voneinander mit einem definierten

Wärmeübergang abgebildet (Details siehe [15]) Da als Wärmeträger reines Wasser verwendet wird, schaltet die Solarpumpe an Frosttagen immer wieder kurz ein (ca. alle 15 min für einige Sekunden), um die Kollektoraustrittstemperatur auf ca. 4 °C - 6 °C zu halten.

Für die Bewohner wurde folgendes Anwesenheitsprofil hinterlegt: Wochentags sind bis 8 Uhr morgens 4 Personen anwesend, dann bis 9 Uhr noch 2 Personen. Zwischen 9 und 12 Uhr ist niemand anwesend. Zwischen 12 Uhr und 15 Uhr sind es 3 Personen, dann ab 18 Uhr wieder 4 Personen. Am Wochenende sind permanent 4 Personen anwesend. Immer wenn jemand anwesend ist wird um 8:18 Uhr, um 14:18 Uhr und um 18:18 Uhr für 6 Minuten stoßgelüftet, d.h. die Luftwechselrate erhöht sich von den normalen 0,3 bei geschlossenen Fenstern und Türen auf 3,0.

Das Stoßlüften wird jeweils abgebrochen wenn die Raumtemperatur auf 15°C fällt. Jede anwesende Person trägt tagsüber 100 W an Heizleistung ins Gebäude ein, nachts 50 W. Nachts sind alle Personen im kombinierten Schlaf/Kinderzimmer, tagsüber verteilt sich die Heizleistung auf alle Räume gleichmäßig.

## 6.5 Bewertungskriterien

Die Notation für die Bewertungskriterien ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 6.1 Notation für die Bewertungskriterien

Abkürzung	Bedeutung
$Q_{Heiz}$	Die von den Heizkörpern an die Räume abgegebene Wärmeabgabe
$Q_{HeizVl}$	Die dem Speicher entnommenen Wärme für die Heizung, d.h. $Q_{Heiz}$ zuzüglich der Verteilungsverluste
$Q_{WW}$	Die an den Zapfstellen entnommene Wärme durch das Trinkwarmwasser
$Q_{WWV}$	Die dem Speicher entnommene Wärme für Trinkwarmwasser, d.h. $Q_{WW}$ zuzüglich der Verteilungsverluste
$Q_{Solar}$	die dem Speicher zugeführte Wärme von der Solaranlage.
$Q_{Kessel}$	die vom Kessel in den Speicher eingebrachte Wärme durch Pelletkessel ( $Q_{Pell}$ ) oder Gastherme $Q_{Gas}$
$Q_{Primär}$	die vom Kessel verbrauchte Primärenergie (Heizwert), d.h. $Q_{Kessel}$ , geteilt durch den Kesselwirkungsgrad, zuzüglich der Wärmeverluste des Kessels. Verteilungsverluste fallen hier keine an.
$Q_{Speicher}$	die Speicherwärmeverluste an die Umgebung
$T_{Normal}$	Mittlere Raumtemperatur im Niveau Normal, im Zeitraum von 9:00 Uhr bis 21:00 Uhr.
$T_{Absenken}$	Mittlere Raumtemperatur im Niveau Absenken, im Zeitraum von 23 Uhr und 4 Uhr morgens

Für die Bewertung des Beitrags der Solaranlage am Wärmebedarf eines Gebäudes wird der solaren Deckungsgrad (SoID) verwendet: Er bezeichnet die in den Speicher eingebrachte solare Energie, geteilt durch die Energiemenge, die dem Speicher für Warmwasser und Heizung entnommen wird.

$$\text{SoID} = \frac{Q_{\text{Solar}}}{Q_{\text{HeizV}} + Q_{\text{WWV}}} \quad \text{Glg. 6.3}$$

### Systemwirkungsgrad

Der Systemwirkungsgrad  $\eta_{\text{System}}$  wird nach Glg. 6.4 aus dem Quotienten der Nutzenergie zur verbrauchten Primärenergie berechnet. Er soll eigentlich ein Maß dafür sein, wie effizient das ganze Heizsystem funktioniert. Ist allerdings eine Solaranlage vorhanden oder bei einem System mit Gasbrennwertkessel ohne Speicher und mit geringen Verteilverlusten, kann der Systemwirkungsgrad auch größer als 100% werden.

$$\eta_{\text{System}} = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{WW}}}{Q_{\text{Primär}}} \quad \text{Glg. 6.4}$$

### Komfortbewertung

Um den Primärenergieverbrauch mit zwei verschiedenen Heizungsreglern vergleichen zu können müssen in erster Linie die Räume gleich warm werden. Denn man rechnet grob, dass ein Grad mehr an Raumtemperatur (in allen Räumen) ca. 5-6 % mehr Heizkosten bedeutet. Auf der anderen Seite sind die Einspar-Möglichkeiten alleine durch die Heizungsregelung von vorneherein beschränkt:

Die Regelung kann versuchen:

- den Kesselwirkungsgrad (Gesamtspanne 98%-109%) etwas zu verbessern, indem sie dem Brennwertkessel möglichst niedrige Rücklauftemperaturen zukommen lässt und beim Pelletskessel die Laufzeiten optimiert. Die Kesselrücklauftemperaturen sind natürlich großteils durch das Heizsystem vorgegeben und speziell bei einer Fußbodenheizung mit einer geringen Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf sind hier nur wenige Kelvin Spielraum.
- die Verteilverluste von hier ca. 1,6 % im Heizkreis zu verringern durch schnelles Abschalten der Heizung sobald sie nicht mehr nötig ist und durch Vermeiden zu hoher Vorlauftemperaturen.
- die Speicherverluste (Anteil ca. 7,7% am Primärenergiebedarf) etwas zu verringern, indem nicht mehr Wärme als nötig bevorratet wird und vor allem nicht auf zu hoher Temperatur. Insbesondere vermeiden, den Pufferbereich nachzuheizen, wenn die Räume z.B. aufgrund interner Lasten oder Sonneneinstrahlung gar keine Wärme mehr abnehmen können.

D.h. eine Energie-Einsparung von einigen Prozent alleine durch die Regelung ist schon ein ambitioniertes Ziel, daher muss sichergestellt sein, dass die diese eher kleine Energie-Einsparung sauber getrennt wird von einer eher großen Energie-Einsparung durch eine eventuelle niedrigere Raumtemperatur. Leider ist genau dies nicht so einfach, sobald man eine Nachtabsenkung mit betrachtet, denn unterschiedliche Regel-Strategien führen zu unterschiedlich tiefen Nachtabsenkungen und verständlicherweise bewirkt die Trägheit des Gebäudes, dass im Übergang zwischen dem Niveau Absenken und dem Niveau Normal eine Zwischentemperatur herrscht.

Daher wurden die Simulationsrechnungen so lange mit verschiedenen Solltemperatur-Einstellungen an den jeweiligen (Thermostat-)Ventilen wiederholt, bis sich im Niveau Normal im Zeitraum zwischen 9:00 Uhr und der Absenkezeit von 21 Uhr gemittelt über die Monate Januar-März dieselbe Raumtemperatur  $T_{\text{norm}}$  (+- 0,1 K) ergab. Die mittlere Temperatur im Absenkniveau  $T_{\text{abs}}$  wurde im Zeitraum von 23 Uhr – 4 Uhr im Januar-März erhoben, d.h. nach Ende des Niveaus Normal werden 2 h gewartet, damit die Räume etwas abkühlen können. Um 4 Uhr morgens wird die Bewertung beendet, da der Regler eine Vorhaltezeit macht, d.h. das Heizen beginnt schon vor dem Beginn des Niveaus Normal, um der Gebäudeträgheit entgegenzuwirken.

Zusätzlich wurden Komfortfunktionen definiert, welche quasi Strafpunkte für das Verlassen eines bestimmten Komfortbereichs zuweisen. Diese Strafpunkte wurden hauptsächlich für die Variationsrechnungen (siehe Kapitel 6.6) verwendet und auch benutzt, um Parametrisierungsfehler

schnell aufzudecken. Die Aussagekraft dieser Komfort-Strafpunkte für den absoluten Komfort ist allerdings eher gering.

Die Komfortfunktion ist definiert als Integral der Differenz zwischen der Temperatur der Luftknoten und der Raumsolltemperatur, wobei es einen Toleranzbereich gibt, in dem die Differenz als 0 bewertet wird. Das Integral wird nur über die Heizperiode gemacht. Die Toleranz nach oben (Überschreitung der Raumsolltemperatur) ist 2,0 K, die Toleranz nach unten sind 0,5 K. Dies ist eine starke Vereinfachung, da der empfundene Komfort sehr individuell ist, vom Nutzerverhalten und der Tageszeit abhängt sowie von zeitlich fluktuierenden Größen, wie Luftbewegungen im Raum oder der relativen Luftfeuchte (vgl. DIN EN ISO 7730).

## 6.6 Variationsrechnungen

Die ColSim-Simulation wurde eingesetzt, um verschiedene Regelparameter bzgl. der Energieeinsparung und des Komforts zu optimieren, beispielsweise die Koeffizienten der Proportional-Integralregelung der volumenstromgeführten Heizung, die Schaltdifferenzen bei der Warmwasserbereitung und Pufferbeladung, die Bedingungen für den solaren Vorrang, etc.. Die Abbildung zeigt beispielhaft Ergebnisse einer Simulation mit Pelletskessel und Fußbodenheizung für einen mehrmonatigen Zeitraum der Heizperiode.

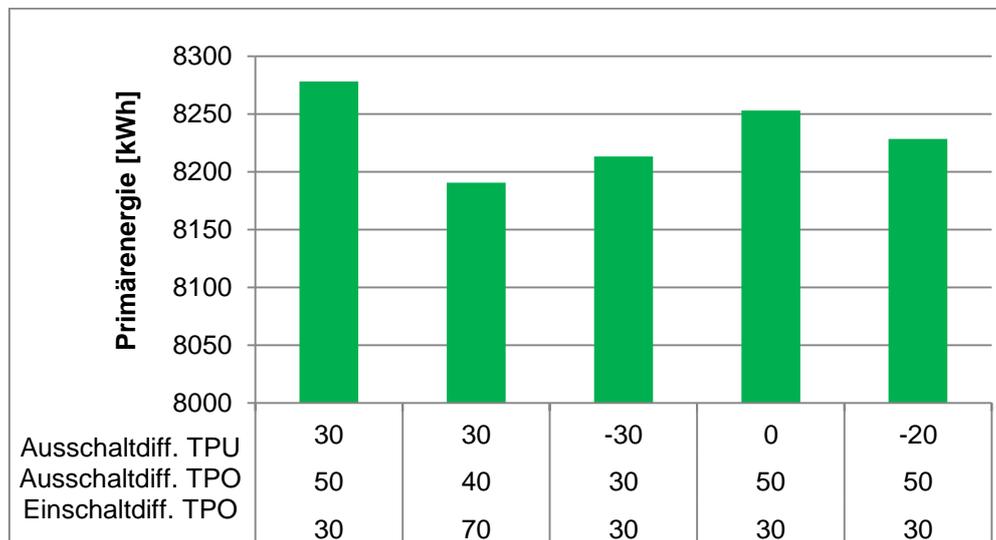


Abb. 6.8 Primärenergiebedarf Pelletskessel für verschiedene Ein- und Ausschaltdifferenzen für die Pufferbeladung

Es wurden die Ein – und Ausschaltdifferenzen bei der Pufferbeladung optimiert (siehe Abschnitt 2.4.6). Betrachtet wurde einerseits die Energieeinsparung, andererseits die Einbußen am Komfort, denn ein späteres Einschalten des Kessels bedeutet ein längeres Unterschreiten der Solltemperaturen im Heizkreis. Insgesamt ist es wichtig, dass ein schwerer Kessel wie ein Pelletskessel, genug Wärme an den Speicher abgegeben kann, wenn er einmal angelaufen ist. Daher muss der Abstand zwischen der Ein – und der Ausschalttemperatur bzgl. TPO groß genug sein.

## 6.7 Vergleichsrechnungen mit Standard-Regler

Es wurde eine 1-jährige Vergleichssimulation mit einem Gasbrennwertkessel gemacht. Die verglichenen Regler sind:

- der Standard Paradigma-Heizungsregler, i. F. genannt „Standard“, der die Vorlauftemperatur aus einer Heizkennlinie berechnet und mit festen Schaltdifferenzen bei der Pufferbeladung arbeitet. Dabei wurde eine Rechnung mit Standardeinstellungen gemacht, da laut internen Auswertungen viele Regler auf diesen Werten belassen werden (Fußpunkt: 35%, Steilheit 22%, keine Heizkennlinienoptimierung: 96%). Die Heizkennlinie ist mit den Standardeinstellungen für eine Fußbodenheizung zu weit nach oben verschoben, aber dies kann genauso durch den Effekt erzielt werden dass der Betreiber die Raumsolltemperaturen am Heizungsregler immer nach oben stellt, wenn er es zu kalt findet, und dann dort belässt, da die Thermostatventile den Raum vor Überhitzung bewahren. Eine zweite Rechnung wurde mit einer optimalen Einstellung der Heizkennlinien-Parameter gemacht, so dass die Räume gerade eben ihre Solltemperatur erreichen.
- der neue Systemregler „Ökoko“ mit dem volumenstromgeführten Heizprinzip. Dabei wurde der Einsteller Hydrokomfort variiert zwischen 30 und 70%, allerdings ergaben sich hier energetisch kaum Unterschiede solange auf dieselbe mittlere Raumtemperatur im Niveau „Normal“ geachtet wurde. Die unten aufgeführten Ergebnisse gelten für die mittlere Einstellung 50%.

Tabelle 6.2 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsrechnung mit einem Gasbrennwertkessel. Alle Zahlen sind in kWh, außer es ist eine andere Einheit angegeben.

Tabelle 6.2 Simulationsergebnisse der Vergleichsrechnung mit einem Gasbrennwertkessel

	$Q_{\text{Primär}}$ [kWh]	$Q_{\text{HeizV}}$ [kWh]	Sold [%]	$Q_{\text{Speicher}}$ [kWh]	$T_{\text{Normal}}$ [°C]	$T_{\text{Absenken}}$ [°C]	$\eta_{\text{System}}$ [%]	$\eta_{\text{Kessel}}$ [%]	Einsparung $Q_{\text{Primär}}$
Standard Default	12036	12867	23,2 %	905	20,0°C	19,9°C	122,5 %	106,0%	0 %
Standard optimal	11626	12447	23,8 %	904	20,0°C	19,2°C	124,0 %	106,0%	3,4%
Ökoko	11275	12266	24,2 %	887	19,9°C	19,1°C	126,8 %	107,4%	6,3 %

Der Systemregler Ökoko konnte 6,3 % an Energie einsparen gegenüber dem realistischen Fall eines Standardreglers mit suboptimaler Einstellung der Parameter. Der Kesselwirkungsgrad des Gasbrennwertkessels liegt um 1,4 Prozentpunkte höher, der Systemwirkungsgrad um 4,3 Prozentpunkte höher und die solare Deckung um 1,1 Prozentpunkte.

Der Systemregler Ökoko erzielt niedrigere Speicherverluste, mehr Solargewinn, besseren Gasbrennwertnutzen und weniger Verteilungsverluste bei der Heizung und bietet den Komfortgewinn einer stärkeren Nachtabsenkung: Beim Standardregler bedeutet Nachtabsenkung einfach nur ein paralleles „Nacht-unten-verschieben“ der Heizkennlinie, d.h. die Heizkreispumpe läuft im Winter meistens die ganze Nacht durch. Insbesondere wenn die Heizkennlinie sowieso etwas zu hoch eingestellt ist, wird fast keine Nachtabsenkung erzielt.

Der Systemregler Ökoko hingegen macht eine deutliche Nachtabsenkung, da er nach dem Wechsel zum Niveau Absenken die Heizung zunächst komplett abgestellt. Durch zyklisches Anschieben wird immer wieder geprüft, ob die Heizungsventile fast voll geöffnet sind. Erst dann setzt der Heizbetrieb wieder ein.

Im Vergleich des Systemreglers Ökoko mit einem vermutlich selten anzutreffenden Standardregler mit optimaler Einstellung aller Parameter reduziert sich die Energie-Einsparung auf 3,0 %.

Tabelle 6.3 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsrechnung mit einem Pelletskessel.

*Tabelle 6.3 Simulationsergebnisse der Vergleichsrechnung mit einem Pelletskessel*

	$Q_{\text{Primär}}$ [kWh]	$Q_{\text{HeizV}}$ [kWh]	SoLD [%]	$Q_{\text{Speicher}}$ [kWh]	$T_{\text{Normal}}$ [°C]	$T_{\text{Absenken}}$ [°C]	$\eta_{\text{System}}$ [%]	$\eta_{\text{Kessel}}$ [%]	Einsparung $Q_{\text{Primär}}$
Standard Default	14745	12786	23,3 %	962	20,0°C	19,9°C	99,6 %	86,4 %	0 %
Standard optimal	14436	12553	23,7 %	953	20,0°C	19,7°C	100,4 %	86,5 %	2,1 %
Ökoko	13993	12261	24,4%	925	20,0°C	19,1°C	102,2 %	86,6 %	5,2 %

Der hier simulierte Pelletskessel arbeitet mit einer Mindesttemperatur von 65°C und hat keine Brennwertnutzung, daher sind am Kesselwirkungsgrad kaum Einsparungen zu erzielen. Dagegen wurden etwas mehr Einsparungen bei den Speicherverlusten erzielt, denn da die volumenstromgeführte Heizung öfters ganz abschaltet als die konventionelle, wird in dieser Zeit der Speicher auch nicht nachgeheizt. Durch die hohen Kesselvorlauftemperaturen fällt die dabei erzielte Einsparung höher aus als beim Gasbrennwertgerät.

Eine Hydraulik, die öfters vorkommt, ist die Kombination eines Fußbodenheizkreises mit einem Radiatorheizkreis, wobei aber Fußbodenheizschleifen und Radiatorheizkörper dieselben Räume beheizen. Die Heizung wird dann so ausgelegt, dass die Fußbodenheizung für eine energiesparende Grundwärme sorgt, und die Radiatorheizung nur die letzten Grad für eine gemütliche Raumwärme liefert und insbesondere schnell mehr Wärme liefert falls gewünscht.

Besonders in diesem Szenario können unerwünschte Speicher – und Kessel-Wirkungsgradverluste auftreten, wenn der Hochtemperaturkreis aufgrund niedriger Außentemperaturen aktiv ist, aber die Thermostatventile der Radiatoren schon geschlossen sind, da die Räume schon durch die Fußbodenheizung ausreichend erwärmt sind. Denn der Heizungsregler gibt stets der beiden Heizkreisvorlaufswerte an den Puffer und an den Kessel weiter.

Da ColSim derzeit nur einen Kreis mit voller hydraulischer Berechnung rechnen kann, wird dieses System wie folgt simuliert: Obwohl es nur einen Fußbodenheizkreis gibt, wird dem Heizungsregler als maximale Vorlauftemperatur 70°C übergeben. Der konventionelle Heizungsregler bekommt eine Heizkennlinie wie für einen Radiatorheizkreis. Der Heizungsregler „Ökoko“ erhält auch als maximale Vorlauftemperatur von 70°C, kann aber mit der Information über den Öffnungsgrad der Thermostatventile nachkorrigieren bzw. den Heizkreis abschalten.

Tabelle 6.4 zeigt die Ergebnisse der (quasi-) Simulation des Systems mit zwei Heizkreisen, mit einem Gasbrennwertkessel. Angaben in kWh, außer es ist eine andere Einheit angegeben.

*Tabelle 6.4 Ergebnisse Vergleichsrechnung Hochtemperaturkreis mit Gasbrennwertkessel*

	$Q_{\text{Primär}}$ [kWh]	$Q_{\text{HeizV}}$ [kWh]	SoLD [%]	$Q_{\text{Speicher}}$ [kWh]	$T_{\text{Normal}}$ [°C]	$T_{\text{Absenken}}$ [°C]	$\eta_{\text{System}}$ [%]	$\eta_{\text{Kessel}}$ [%]	Einsparung $Q_{\text{Primär}}$
Standard	12413	12929	23,0 %	932	20,1	20,0°C	118,9	103,5 %	0
Ökoko	11622	12447	23,8%	907	20,0°C	19,2°C	124,4 %	106,1%	6,4 %

Die Energie-Einsparung beträgt hier 6,4 %, was als guter Anhaltspunkt dienen kann, auch wenn die Simulation hier nicht ganz der echten Systemhydraulik entspricht.

## 7 Erprobung im Feld

### 7.1 Redundantes Monitoring

Nachfolgend werden die Arbeiten zum redundanten Monitoring der Feldtestanlagen vorgestellt, die vom IGTE Uni Stuttgart durchgeführt wurden.

Hierbei standen drei Zielsetzungen im Vordergrund:

1. Vergleich der Messgenauigkeit der vom Regler aufgenommenen Messwerte im Vergleich zu der In Situ Messtechnik<sup>1</sup> des IGTE
2. Bereitstellung von umfangreichen Messdaten, die zu Validierungszwecken der numerischen Simulationen im CoSim herangezogen werden
3. Analyse und Auswertung der Feldtestdaten des redundanten Monitorings und Ableitung von Bewertungskriterien

Durch die Verwendung von hochwertiger Messtechnik (In Situ Messtechnik), die vor Installation in den Feldtestanlagen einer Laborkalibrierung am IGTE unterzogen wurden, steht eine geprüfte Referenz zur Verfügung. Durch das detaillierte Monitoring wird die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Energie-Monitorings des Heizungsreglers überprüft. Es wird überprüft, ob die vom Regler errechneten Energiemengen konsistent sind mit den detaillierten Messungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Feldtestuntersuchung ist die Erfassung von belastbaren Messdaten, anhand derer die entwickelten numerischen Simulationsmodelle überprüft werden können.

Beim redundanten Monitoring erfolgte die Überwachung der Energieströme in der Heizungsanlage zum einen durch die Sensorik des entwickelten Reglers, zum anderen durch den Einbau von zusätzlichen, geprüften bzw. kalibrierten Messtechnik durch das IGTE. Durch den Einbau der zusätzlichen, reglerunabhängigen Messtechnik konnte die Genauigkeit und Qualität der vom Regler erfassten Energieströme untersucht und bewertet werden. Darüber hinaus wurden durch das zusätzliche Messsystem weitere Messgrößen aufgezeichnet, die vom Regler nicht erfasst werden, jedoch wichtige Informationen zum Heizsystem und zum Regelverhalten liefern. Dies beinhaltete z.B. die Erfassung von aller Raumtemperaturen mit Hilfe von Funksensoren, um zu überprüfen ob eine Überhitzung bzw. Unterkühlung der Räume aufgrund passiver Gewinne erfolgt oder die Erfassung der solaren Einstrahlung und der Außentemperatur in Kollektorebene zur energetischen Bewertung der Solaranlage.

Für das redundante Monitoring wurde die in Abb. 7.1 bis Abb. 7.3 dargestellte Messtechnik verbaut. Es wurden Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizkreises (bzw. bei Feldtestgebäude 2 des Radiatoren Heizkreises und der Fußbodenheizung), des Kesselkreises, des Solarkreises und des Trinkwassers und der Zirkulation erfasst.

---

<sup>1</sup> In-situ-Messung: Messung findet während des Betriebs statt

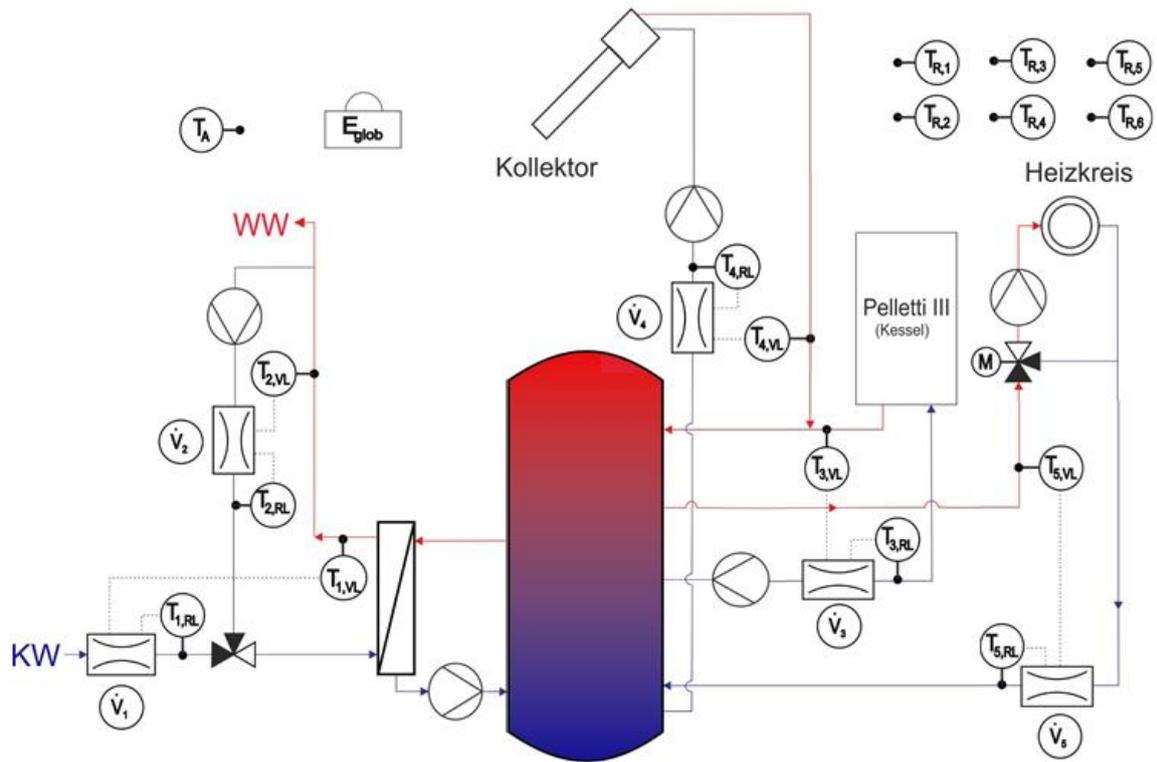


Abb. 7.1 Verteilung der Messtechnik Feldtestgebäude 1

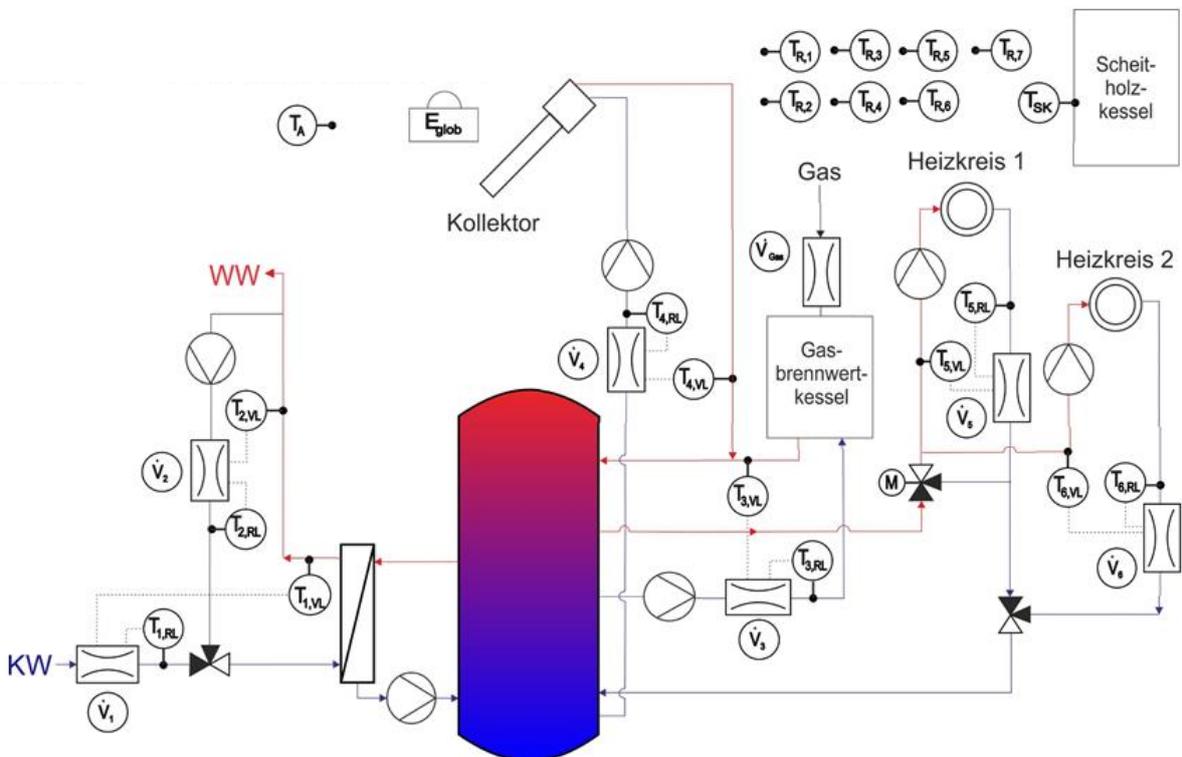


Abb. 7.2 Verteilung der Messtechnik Feldtestgebäude 2

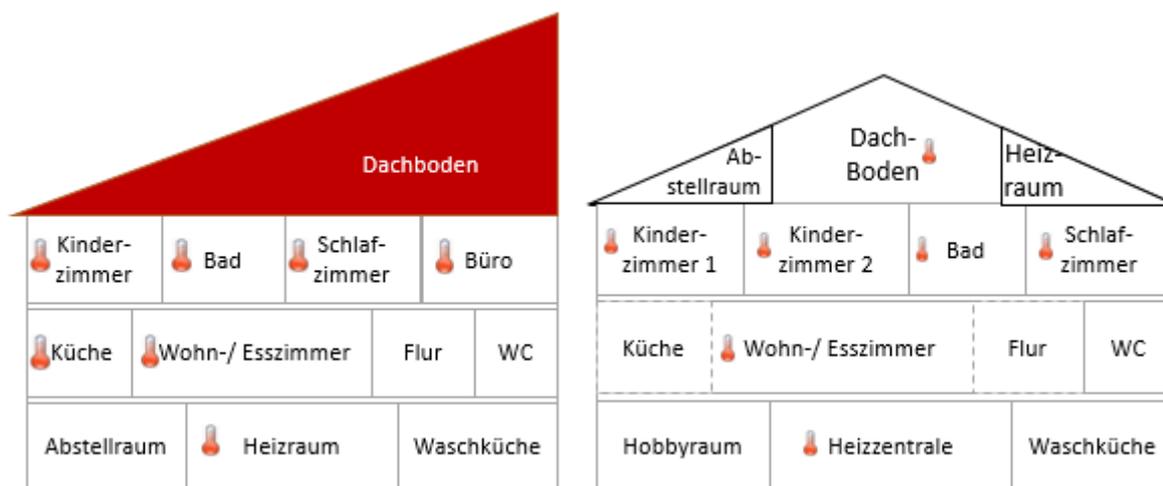


Abb. 7.3 Erfasste Raumtemperaturen in Feldtestgebäude 1 (links) und Feldtestgebäude 2 (rechts)

In beiden Gebäuden wurde zunächst die konventionelle Heizungsregelung messtechnisch untersucht. Danach wurde der neuen Heizungsregler „Ökoko“ eingebaut. So ist bei beiden Feldtest-Gebäuden der direkte Vergleich zwischen konventionell geregelter System und dem neuartigen Regler möglich.

### Überprüfung der Genauigkeit der vom Heizungsregler aufgenommenen Werte

Zunächst wurden die Volumenstrom-Messgeräte (Huba DN8 und Huba DN10<sup>2</sup>) die von Reut mit dem Heizungsregler eingesetzt werden, am IGTE im Labor untersucht. Dazu wurde eine Versuchsstrecke aufgebaut, in der der Volumenstrommesser von Huba gegen ein hochgenaues Coriolis-Volumenstrommessgerät bei unterschiedlichen Volumenströmen und Temperaturen verglichen wurde. Bei höheren Temperaturen wurde der Volumenstrom prinzipiell zu hoch gemessen und bei niedrigen Temperaturen zu niedrig. Bei dem Huba DN8 ergab sich eine relative Abweichung des Mittelwertes bezogen auf den mittleren Volumenstrom von bis zu 5 % und bei dem Huba DN10 mit Messbereich 2 - 40 l/min eine Abweichung von bis zu knapp 9 % bei sehr kleinen Volumenströmen (s. Abb. 7.4). Der Huba DN8 lieferte prinzipiell zu niedrige Werte und der Huba DN10 mit Messbereich 1,8 - 32 l/min und mit Messbereich 2 -40 l/min lieferten prinzipiell zu hohe Werte. Der Huba DN8 zeigte zudem ein sehr stark temperaturabhängiges Verhalten.

Zudem lieferte der DN10 mit Messbereich 2-40 l/min erst ab Volumenströmen von etwa 150 l/h (2,5 l/min) verlässliche Werte (S. Abb. 7.5 rechts) Nahe der unteren Grenze des Messbereichs schwanken die Werte sehr stark und liegt somit außerhalb der vom Hersteller angegebenen Grenzen von  $\pm 2\%$ .

Der Huba DN10 mit Messbereich 1,8 - 32 l/min lag innerhalb der vom Hersteller angegebenen Grenzen von  $\pm 2\%$  (Vgl. Abb. 7.6) Lediglich bei sehr hohen Volumenströmen und sehr geringen Temperaturen liegen die Werte oberhalb dieser Grenze, was für den (Feldtest-)Betrieb jedoch nicht relevant ist, da diese Kombination während eines realen Betriebs nicht auftritt.

<sup>2</sup> Huba DN8: Typ 236 Messbereich 1,8-32 L/min; Huba DN10: Typ 236 Messbereich 1,8-32 L/min und 2-40 L/min

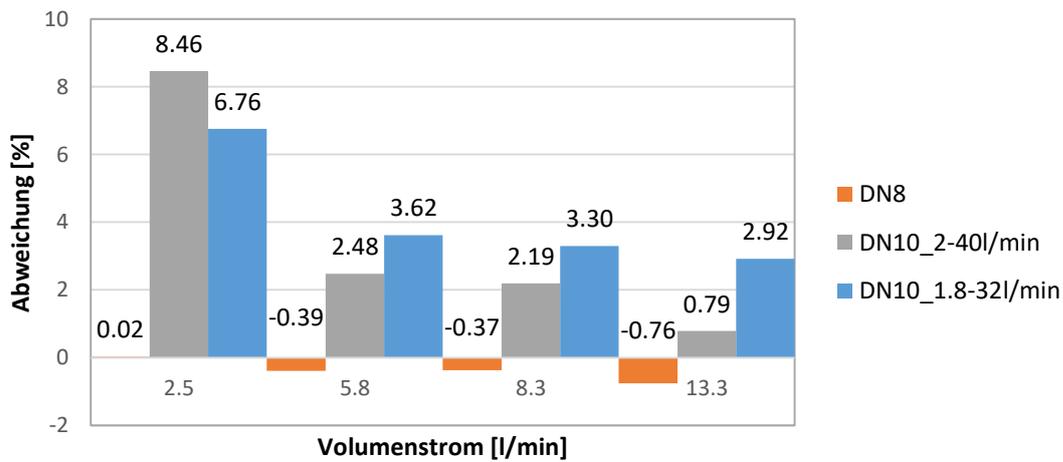


Abb. 7.4 Relative Abweichung des Volumenstromes der verschiedenen Huba Sensoren bei 2,5 – 13,3 l/min bzw. 150 – 800 l/h<sup>3</sup>

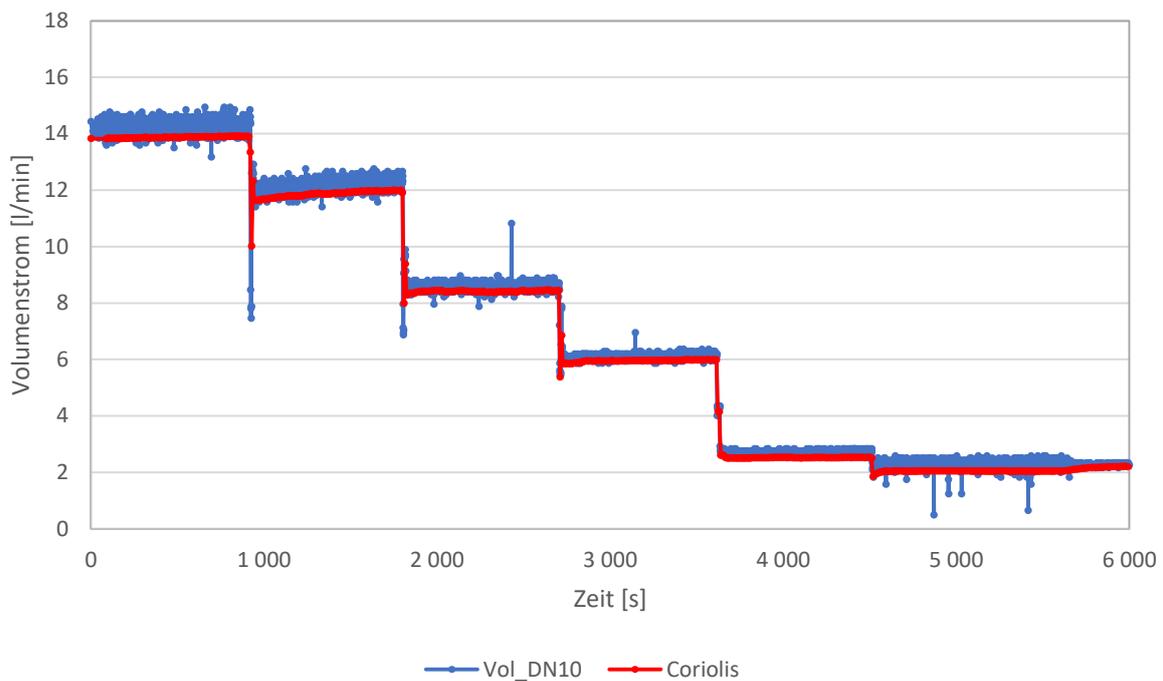


Abb. 7.5 Volumenströme des Huba Sensors: DN10 2-40l/min im Vergleich mit Coriolis-Durchflussmesser (rot)

<sup>3</sup> Bezogen auf den mittleren Volumenstrom des Coriolis-Durchflussmessers

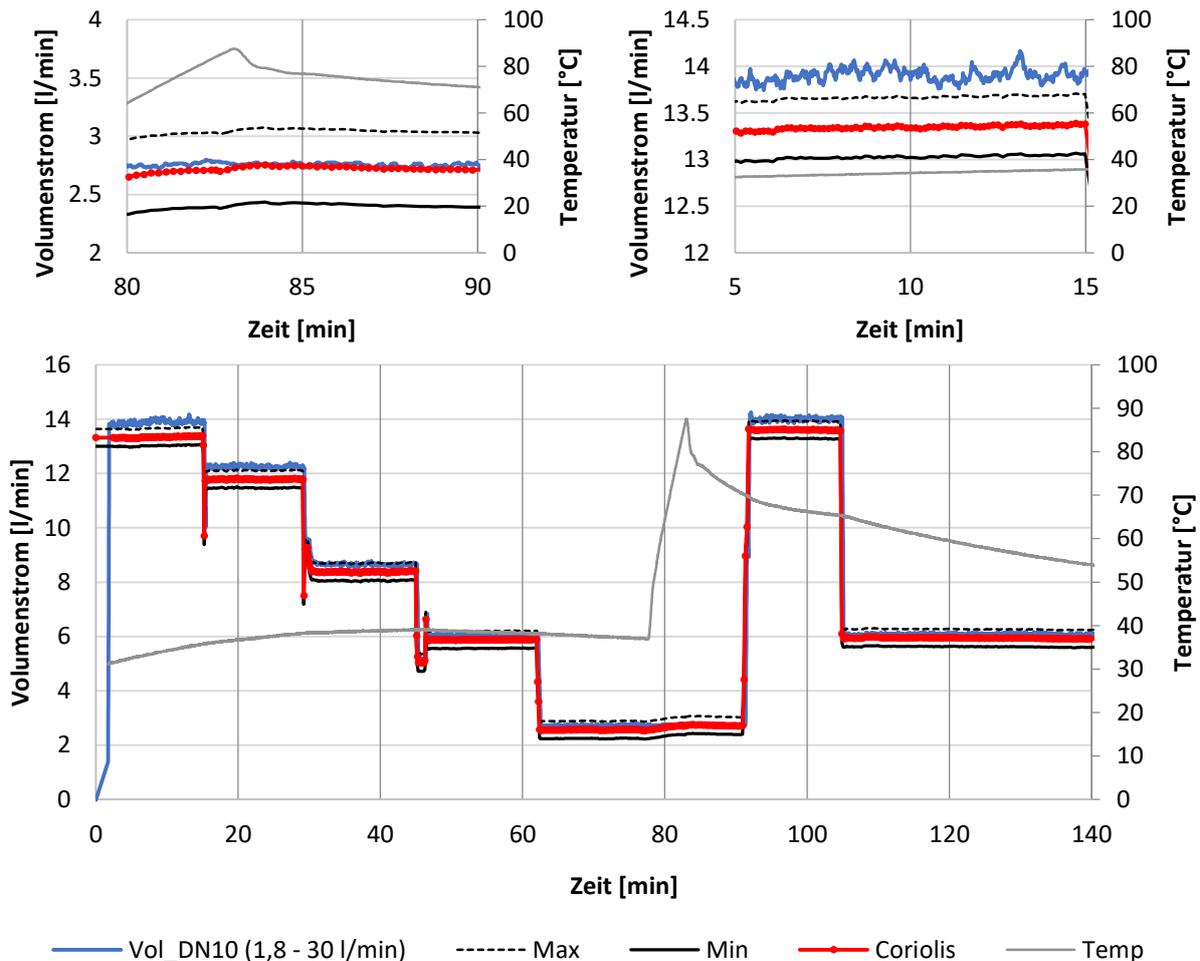


Abb. 7.6 Volumenstrom des Hubasensors DN10 in l/min mit Messbereich 1,8 – 32 l/min mit Angabe der maximalen Abweichung laut Hersteller (Min & Max)

Die in den Huba Messgeräten verbauten Temperatursensoren sowie ein NTC-Temperaturwiderstand<sup>4</sup> wurden in der gleichen Versuchsstrecke mit kalibrierten Pt100 Sensoren abgeglichen<sup>5</sup>. Die gemessene Temperatur des NTC war prinzipiell zu niedrig, im DN10 prinzipiell zu hoch im Vergleich zu den kalibrierten Sensoren. Die Temperatur des im Huba DN8 verbauten Sensors wies eine starke Temperaturabhängigkeit auf (Vgl. Abb. 7.7 – blaue Kurve bei niedrigen Temperaturen höher als die rote Vergleichsmessung und bei hohen Temperaturen niedriger). Während der DN8 und der DN10 Sensor mit einer Abweichung von 0,5 bis 5 % bzw. 0,35 bis 2 % in einem akzeptablen Bereich liegen, so betrug die Temperatur bei dem NTC Sensor bis zu 13 % vor allem bei Abkühlen des strömenden Mediums. An der Stelle kann es aber auch an der Trägheit des Sensors liegen. Insgesamt sind alle Sensoren deutlich träger im Vergleich zu den kalibrierten Sensoren, insbesondere der NTC (Vgl. Abb. 7.7 unten). Dies liegt daran, dass alle Sensoren in einer Tauchhülse bzw. als Anlegefühler ausgeführt sind, im Gegensatz zu den kalibrierten Temperatursensoren, welche direkt in das zu messende Medium eingetaucht sind. Diese Trägheit bewegt sich allerdings im Bereich von Sekunden, was für die Heizungstechnik tolerabel ist. Der NTC Fühler zur Messung der Vorlauftemperatur wurde nicht verwendet sondern durch Pt1000 Sensoren<sup>6</sup> in einer Tauchhülse ersetzt, damit Vorlauf und Rücklauf

<sup>4</sup> Negative Temperature Coefficient, Temperatursensor, der die Widerstandseigenschaften von Keramik-Metall-Verbundstoffen zur Temperaturmessung nutzt

<sup>5</sup> Ein Pt100 ist ein Platin-Widerstand mit einem in IEC 751 (EN 60751) definiertem Nennwiderstand von 100  $\Omega$  bei einer Temperatur von 0°C. Kalibrierung erfolgt im Rahmen des akkreditierten Prüflabors des IGTE, mit einer Genauigkeit von 0,05 Kelvin

<sup>6</sup> Nennwiderstand von 1000  $\Omega$  bei einer Temperatur von 0°C

mit dem gleichen Sensor gemessen werden. Die Werte für die Temperaturen der in den Huba Geräten verbauten Pt1000 Temperatursensoren überstiegen in der Laborvermessung die vom Hersteller angegebenen Werte zur Abweichung von  $\pm 2\%$  (S. Abb. 7.8). Da auf Anfragen beim Hersteller keine entsprechende Maßnahme seitens des Herstellers ergriffen wurde, wurde ein Messprogramm eingeführt, bei dem Vor- und Rücklauffühler abgeglichen werden (S. Kapitel 2.9).

Letztendlich wurde im Feldtest das Modell DN 10 1,8-32 l/min verwendet, da er eine bessere Genauigkeit und einen für die Anwendung akzeptablen Druckverlust und Messbereich aufweist.

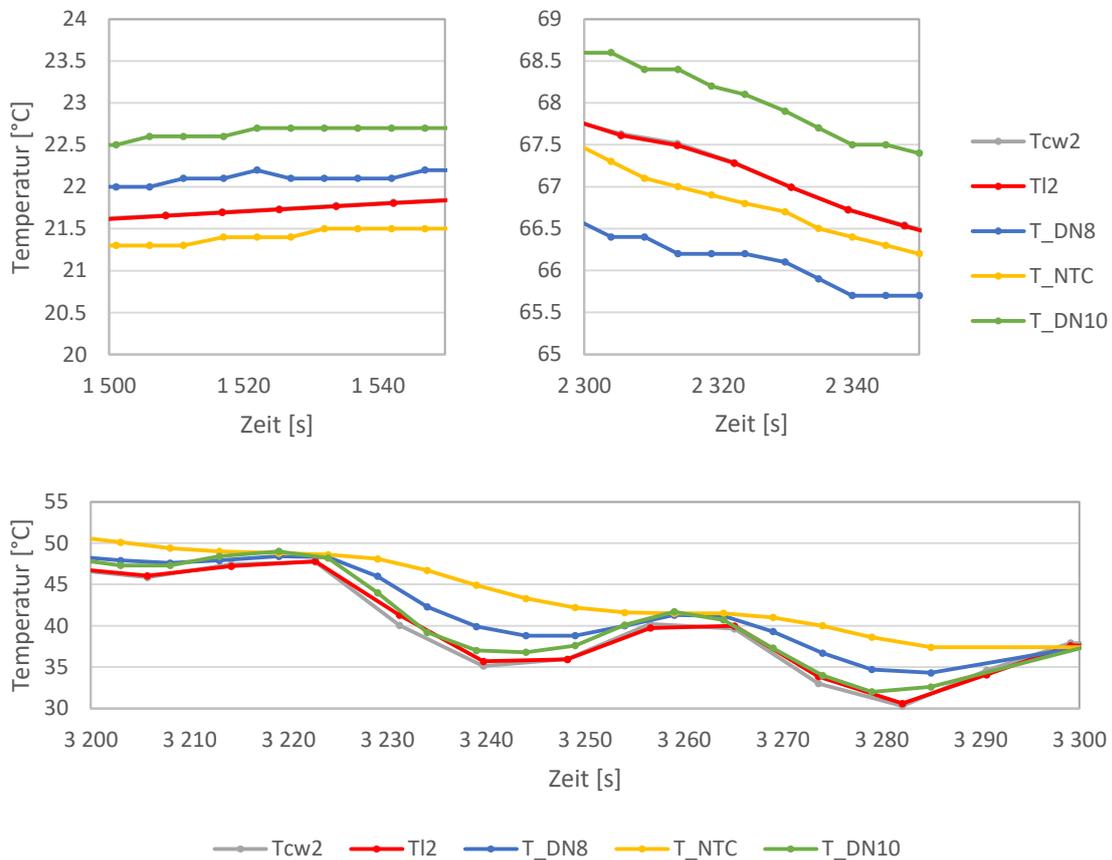


Abb. 7.7 Vergleich der Temperaturen der Huba-Sensoren (blau: DN8, grün: DN10) des NTC-Sensors (gelb) mit den kalibrierten Pt100 Sensoren (rot und grau)

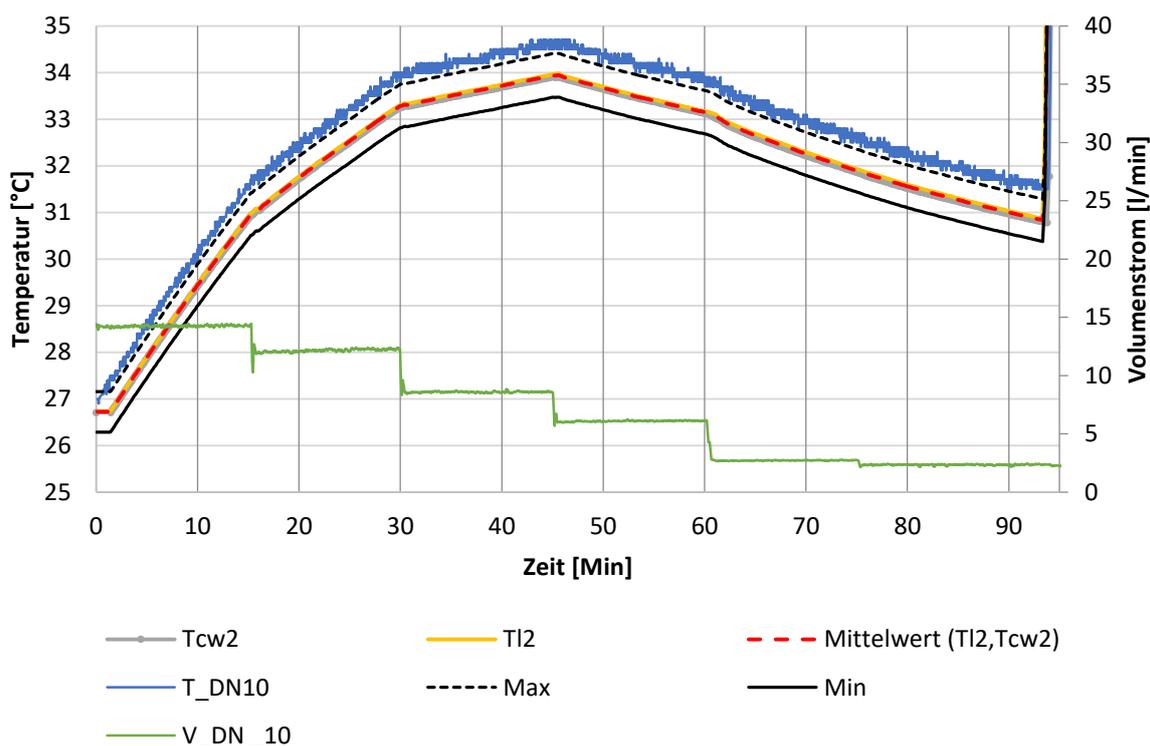


Abb. 7.8 Temperatur des DN10 2-40 l/min (blau) im Vergleich zu den kalibrierten Pt100 Sensoren (rot und gelb) inkl. der minimalen und maximalen (gestrichelt) Abweichungen laut Hersteller

Während der Feldtestuntersuchungen erfolgte ein systematischer und kontinuierlicher Vergleich der vom Heizungsregler Webportal aufgenommenen Messwerte und der In Situ Messtechnik des IGTE. Für die In Situ Messung wurden Pt500<sup>7</sup> Temperatursensoren verwendet. Zur Volumenstrommessung, wurden Geräte ausgewählt, welche den Durchfluss mit Ultraschall erfassen und somit das System nicht durch zusätzlichen Druckverlust beeinflussen. Diese Sensoren wurden ebenfalls mit dem Coriolis-Volumenstrommessgerät und den kalibrierten Pt100-Sensoren im Labor verglichen. Der Volumenstrom wurde bei kleinen Volumenströmen tendenziell zu gering und bei hohen Volumenströmen zu hoch gemessen. Es ergab sich maximal eine Abweichung von 1-2 % sowohl bei Volumenstrom als auch bei der Temperatur. Allerdings unterschieden sich Vorlauf und Rücklauf maximal um 0,1 K. Da ja die Temperaturdifferenz für die Wärmemengenzählung maßgeblich ist, wird dadurch kein Fehler gemacht. Der Gesamtfehler der Wärmemengenzählung liegt somit bei 1-2 %. Somit ist die Genauigkeit der eingesetzten In Situ Messtechnik ausreichend, um die Wärmemengenzählung der Huba-Sensoren damit zu vergleichen und zu bewerten.

Die Bilanzierung der gesamten Energieströme der Feldtestanlagen beinhaltet die Integration einer Vielzahl von Messsensoren, die in festgelegten Zeitintervallen abgefragt und protokolliert werden. Bei der Betrachtung der Messergebnisse ist zu beachten, dass sich bei der hier angewendeten Bilanzierungsmethode alle Messgenauigkeiten aufsummieren. Besonders schwierig ist die exakte Erfassung der Messgrößen unter stark instationären Bedingungen. Die thermische Trägheit der Temperatursensoren und die gewählte Abtastrate spielen eine große Rolle. Relativ genau gelingt die Messung des Heizkreises, da hier nur geringe Schwankungen in Temperatur und Volumenstrom auftreten. Bei konstanten Wetterbedingungen gilt dies auch für den Solarkreis. Besonders schwierig ist der Trinkwasserkreis, da hier häufig sehr kurze Warmwasserzapfungen auftreten, die nicht immer messtechnisch exakt erfasst werden. In den Monaten der Heizperiode mit geringeren Schwankungen und hohen Energieumsätzen ist die Genauigkeit höher als in den instationären Sommermonaten mit deutlich geringerem Energieumsatz.

<sup>7</sup> Nennwiderstand von 500  $\Omega$  bei einer Temperatur von 0°C

Die Bilanzen der Messtechnik von IGTE und REUT wurden miteinander verglichen und es konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht werden. Die Genauigkeit der Messtechnik von REUT im Vergleich zur hochgenauen Labormesstechnik konnte im Laufe des Projektes verbessert werden (s. Abb. Abb. 9.11 bis Abb. 9.16 im Anhang) Vor allem der Fehler im Heizkreis konnte durch das Sensorabgleichsprogramm (s. Kapitel 2.9) auf ein Minimum reduziert werden. Im Kesselkreis war es nicht möglich die Genauigkeit so weit zu verbessern, da hier die Temperatur mit unterschiedlichen Fühlern (interner NTC des Kessels für Vorlauf, Pt500 im Vorlauf) erfasst wird. Zudem ist hier ein Sensorabgleichsprogramm wie im Heizkreis nicht durchführbar, da keine hydraulische Kreis-Führung über einen Mischer möglich ist.

Die anderen Größen werden von externen Regler ermittelt, die während des Projekts nicht geändert wurden.

Die genaue Analyse der Messdaten zeigte eine typische Varianz bezüglich des Vergleichs zur In Situ Messtechnik. Die Betrachtung der zeitlich hoch aufgelösten Daten zeigt, dass an manchen Messstellen sowohl bei Temperatur als auch bei den Volumenstrommessungen mal größere Unterschiede (10 %) auftreten, an anderen Stellen eine sehr gute Übereinstimmung (< 3%) vorliegt. Durch Multiplikation der Messungenauigkeiten von Volumenstrom und Temperaturdifferenz ergibt sich eine Messgenauigkeit für die Wärmemenge im Kesselkreis beim Feldtestgebäude 1 von etwa 25-26 %, im Heizkreis hingegen konnte durch das Sensorabgleichsprogramm auf unter 10 % gesenkt werden. Im Feldtestgebäude 2 liegt die Abweichung der Wärmemenge des Heizkreises bei 5 – 7 % und des Kesselkreises unter 10 %.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Die mit dem Heizungsregler erzielten Messergebnisse sind als hinreichend gut zu bezeichnen. Unter Berücksichtigung dieser sehr komplexen Messaufgabe erfüllt sowohl die eingesetzte Messtechnik, wie auch die im Regler hinterlegten Auswerteroutinen die Anforderungen sehr gut. Die Genauigkeit der gemessenen Energieströme und die daraus berechneten Energiebilanzen sind im Vergleich zu anderen in der Solartechnik eingesetzter Messtechnik sehr gut.

## Bilanzierung der Energiemengen zur Überprüfung der Plausibilität der In Situ Messdaten

Die In-Situ Messdaten und die Messdaten des Heizungsreglers wurden aufgezeichnet, aufbereitet und in minütlich aufgelösten \*.dat-files zur Verfügung gestellt. Diese Daten dienen unter anderem der Validierung der numerischen Simulationen mit ColSim (Kapitel 6). Die Messgenauigkeit und Plausibilität der In-Situ Messeinrichtungen wurde geprüft, indem Energie-Bilanzen um den Speicher erstellt wurden (Vgl. Abb. 7.12):

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{Kessel} - \dot{Q}_{Heiz} - \dot{Q}_{TW} - \dot{Q}_{Zirk} - \dot{Q}_{Verl,Sp} - \dot{Q}_{Verl,VR} = \dot{Q}_{Diff}$$

bzw. über die Zeit aufsummiert:

$$\sum Q_i = Q_{Sol} + Q_{Kessel} - Q_{Heiz} - Q_{TW} - Q_{Zirk} - Q_{Verl,Sp} - Q_{Verl,VR} = Q_{Diff}$$

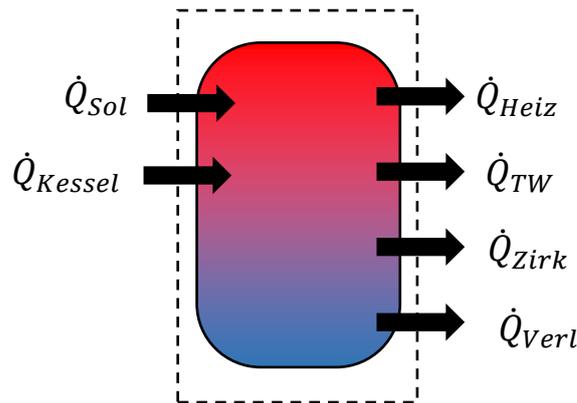


Abb. 7.9 Speicherbilanz mit Wärmequellen (links) und Wärmesenken (rechts)

Hierbei sind:

- $\dot{Q}_{Sol}$  – eingebrachte Wärme des Solarkreises
- $\dot{Q}_{Kessel}$  – fossil erzeugte Wärme aus Pellets  $\dot{Q}_{Pell}$  bzw. Gas  $\dot{Q}_{Gas}$
- $\dot{Q}_{Heiz}$  – für den Heizkreis bzw. die Heizkreise entnommene Energie
- $\dot{Q}_{TW}$  – für das Trinkwasser entnommene Energie
- $\dot{Q}_{Zirk}$  – für die Zirkulation benötigte Energie
- $\dot{Q}_{Verl} = \dot{Q}_{Verl,Sp} + \dot{Q}_{Verl,VR}$  Wärmeverlust des Speichers und der Verrohrungen

Bei dem Feldtestgebäude 2 besteht die abgeführte Wärme für die Raumheizung (Index Heiz) aus den beiden Heizkreisen der Radiatoren und der Fußbodenheizung.

In den Monaten der Heizperiode ergab die Überprüfung der Energie-Bilanzen von eingespeicherter und entnommener Energie nur geringe Abweichungen von 3 bis maximal 5,7 % (bezogen auf die eingespeicherte Wärme). Diese geringen Abweichungen lassen sich darauf zurückführen, dass die Speicherverluste mittels der Speichertemperaturen berechnet und die Verrohrungsverluste nur abgeschätzt sind. In den Sommermonaten sind die Abweichungen in ihrer absoluten Größe etwa gleich groß wie in den Wintermonaten. Bezogen auf den deutlich geringeren Gesamtenergieumsatz wirken sie sich prozentual jedoch stärker aus.

In Abb. 7.14 und Abb. 7.15 sind die monatlichen Energieströme aufsummiert und als Balken dargestellt. Dabei sind die zugeführten Energien als positive Werte aufgetragen, die entnommene Energie als negative Werte. Zusätzlich dargestellt als schwarze Punkte ist die berechnete Differenz zwischen zugeführter und abgeführter Energie. Mit Ausnahme weniger Ausreißer lässt sich eine gute Übereinstimmung feststellen, was ein Beleg für die hohe Güte der In-Situ-Messung ist.

Die so durchgeführten Messungen bilden die Referenz für die Messdaten des Heizungsreglers.

Zu beachten ist, dass von Mitte Februar 2017 bis April 2017 ein Ausfall des Datenmonitorings aufgrund einer defekten SD Karte zu verzeichnen war und daher hier keine In-Situ Daten vorhanden sind.

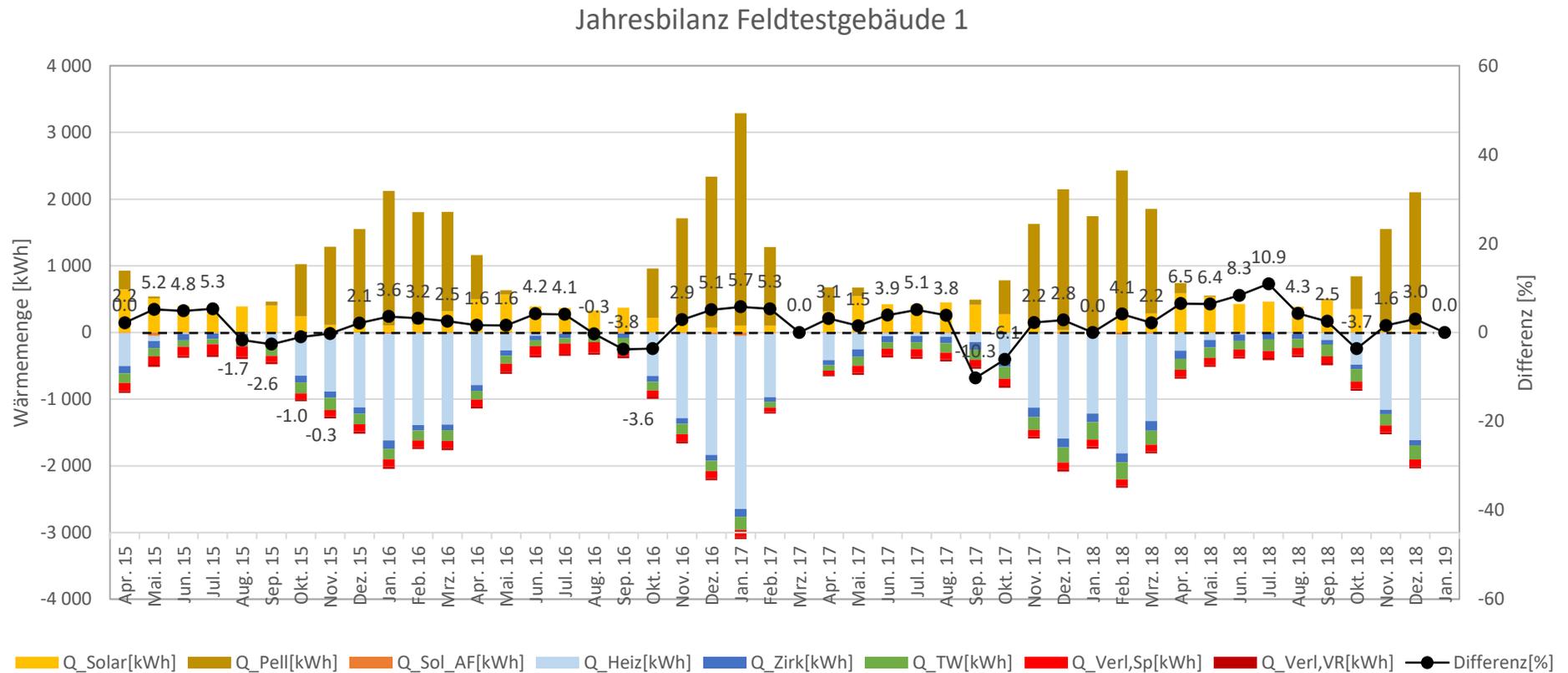


Abb. 7.10 Bilanz der monatlichen Wärmemengen des Feldtestgebäudes 1. Zugeführte Energien als positive Werte, abgeführte Energien als negative Werte

Bei Feldtestgebäude 2 war ein Defekt an der SD Karte gleich zu Beginn von Mitte November 2015 bis Mitte Dezember 2015. Daher auch hier eine etwas geringe Summe in diesen beiden Monaten.

### Jahresbilanz Feldtestgebäude 2

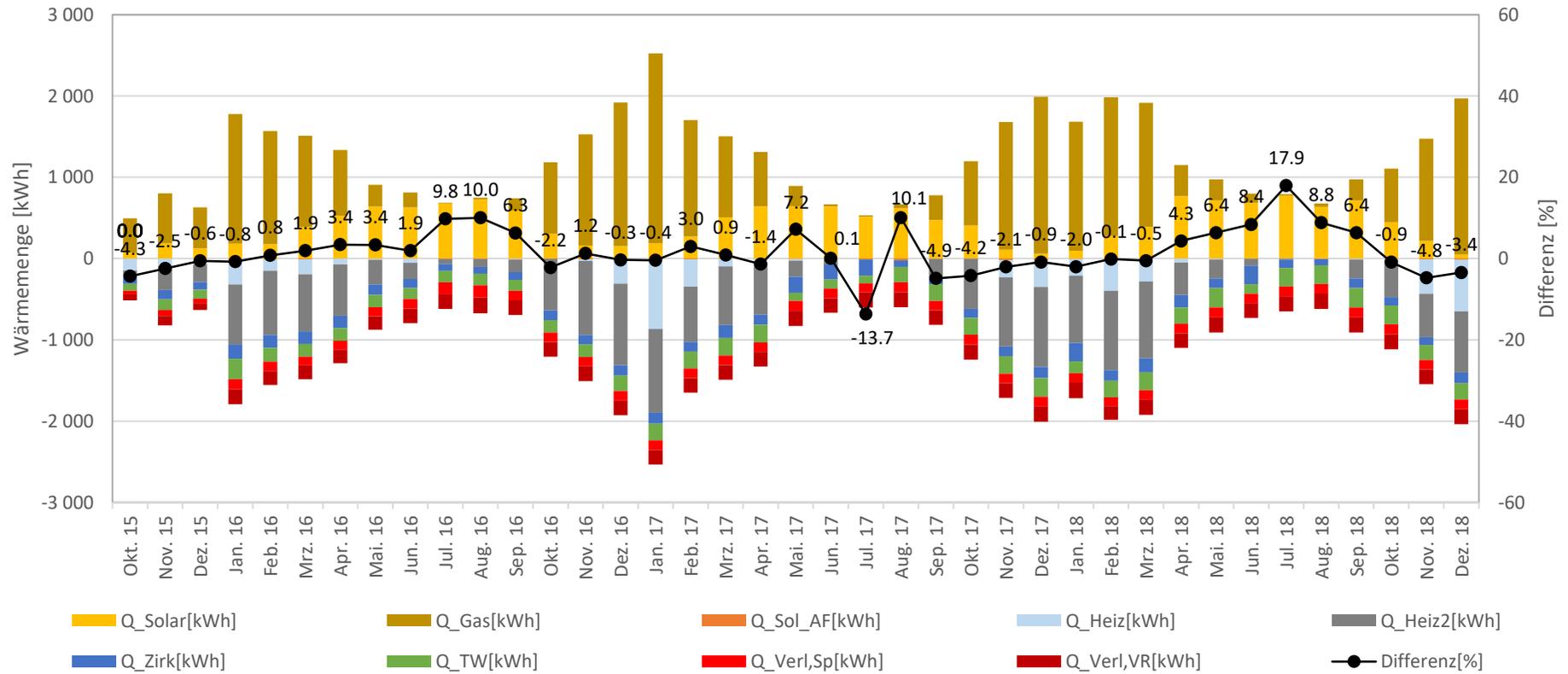


Abb. 7.11 Bilanz der monatlichen Wärmemengen des Feldtestgebäudes 2. Zugeführte Energien als positive Werte, abgeführte Energien als negative Werte

## 7.2 Feldversuchsdurchführung

Ziel des Feldversuchs ist es, den Heizungsregler integriert in einer Heizungsanlage unter realen Betriebsbedingungen zu erproben. Im Gegensatz zu einer Laboruntersuchung des Reglers, bei dem vor allem die technischen Funktionen überprüft und optimiert werden, werden im Feldversuch zusätzlich zu den technischen Aspekten wie Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit auch wichtige Informationen zur Interaktion „Kunde-Regler“ gewonnen. Wichtig ist es, dass es zu keiner Zeit zu einem inkonsistenten Reglerverhalten kommt. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass die Diagnosefunktion des Reglers fehlerhafte bzw. energetisch ungünstige Betriebszustände richtig erfasst und meldet. Hierzu werden die Feldversuchsanlagen kontinuierlich online überwacht und die Daten auf Fehlfunktionen kontrolliert.

Die Feldversuchuntersuchung gliedert sich in ein umfassendes und hochaufgelöstes „redundantes Monitoring“ von zwei Heizungsanlagen, sowie in ein „vereinfachtes Monitoring“ von 8 weiteren Heizungsanlagen. Eine Übersicht der Feldversuchsanlagen ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 7.1 Übersicht Feldversuchsanlagen

Inbetriebnahme	Monitoring	Kessel	Solarthermie	Hydraulik	Wärmeabgabe
02/2016 12/2016	redundantes	Gasbrennwert (neu)	Ja	Kombispeicher (*)	Fußboden und Radiator
02/2016 12/2016	redundantes	Pelletsessel (alt)	Ja	Kombispeicher	Radiator
12/2016	vereinfachtes	Pelletsessel (alt)	Ja	Kombispeicher	Radiator
02/2017	vereinfachtes	Gasbrennwert (neu)	Ja	Kombispeicher	Radiator
12/2016	vereinfachtes	Gasbrennwert (alt)	Ja	Umlenkventil	Radiator und Wand
02/2017	vereinfachtes	Scheitholz	Ja	Kombispeicher	Fußboden
02/2017	vereinfachtes	Fernwärme	Nein	Kombispeicher	Fußboden
02/2017	vereinfachtes	Gasbrennwert (neu) und Scheitholz	Ja	Kombispeicher	Fußboden und Radiator
03/2017	vereinfachtes	Pellet Brennwert	Ja	Kombispeicher	Fußboden, Radiator Wand
03/2017	vereinfachtes	Pelletsessel (neu)	Ja	Kombispeicher	Fußboden Radiator Wand

(\*) Anlagenhydraulik siehe Abb. 2.9

(\*\*) Anlagenhydraulik siehe Abb. 9.3

(neu) neues Modell / (alt) altes Modell

### 7.2.1 Entwickeln einer Systematik zur Beurteilung der Qualität eines Heizsystems

Die Beurteilung der Qualität eines Heizsystems stellt aufgrund der Vielzahl von Abhängigkeiten (Wetter, Anlagentechnik, etc.) und individuellen Einflüssen (Nutzerverhalten, Gebäude) eine schwierige und umfassende Aufgabe dar. In dem vorliegenden Fall kam erschwerend hinzu, dass während des Monitoringzeitraums bewusst Änderungen in der Regelung vorgenommen und untersucht werden sollten. Die gemessenen Heizperioden können in 4 bzw. 5 verschiedene Bereiche (Perioden) in denen größere Änderungen an der Regelung durch REUT vorgenommen wurden, eingeteilt werden:

Tabelle 7.2: Einteilung in Perioden - Feldtestanlage 1

Periode	Datum Feldtestanlage 1	
Periode 1	01.03.2015 – 30.04.2015, 01.10.2015 – 28.01.2016	Außentemperaturgeführt
Periode 2	29.01.2016 – 30.04.2016, 01.10.2016 – 20.12.2016	Volumenstromgeführt Entwicklungsversion
Periode 3	21.12.2016 – 30.04.2017, 01.10.2017 – 18.12.2017	Volumenstromgeführt Setting Komfort
Periode 4	19.12.2017 – 30.03.2018,	Volumenstromgeführt Setting Kompromiss Öko/Komfort
Periode 5	01.09.2018 - 31.12.2018	Außentemperaturgeführt

Tabelle 7.3: Einteilung in Perioden - Feldtestanlage 2

Periode	Datum Feldtestanlage 2	Regelstrategie
Periode 1	21.10.2015 – 27.01.2016	Außentemperaturgeführt
Periode 2	28.01.2016 – 30.04.2016, 01.10.2016 – 08.12.2016	Volumenstromgeführt Entwicklungsversion
Periode 3	09.12.2016 – 30.04.2017 01.10.2017 – 19.12.2017	Volumenstromgeführt Setting Komfort
Periode 4	20.12.2017 – 30.03.2018,	Volumenstromgeführt Setting Kompromiss Öko/Komfort
Periode 5	01.09.2018 – 31.12.2018	Außentemperaturgeführt

Nachfolgend werde vier Ansätze vorgestellt, die unter verschiedenen Aspekten den Nutzen der Heizungsanlage mit dem energetischen Aufwand korrelieren. Ziel der Korrelationen ist es, Anlagen-Charakteristiken zu erkennen, die den einzelnen Regelstrategien zugeordnet werden können. Die in den Diagrammen der Abbildungen Abb. 7.16 bis Abb. 7.23 dargestellten Punkte repräsentieren die tägliche Summe der betrachteten Energie. Es werden dabei nur die Monate in der Heizperiode (September bzw. Oktober bis März bzw. April) betrachtet.

Im ersten Bewertungsansatz wird die pro Tag aufsummierte fossil erzeugte Energie  $Q_{\text{Kessel}}$  (Pellets- bzw. Gaskessel) über der Temperaturdifferenz zwischen der täglichen, mittleren Wohnzimmertemperatur<sup>8</sup> und der Außentemperatur aufgetragen. Dies stellt quasi den fossilen Aufwand zum Nutzen in Form der erreichten Differenz der Wohnraumtemperatur zur Außentemperatur dar. Zudem wurden die einzelnen Punkte nach der über den Tag aufsummierten Strahlung (kWh pro Tag und m<sup>2</sup>) sortiert und farblich markiert (s. Abb. 7.16). Die Sortierung nach aufsummierter Strahlung zeigt, dass bei den finalen Einstellungen des Reglers eine Entmischung und eindeutige Korrelation von Einstrahlung und Heizbedarf durch die fossile Feuerung (Gas bzw. Pellets) erreicht werden konnte (Vgl. Abb. 7.17). Die Tage mit den geringsten Einstrahlungsmengen (blaue Dreiecke) haben den höchsten Nachheizbedarf. An Tagen mit einer Tagesstrahlungssumme über 2,5 kWh pro Tag und Quadratmeter wird nahezu keine zusätzliche fossile Energie mehr benötigt. Zuvor wurde bei Tagen mit guter Einstrahlung teilweise auch nachgeheizt.

<sup>8</sup> Diese entspricht der Führungstemperatur des herkömmlichen Heizungsreglers

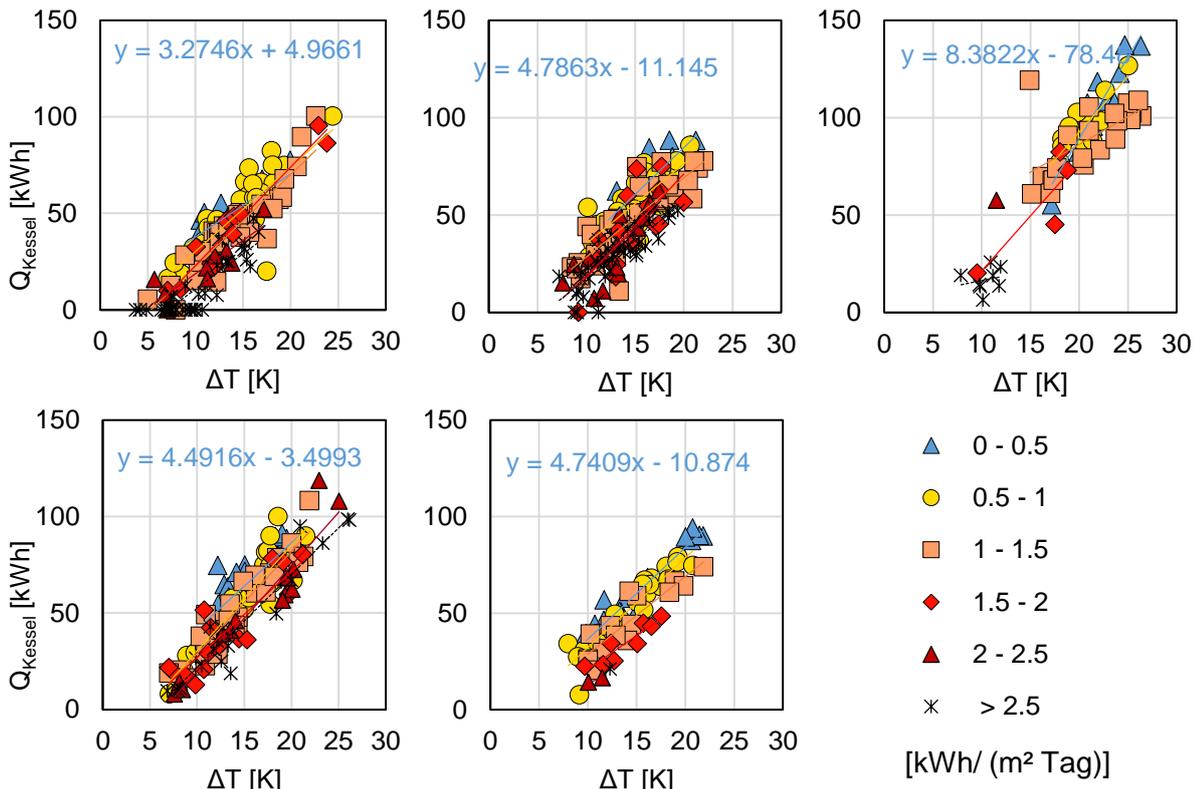


Abb. 7.12 Feldtestgebäude 1 - Von oben links: Periode 1 – 5 Nachheizung mit Pelletskessel über Temperaturdifferenz sortiert nach aufsummierter Strahlung (0-2,5 kWh pro m<sup>2</sup> und Tag)

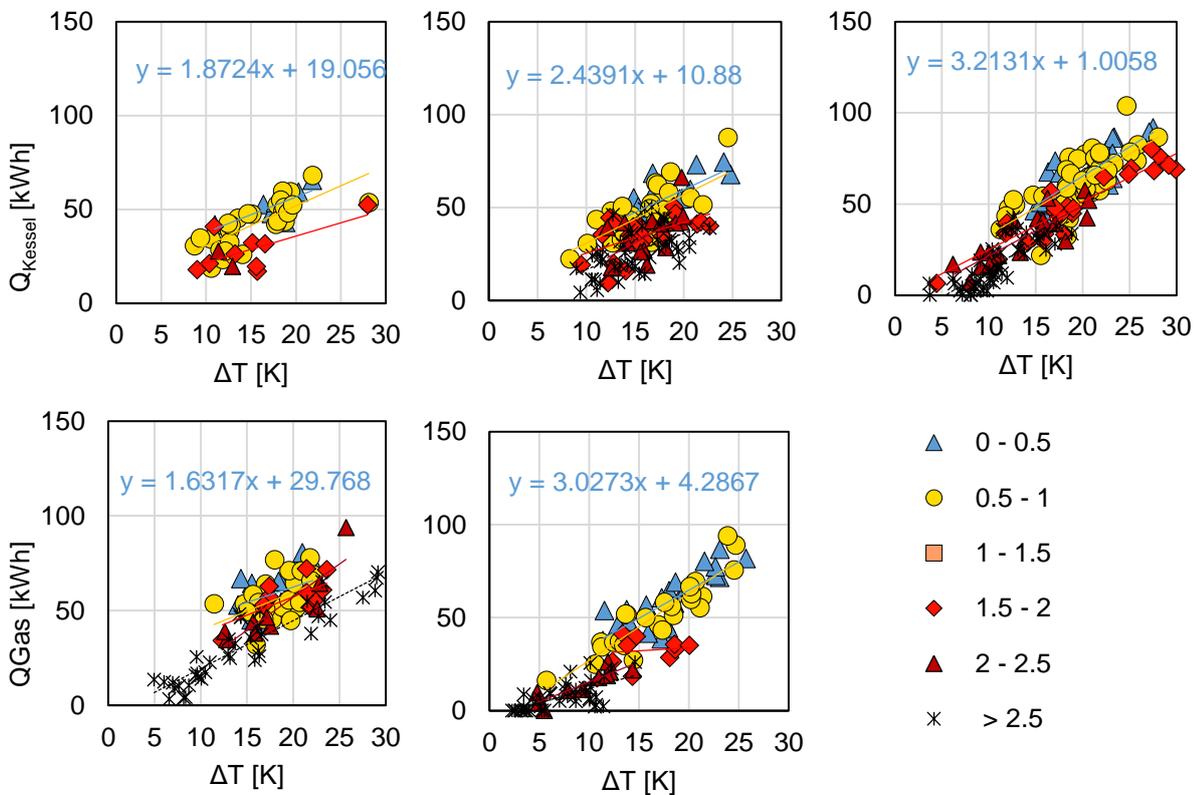


Abb. 7.13 Feldtestgebäude 2 - Von oben links: Periode 1 – 5 Nachheizung mit Gaskessel über Temperaturdifferenz sortiert nach aufsummierter Strahlung (0-2,5 kWh pro m<sup>2</sup> und Tag)

Der zweite Ansatz stellt die Nutzwärme die dem Speicher entnommen wird, der dem Speicher zugeführten Wärme gegenüber. Der Quotient aus nutzbarer Energie  $Q_{\text{Nutz}} (= Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{TW}} + Q_{\text{ZK}})$  und dem

Speicher zugeführten Energie  $Q_{in}(= Q_{Kessel} = Q_{Sol})$  ist ein Indikator dafür, wie viel der erzeugten bzw. in den Speicher eingebrachten Energie tatsächlich für die Deckung des Wärmebedarf entnommen wird (S. Abb. 7.18 und Abb. 7.19).

Ist die Steigung der Ausgleichsgeraden nahezu 1 und geht annähernd durch den Ursprung (s. grau gestrichelte Linie in Abb. 7.18 und Abb. 7.19), so ist dies ein Zeichen für geringe Verluste. Dies gilt aber nur, so lange die Energie noch am gleichen Tag benötigt wird. Übersteigt beispielsweise die solar erzeugte Energie den Tagesbedarf, so wird diese für spätere Tage gespeichert. Dadurch entstehen sowohl Punkte mit sehr viel größerem  $Q_{in}$  als  $Q_{Nutz}$  am Tag der Erzeugung und Punkte mit größerem  $Q_{Nutz}$  als  $Q_{in}$  am Tag der Nutzung. Die Ausgleichsgerade verläuft in diesen Fällen nicht mehr durch den Ursprung. Insbesondere bei der Feldtestanlage 2 (s. Abb. 7.19) ist die Ausgleichsgerade nach rechts verschoben (negativer Ordinaten-Abschnitt).

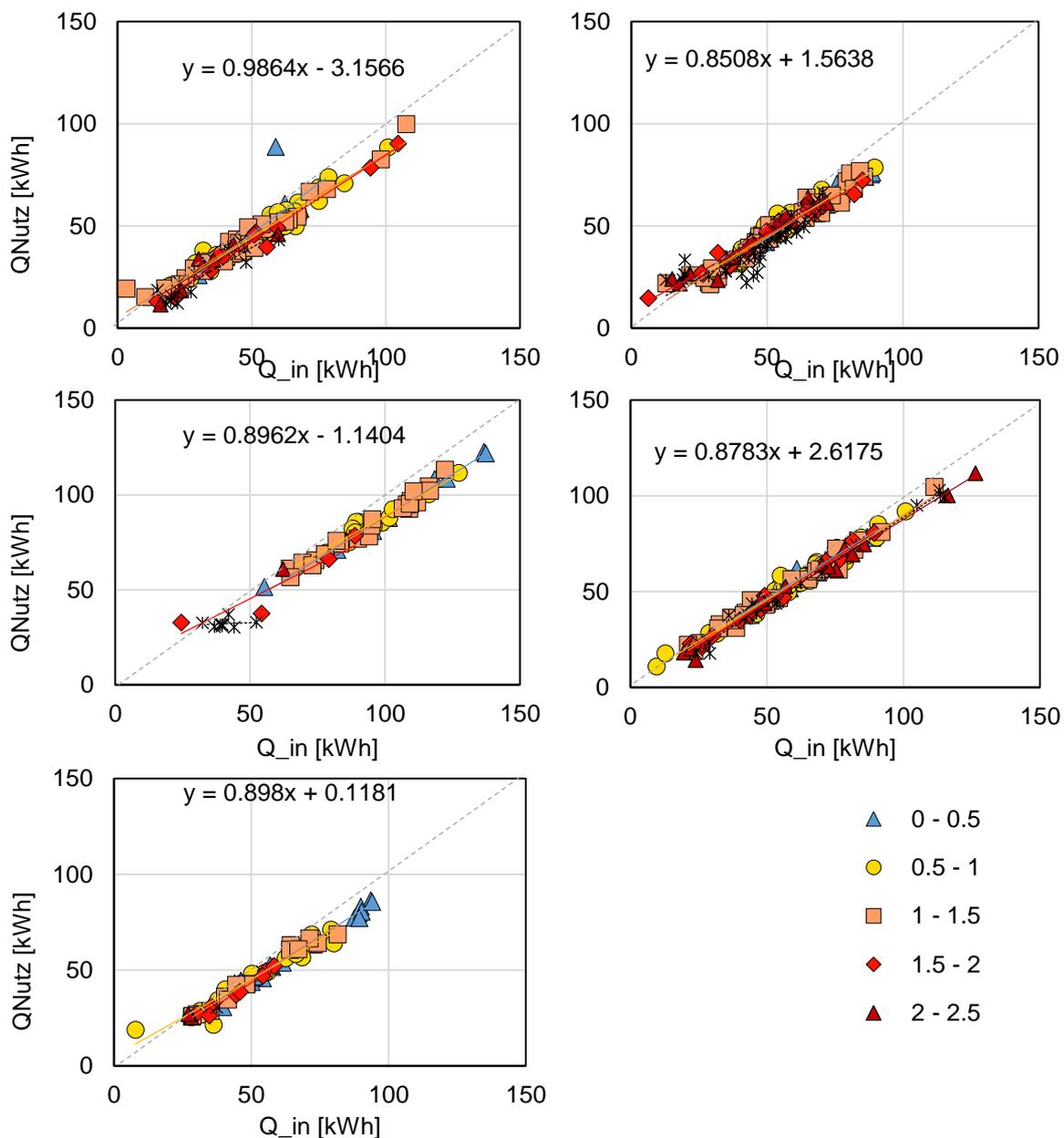


Abb. 7.14 Feldtestgebäude 1 – von oben links nach unten rechts: Periode 1- 5: Nutzenergie ( $Q_{Nutz}$ ) über eingespeicherter Energie ( $Q_{in}$ )

Der negative Ordinaten-Abschnitt (es wird im Schnitt immer mehr eingespeichert als Nutzenergie entnommen wird) ist bedingt durch den Aufbau der Anlage. Im Feldtestgebäude 2 befindet sich, da es bei der Nachrüstung platztechnisch nicht anderes möglich war, die Gastherme im Dachgeschoss und der

Speicher im Keller. Durch Dichteunterschiede, werden vermutlich Inrohr- Konvektion verursacht. Diese Vermutung wird gestützt von auffälligen Volumenströmungen, welche erfasst wurden, während die Kesselpumpe eigentlich ausgeschaltet war (S. Anhang Abb. 9.8.). Außerdem wird stark angenommen, dass die Rückschlagklappe zwischen Solarkreis und Kesselkreis nicht richtig funktionsfähig war und dadurch Rückstöße in den Kesselkreislauf stattfanden, was zu weiteren Energieverlusten führte. Beispiele und eine ausführlichere Erklärung findet sich im Anhang und in Abb. 9.10.

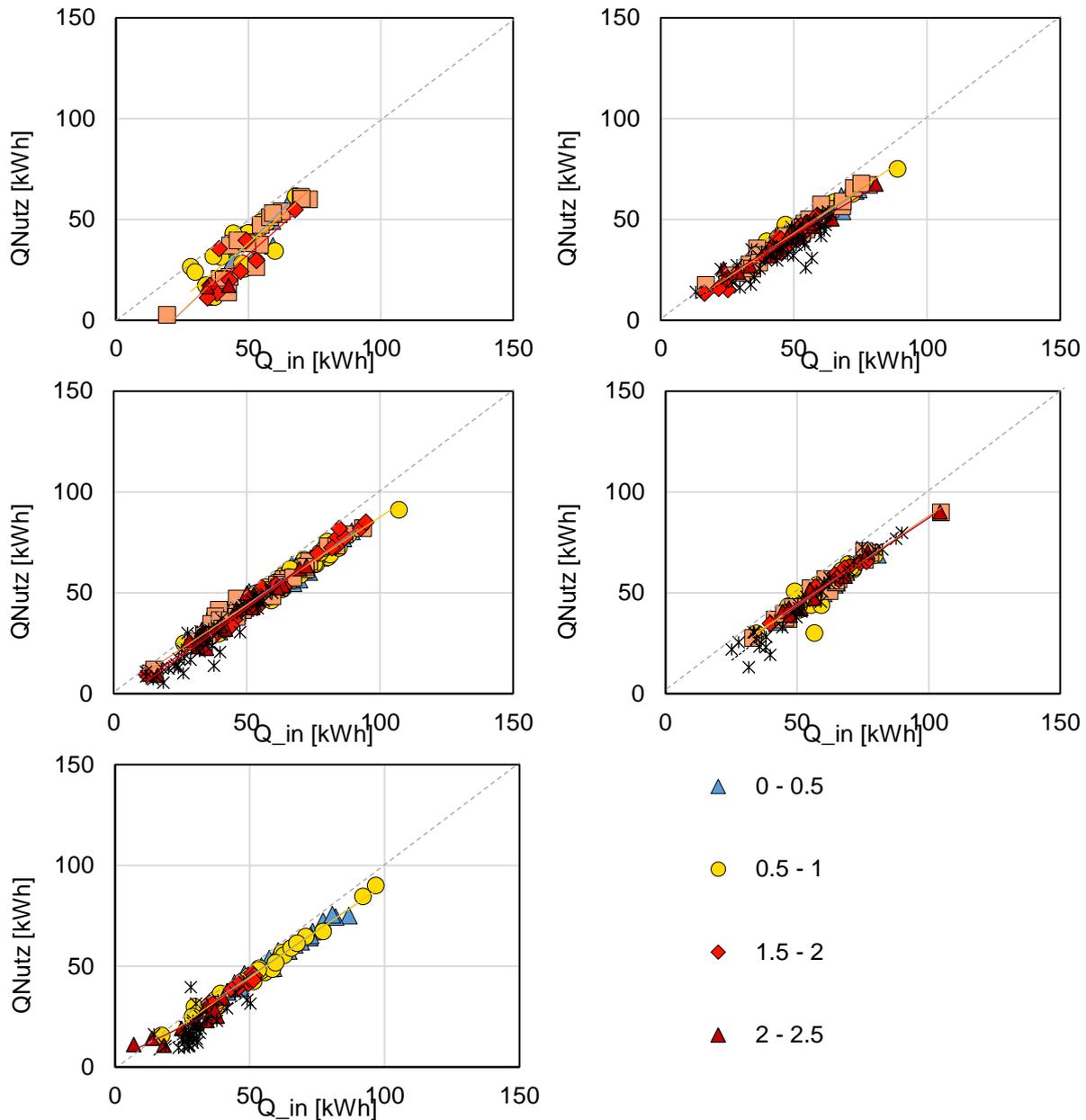


Abb. 7.15 Feldtestgebäude 2 – von oben links nach unten rechts: Periode 1- 5: Nutzenergie ( $Q_{Nutz}$ ) über eingespeicherter Energie ( $Q_{in}$ )

Im dritten Ansatz wird die Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz}} (=Q_{\text{Heiz}}+Q_{\text{TW}}+Q_{\text{ZK}})$  nur der fossil eingebrachten Energie  $Q_{\text{Kessel}}$  gegenübergestellt. Das Verhältnis beschreibt indirekt den Anteil der Solarenergie an der Deckung des Wärmebedarfs. Wenn die Punkte überhalb der Winkelhalbierenden liegen, wurde mehr Wärme entnommen als fossil eingespeist wurde, d.h. die Differenz (inklusive der Wärmeverluste des Speichers) wurde über die Solaranlage bereitgestellt.

Es ist zu erkennen, dass sowohl bei Feldtestgebäude 1 als auch 2 in Periode 3 und 4 anteilig am meisten Tage mehr bzw. ausschließlich (Punkte auf Ordinate) durch Solar erzeugte Energie gedeckt wurden (Vgl. Abb. 7.20 und Abb. 7.21). Außerdem wurde die fossil erzeugte Menge deutlich reduziert (Punktewolke nach links verschoben, größerer Ordinatenabschnitt). Zu beachten ist, dass wie oben erwähnt, die Analyse unscharf ist, da der Effekt durch Wettereinflüsse (höhere Umgebungstemperaturen) in dieser Periode mit beeinflusst wird.

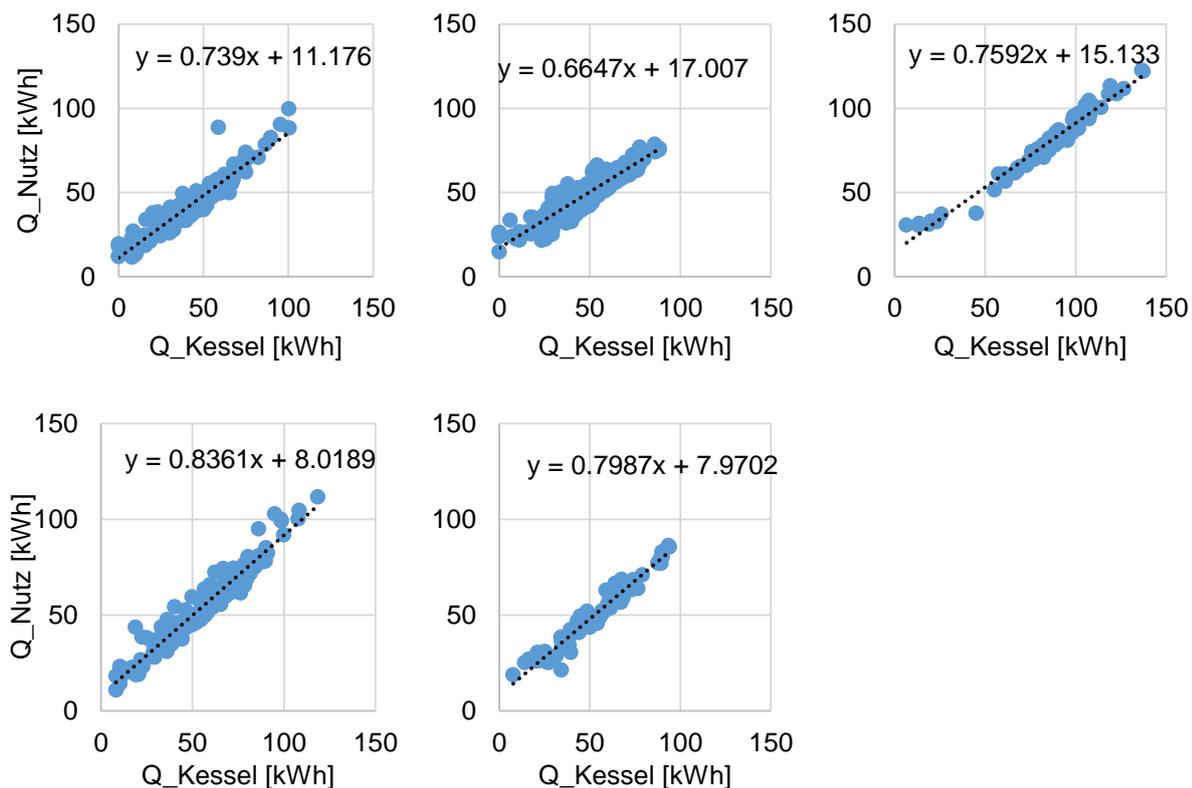


Abb. 7.16 Feldtestgebäude 1 -- Nutzenergie ( $Q_{\text{Nutz}}$ ) über fossil erzeugter Energie ( $Q_{\text{Kessel}}$ )

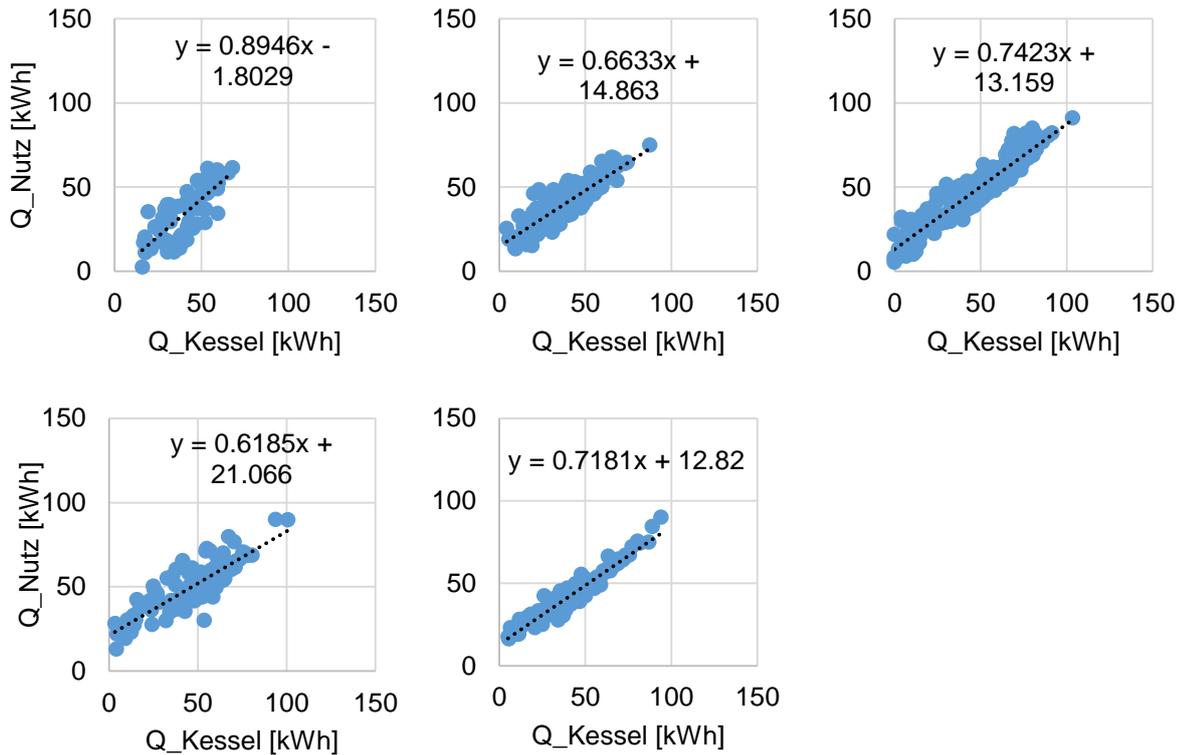


Abb. 7.17 Feldtestgebäude 2 -- Nutzenergie ( $Q_{\text{Nutz}}$ ) über fossil erzeugter Energie ( $Q_{\text{Kessel}}$ )

Schließlich wird im vierten Ansatz direkt das Verhältnis von Solar erzeugter Energie zu genutzter Energie betrachtet. Dieses Verhältnis (Solarer Deckungsanteil  $\text{SolD}$ ) kann größer als 1 werden an Tagen, an denen viel Energie in den Speicher eingespeichert wird. In Abb. 7.22 und Abb. 7.23 ist dieses Verhältnis über der Strahlungssumme des jeweiligen Tages aufgetragen. Insbesondere bei der Feldtestanlage 1 ist zu erkennen, dass bei gleichen Strahlungssummen pro Tag der Anteil an Solarstrahlung deutlich höher liegt mit den Einstellungen in Periode 5 als zu Beginn des Monitorings. Bei der Feldtestanlage 2 (Vgl. Abb. 7.23) ist es nicht ganz so offensichtlich. Dies ist jedoch auch bedingt dadurch, dass die verschiedenen Perioden sehr unterschiedliche Klimabedingungen hatten und die Raumtemperatur zwischenzeitlich durch die Nutzer angehoben wurde, da ihr subjektives Temperaturempfinden es als kälter empfand, wenn die Fußbodenheizung ausgeschaltet war.

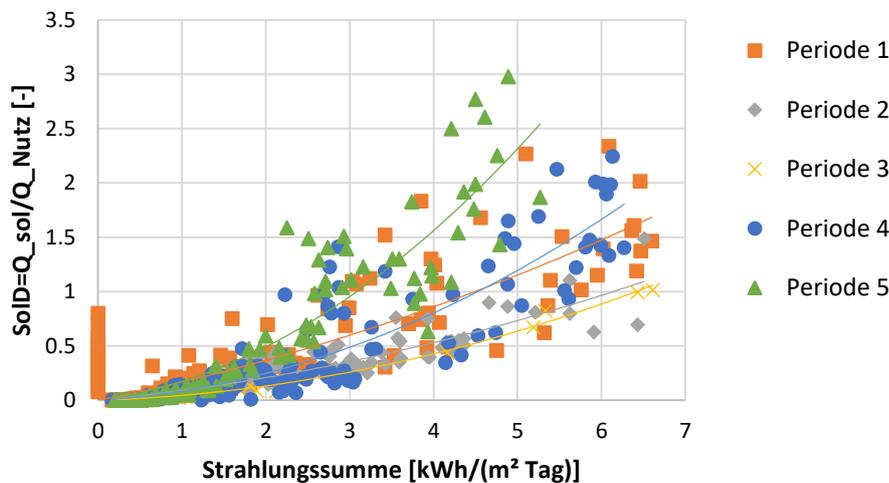


Abb. 7.18 Feldtestanlage 1 - Solarer Deckungsgrad  $\text{SolD}$

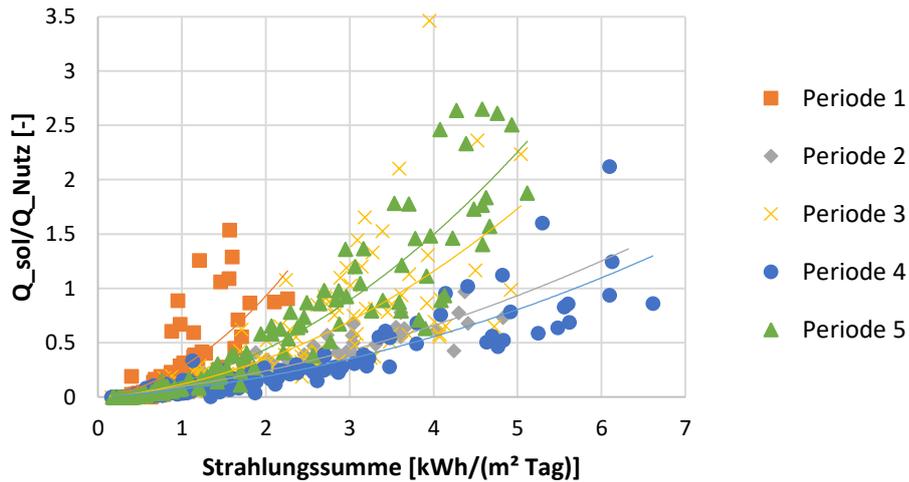


Abb. 7.19 Feldtestanlage 2 - Solarer Deckungsgrad Sold

### Bewertung des Komforts anhand gängiger Bewertungsmethoden

Zur Beurteilung des Komforts in Räumen sind laut DIN EN ISO 7730 grundsätzlich die Bewertungsgrößen „Vorausgesagtes mittleres Votum“ (PMV) und der daraus bestimmte „vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen“ (PPD) geeignet:

„Das *PMV* ist ein Index, der den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand folgender 7-stufiger Klimabeurteilungsskala [siehe Tabelle 7.4] vorhersagt“ [16]

„Das *PMV* sagt die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen voraus, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Einzelne Urteile streuen jedoch um diesen Mittelwert, und es ist nützlich, die Anzahl der Personen voraussagen zu können, die das Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden.“ [16]

„Der *PPD* ist ein Index, der eine quantitative Voraussage des Prozentsatzes der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Personen darstellt, die es als zu kalt oder zu warm empfinden. Für diese Internationale Norm sind unzufriedene Personen solche, die nach der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala in Tabelle 7.4 entweder mit heiß, warm, kühl oder kalt urteilen.“ [16]

Tabelle 7.4 Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala

kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Mit den erhobenen Daten bzw. zukünftig während des Betriebs erhobenen Daten ist eine Bewertung des Komforts mit diesen Größen jedoch nicht möglich. Hierfür werden neben den gemessenen Raumtemperaturen und -feuchten Daten wie mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Oberflächentemperatur der Bekleidung erhoben werden. Zudem müssten Annahmen getroffen werden für Werte wie Bekleidungsisolations, Bekleidungsflächenfaktor, Energieumsatz und wirksame mechanische Leistung.

### Bewertung des Raumklimas anhand der Luftfeuchte

Laut DIN EN 15251 „gelten obere Grenzwerte von 65 % für die relative und 11,5 g/kg für die absolute Feuchte der Luft. Unterhalb des Wertes von 30 % für die relative Feuchte der Luft können gesundheitliche Beeinträchtigungen (z. B. trockene Schleimhäute) und störende, statische Aufladungen auftreten.“ [17]

Insofern kann diese Größe nur bedingt zur Bewertung des Komforts herangezogen werden.

Die relative Feuchte in den Räumen wurde erfasst. In den bewohnten Räumen betrug die Feuchte in der Übergangszeit (Februar bis Mai) im Schnitt zwischen 30 und 55 % relative Feuchte bei Temperaturen von

20 bis 23 °C im Feldtestgebäude 1 bzw. zwischen 22 und 24 °C im Feldtestgebäude 2. Lediglich beim Bad wurde der obere Grenzwert überschritten und kurzzeitig 80 % erreicht, was jedoch zu erwarten ist. Mit den gemessenen Werten werden sowohl die obere Grenze von 65 % als auch die untere Grenze von 30 % eingehalten. In den nicht bewohnten, nicht oder nur teilweise beheizten Räumen wie Keller und Büro wurde die untere Grenze unterschritten. In der Heizperiode wurde die untere Grenze auch in den bewohnten Räumen teilweise unterschritten.

Die relative Feuchte kann mit dem Heizungssystem jedoch nicht beeinflusst werden und hat laut der DIN EN ISO 7730 „Bei gemäßigten Temperaturen (< 26 °C) und bei mäßiger körperlicher Tätigkeit (< 2 met) [...] nur eine geringe Auswirkung auf das Wärmeempfinden“ und somit auf den Komfort. Zudem werde bei einem gemäßigten Umgebungsklima „eine um 10 % höhere relative Luftfeuchte als genauso warm empfunden wie eine um 0,3 °C höhere operative Temperatur“. [16]

### Bewertung des Raumklimas anhand des thermisches Raumklimas (Temperatur)

Eine auf überwiegend Annahmen basierte Bewertung der Behaglichkeit mittels PMV und PPD Werten wurde als nicht zielführend erachtet und der Einfluss der Feuchte als gering eingeschätzt bzw. kann diese sowieso nicht beeinflusst werden. Daher erfolgt die reine Betrachtung in dem Behaglichkeitsbereich aufgrund der Temperatur.

In Abb. 7.24 ist der Bereich der empfohlenen operativen Raumtemperatur wie sie der DIN EN 15251 zu entnehmen ist, gezeigt. Die Komfortraumtemperatur  $T_{Komf}$  ist grau dargestellt. Die Grenzen des Toleranzbereichs von +/-2 K bezogen auf die Komfortraumtemperatur sind rot und blau dargestellt. Bei einer Außentemperatur von unter 16 °C beträgt die 22 °C. Bei einer Außentemperatur über 32 °C beträgt die Komfortraumtemperatur 26 °C. Im Zwischenbereich kann die Komfortraumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur  $T_{Umg}$  mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$T_{Komf} = 18^{\circ}\text{C} + \frac{T_{Umg}}{4}$$

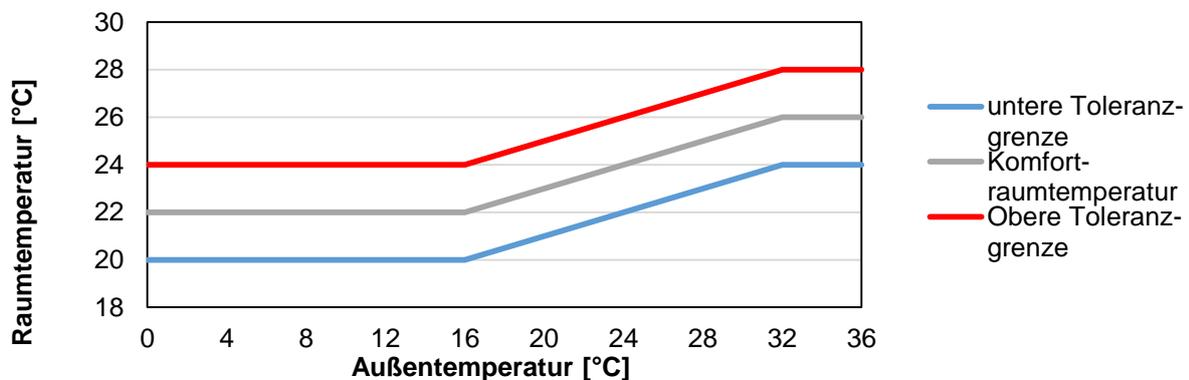


Abb. 7.20 Komfortraumtemperatur (grau) mit zugelassener oberer Toleranzgrenze (rot) und unterer Toleranzgrenze (blau)<sup>9</sup>

Betrachtet wird die mittlere Temperatur des Wohnzimmers, welche bei der konventionellen Heizung als Führungstemperatur verwendet wurde.

Bei Feldtestgebäude 1 (S. Abb. 7.25) befindet sich die Temperatur in dem Toleranzbereich zwischen unterer und oberer Grenze, lediglich in Periode 4 wird die untere Grenze leicht unterschritten. Bei den Einstellungen in Periode 5 ist es jedoch ziemlich nah bei der empfohlenen Komfortraumtemperatur.

<sup>9</sup> Die Toleranzen der angegebenen Verläufe der operativen Raumtemperaturen müssen vom Nutzer durch Anpassung seiner Bekleidung ausgeglichen werden können. Die gezeigten Werte gelten für übliche Bekleidungswiderstände zwischen 0,3 clo und 1,0 clo. Alle Angaben des nationalen Anhangs der DIN 15251 beziehen sich auf Räume, die nur für Wohn- oder Arbeitszwecke genutzt werden, in denen also geringe körperliche Aktivitäten von maximal 1,2 met (metabolisches Äquivalent) zu erwarten sind. Dieser Wert entspricht einer sitzenden Tätigkeit. [17]

Bei Feldtestgebäude 2 (S. Abb. 7.26) ist zu erkennen, dass die mittlere Temperatur zwischen Komfortraumtemperatur und der oberen Toleranzgrenze befindet, die obere Toleranzgrenze jedoch teilweise auch überschreitet. Dies war jedoch von den Bewohnern so gewünscht. Die Bewohner im Feldtestgebäude waren weniger bereit auf ihren Komfort wie z.B. die Fußbodenheizung bzw. – Temperierung zu verzichten.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Heizungsregler in allen fünf Betriebsarten gute Ergebnisse liefert. Im Feldtestgebäude 1 liegen die Wohnraumtemperaturen in einem sehr ausgewogenen Bereich entlang der Komfortraumtemperatur. Sehr schön zu erkennen ist der Effekt der volumenstromgeführten Regelung (Setting Kompromiss Öko/Komfort) in Periode 4. Hier liegen die Raumtemperaturen erkennbar niedriger. Unterschreiten aber nur selten den unteren Komfortbereich. Während Periode 3 (Volumenstromgeführte Regelung Setting Komfort) sind die Raumtemperaturen dagegen erkennbar höher.

Der Vergleich der Situation in den beiden Feldtestgebäuden macht deutlich, dass das Einsparpotential sehr stark von den Gewohnheiten bzw. den Wünschen der Benutzer bzw. deren subjektivem Empfinden abhängt.

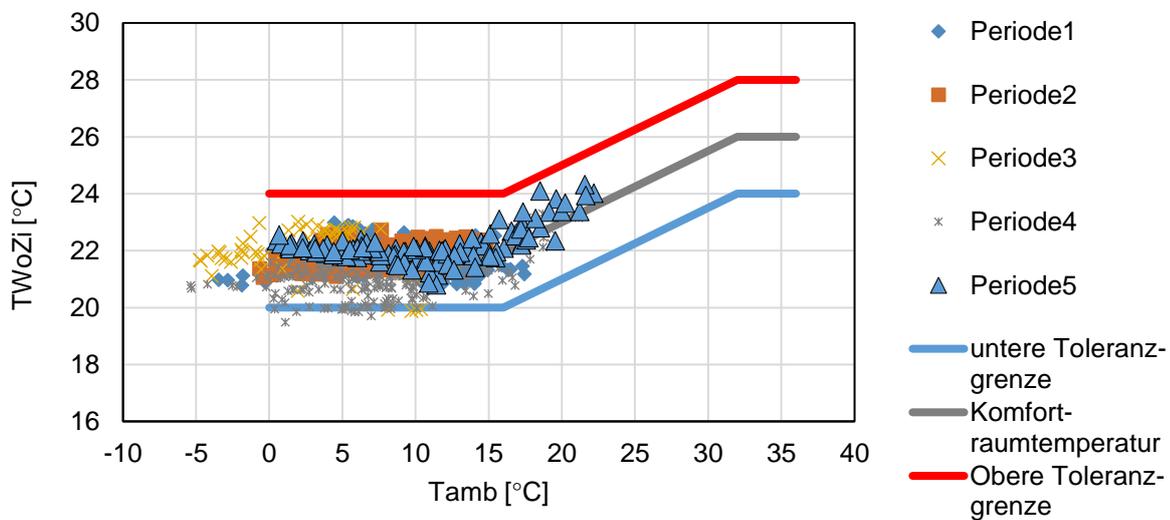


Abb. 7.21 Feldtestgebäude 1: Auftragung der Wohnzimmertemperatur (Führungstemperatur der konventionellen Regelung) über der Außentemperatur

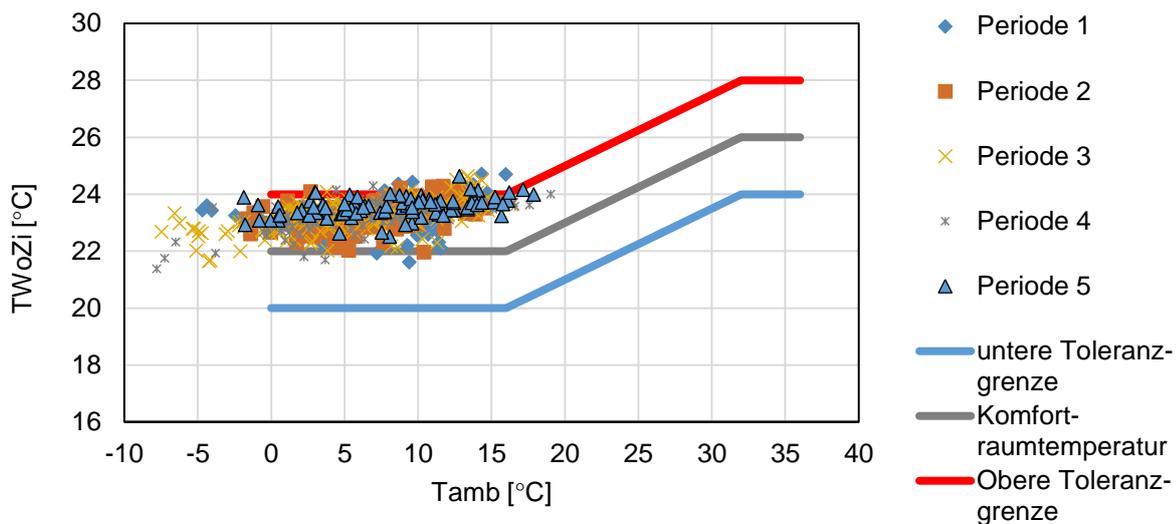


Abb. 7.22 Feldtestgebäude 2: Auftragung der Wohnzimmertemperatur (Führungstemperatur der konventionellen Regelung) über der Außentemperatur

## 7.3 Vereinfachtes Monitoring

Beim vereinfachten Monitoring wird nur die Sensorik des Reglers verwendet. Bei drei Anlagen wurde die Messtechnik um Wärmemengenzähler im Heiz- und Kesselkreis ergänzt, um direkte Vergleichswerte zu erhalten und das Ergebnis der Fühlerkalibrierung direkt bewerten und optimieren zu können. In der folgenden Abbildung ist das vereinfachte Monitoring dargestellt.

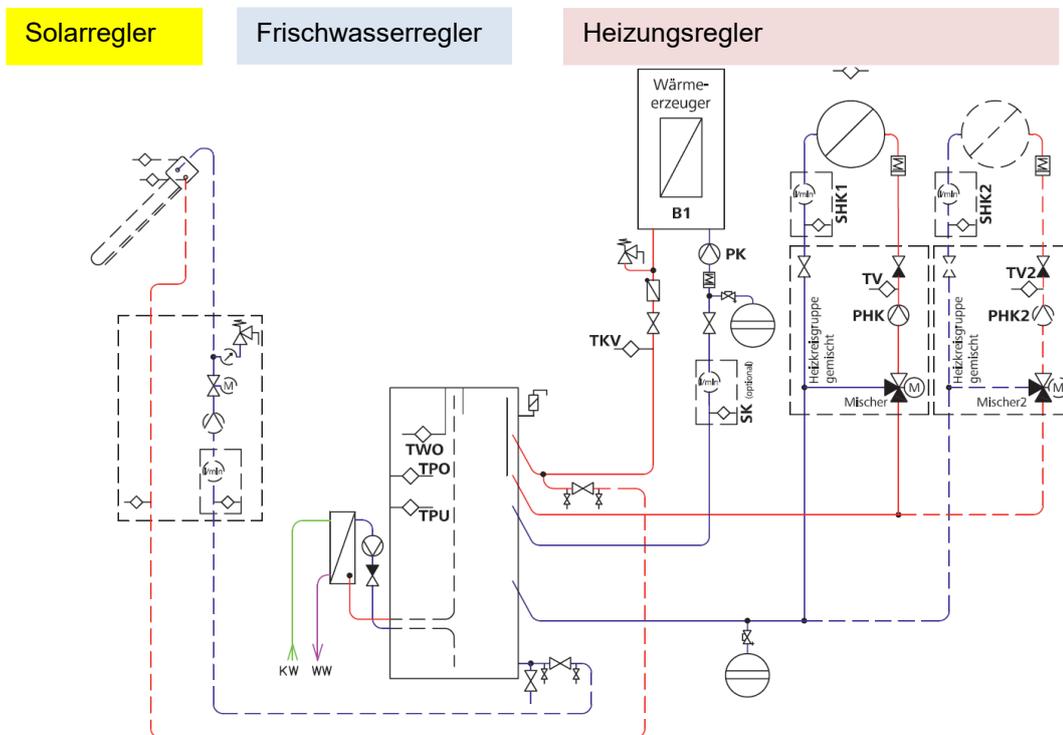


Abb. 7.23 Vereinfachtes Monitoring in einer typischen Feldversuchsanlage

Die Messwerterfassung im Solarkreis erfolgt über den Solarregler, und die der Warmwasserbereitung erfolgt im Frischwasserregler. Beide Regler kommunizieren mit dem Heizungsregler. Die Wärmemengenzählung der externen Regler wird hier nicht näher betrachtet. Die Messdaten des Heizungsreglers werden auf der SD-Karte aufgezeichnet und sind über ein Online Portal einsehbar.

Für das vereinfachte Monitoring werden die folgenden Komponenten verwendet:

**Volumenstrommessung:** Vortextsensor Firma Huba Typ 236 (Sensoren SHK und SK)

- Volumenstrom < 16 l/min Genauigkeit besser als 0,32 l/min
- Volumenstrom > 16 l/min Genauigkeit besser als 2% Messwert

**Temperaturmessung:**

- Temperatursensor PT1000, Genauigkeit Klasse B, Messfehler  $\pm 0.3 \text{ K} \pm 0.005 \cdot \Delta T$
- Regler Genauigkeit  $\pm 0,5 \text{ K}$

Im Regler werden zur Widerstandsmessung Referenzwiderstände mit einer Toleranz von 0.1% eingesetzt. Bei  $1000\Omega$  entspricht dies aber  $\pm 1\Omega$  und damit  $\pm 0.26\text{K}$  pro Kanal und nochmal  $\pm 0.26\text{K}$  für die Referenzwiderstände bei  $0^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$ . In den meisten Fällen wird auf einer Leiterplatte nicht das komplette Toleranzband der Widerstände auftreten, sodass in der Realität eine höhere Genauigkeit erreicht wird. Der mittlere Fehler der Wärmestrommessung wird mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung nach Gauß berechnet:

$$\Delta\dot{Q}(\dot{m}, T_o, T_i) = \sqrt{(c_p(T_o - T_i)\Delta\dot{m})^2 + (\dot{m}c_p\Delta T_o)^2 + (-\dot{m}c_p\Delta T_i)^2} \quad \text{Glg. 5.1}$$

Die relative, mittlere Messabweichung in einem Betriebspunkt wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$\delta\bar{Q}_{rel}(\dot{m}, T_o, T_i) = \frac{\Delta\dot{Q}(\dot{m}, T_o, T_i)}{\dot{Q}(\dot{m}, T_o, T_i)} \quad \text{Glg. 5.2}$$

In der folgenden Abbildung ist der relative Fehler der Wärmemengenzählung für 5 l/min und 30 l/min in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturdifferenz aufgetragen.

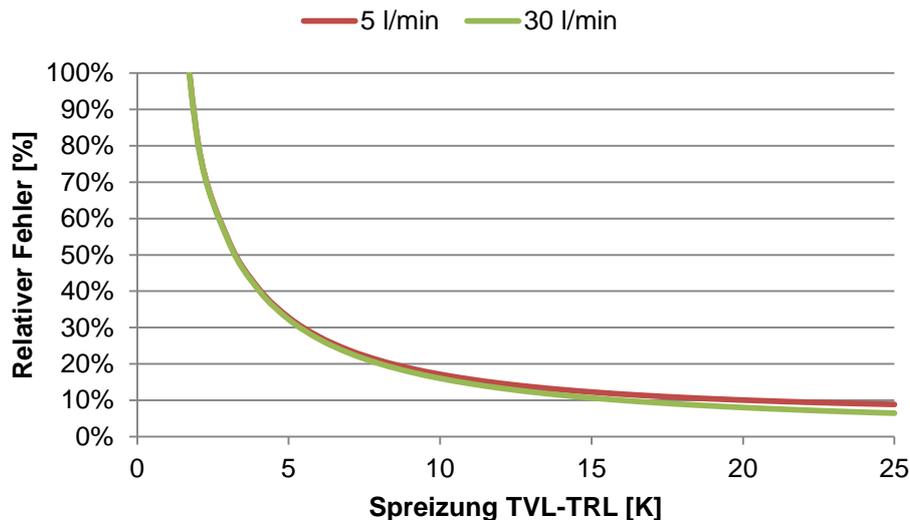


Abb. 7.24 Relativer Fehler der Wärmemengenzählung Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für zwei verschiedene Volumenströme

Es ist deutlich zu sehen, dass der Fehler durch die Volumenstrommessung vergleichsweise gering ist. In Systemen mit Fußbodenheizungen ist die typische Temperaturspreizung 5 - 10 K. Der relative Fehler liegt zwischen 15 % und 20 %. In Systemen mit Radiatorheizung liegt die mittlere Spreizung bei 10 - 20 K. Der relative Fehler liegt zwischen 10 % und 12 %.

In der Praxis kommt es zusätzlich noch zu anlagenspezifischen Messfehlern, vor allem durch schlechten Wärmeübergang von Medium zum Fühler, sowie durch Wärmeverluste aufgrund unzureichender Fühlerisolierung.

### 7.3.1 Verbesserung der Messgenauigkeit im vereinfachten Monitoring

Das in Abschnitt 2.9. beschriebene Messprogramm zur Fühlerkalibrierung im Heizkreis wurde eigentlich zur Verbesserung von anlagenspezifischen Messfehlern und produktionsbedingten dauerhaften Messwertabweichungen der beiden Fühler im Heizkreisvor- und rücklauf erdacht. Es sollten nicht die einzelnen Fühler damit „kalibriert“ werden sondern nur deren Differenz, da diese in die Wärmemengenzählung eingeht.

Bei Vergleichsmessungen des IGTE und auch beim Monitoring von Anlagen mit geeichten Wärmemengenzählern im Heizkreis wurde allerdings festgestellt, dass

- die Messabweichung des im Hubasensor integrierten PT1000-Fühlers unerwartet groß ist und systematisch immer nach oben geht, d.h. der Fühler zeigt immer zuviel an. Eine Nachfrage bei Huba ergab keine Ergebnisse und es muss angenommen werden, dass die Abweichung

bauartbedingt und damit dauerhaft ist (also nicht z.B. nur in einer einmaligen Produktionscharge vorliegt).

- die Messabweichung stark temperaturabhängig ist: Anscheinend sind die Messfehler von Vor – und Rücklauffühler stark unterschiedlich in ihrer Temperaturabhängigkeit, obwohl beides PT1000-Fühler sind: Der Vorlauffühler zeigt eine plausible Temperaturabhängigkeit, d.h. er misst umso weniger im Vergleich zum geeichten Fühler, je höher die Temperatur ist, siehe Abb. 7.29.

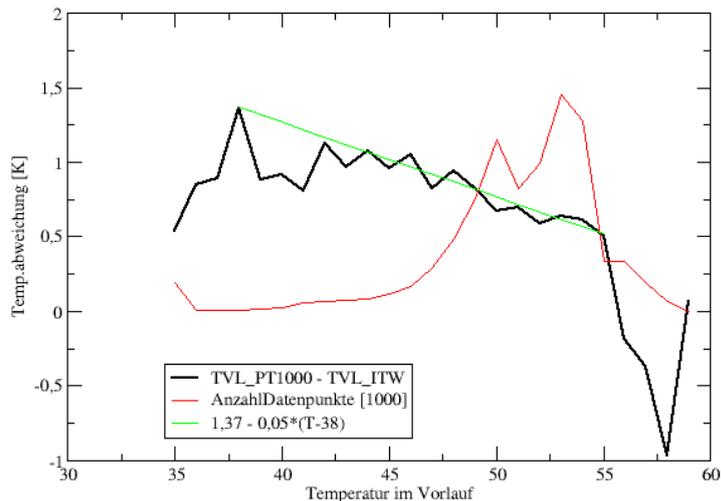


Abb. 7.25 Temperaturabhängigkeit des Messfehlers des Heizkreisvorlauffühlers, ermittelt durch Vergleich mit Institutsmesstechnik in einem der Feldversuchshäuser mit redundanter Messtechnik.

Die Temperaturabhängigkeit entsteht hauptsächlich, da die Fühlertauchhülse Wärme nach außen weggleitet.

Der im Hubasensor integrierte PT1000-Fühler zeigt hingegen praktisch keine Temperaturabhängigkeit, dafür eine hohe dauerhafte Messwertabweichung von meist mehr als 1 K nach oben, siehe Abb. 7.30.

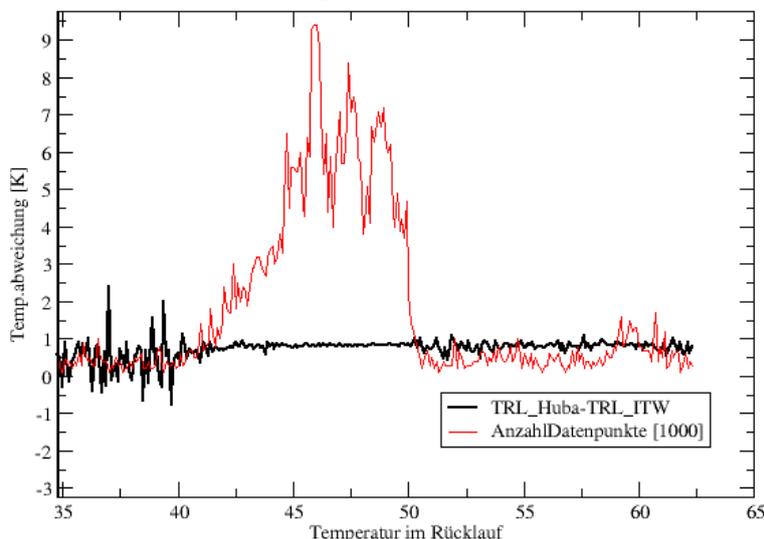


Abb. 7.26 Temperaturabhängigkeit des Messfehlers des Heizkreisrücklauffühlers, ermittelt durch Vergleich mit Institutsmesstechnik in einem der Feldversuchshäuser mit redundanter Messtechnik.

Der Messfehler des im Hubasensor integrierten Heizkreisrücklauffühlers scheint keine Temperaturabhängigkeit aufzuweisen, allerdings einen starken systematischen Fehler.

Daher wurde beschlossen, eine aufwändigere Korrektur zu machen und diese nicht nur für die Wärmemengenzählung zu verwenden sondern direkt auf die Messwerte Vorlauf- und Rücklauftemperatur anzuwenden. Da die in Abschnitt 2.9 beschriebene Kalibrierung die Temperaturabhängigkeit des

Messfehlers nicht ermitteln kann, wird diese mit einer an die Messdaten von 7 Anlagen angefütteten Kalibrierformel gemacht

Es werden folgende Korrekturen gemacht:

- Vom Messwert des Heizkreisrücklauffühlers wird pauschal 1 K abgezogen:  $TRL\_korr = TRL - 1 \text{ K}$ . Der Messwert des Heizkreisvorlauffühlers wird so korrigiert:  $TVL\_korr = TVL - 1 \text{ K} - \Delta\_Mess + 0,2 \text{ K} + (TVL - 35^\circ\text{C}) * 0,025 \text{ K/K}$ , wobei der temperaturabhängige Teil entfällt falls  $TVL < 35^\circ\text{C}$  ist.  $\Delta\_Mess$  ist hierbei die in der Kalibriermessung ermittelte Messwertdifferenz.

Die in der Korrekturformel enthaltene Temperaturabhängigkeit ist mit 0,025 K/K etwas schwächer als die Messdaten andeuten, aber da es nur wenige Messwerte zur Entwicklung der Formel gab und insbesondere der Bereich hoher Temperaturen schlecht repräsentiert war, wurde ein kleinerer Term gewählt um eine Überkorrektur bei hohen Temperaturen zu vermeiden. Denn die Korrektur wird im Regler sofort auf den Messwert angewendet und damit für alle Regel-Aufgaben und auch fürs Logging verwendet, nicht nur für die Wärmemengenzählung.

Die Kalibrierformel muss in der Zukunft an neuen Anlagen überprüft werden, die ebenfalls mit geeichten Wärmemengenzählern ausgestattet sind. Da bisher keine derartigen Anlagen hinzukamen, konnte die Kalibrierformel bisher nur an denselben Anlagen überprüft werden, die schon für den Fit verwendet worden waren. Es wurden die neu hinzukommenden Wärmemengen mit denen des externen Zählers verglichen. Hierbei ergab sich - wenig überraschend – ein nur noch geringer Messfehler von ca. -5 %. Die Wärmemenge wird systematisch leicht unterschätzt, da die Korrektur des Vorlauffühlers bei hohen Temperaturen im Schnitt etwas zu schwach ist.

Auch im Kesselkreis werden Wärmemengen berechnet, daher wurden auch hier die Messfehler der Fühler überprüft. Da der Hubasensor im Kesselkreis vom selben Typ ist wie der im Heizkreis gab es auch hier die systematische Überschätzung der Temperatur. Leider kann im Kesselkreis aber keine Kalibriermessung gemacht werden, da es nicht die Möglichkeit gibt, Vor- und Rücklauffühler direkt hintereinander zu durchströmen wie es im Heizkreis bei geschlossenem Mischer möglich ist. Die thermische Masse des Kessels ist immer dazwischen, zudem können die internen Kesselpumpen oft vom Regler gar nicht angesteuert werden.

Daher wurde der Kesselvorlauffühler (ein direkt am Regler angeschlossener PT1000-Fühler) gar nicht korrigiert und vom Rücklauffühlermesswert wird eine konstante Korrektur von 1,3 K abgezogen. Dies half, bei den drei Anlagen, die einen geeichten Wärmemengenzähler im Kesselkreis hatten, den Messfehler bei der Wärmemengenzählung auf ca. 10% zu drücken und die Rücklauftemperaturen von Hubasensor und externem Messgerät anzugleichen. Hier sollte noch eine bessere Korrektur gemacht werden, sobald es mehr Anlagen mit externen Wärmemengenzählern gibt.

Im Kesselkreis kommt die Problematik hinzu, dass die meisten Anlagen gar keinen Kesselvorlauffühler haben, sondern die vom Kessel selbst über den Bus übermittelten Werte benutzen. Diese scheinen aber eine noch größere Varianz zu haben als die üblichen PT1000-Fühler: Eine Anlage wies eine Abweichung von +1,7 K bis -2,2 K des kesselinternen Vorlauffühlers zum Vorlauf des externen Wärmemengenzählers auf, bei laufendem Kessel. Ein Testkessel zeigte sogar eine Abweichung von 8 K. Daher wird der am Regler angeschlossene Kesselvorlauffühler auch zur Korrektur des internen Kesselvorlauffühlers bei der Sollwertberechnung verwendet, damit der Kessel nicht dauerhaft auf eine viel zu niedrige Vorlauftemperatur regelt.

## 7.4 Erprobung des Reglers im Feld

Der Feldversuch für dieses Projekt begann sehr früh schon mit einer vorläufigen Hardware und der für den volumenstromgeführten Betrieb modifizierten Software des Standard-Heizungsreglers. Der Grund dafür war, dass es nach der Entwicklung der Algorithmen in der Simulation keine Möglichkeit gab, diese wie sonst in einem Testaufbau zu testen. Ein komplettes Gebäude mit vielen Heizkörpern, großer Trägheit und internen Lasten lässt sich nicht einfach nachbauen.

Die Daten der ersten Feldversuchsteilnehmer wurden daher als Grundlage für die Anpassung und Weiterentwicklung der Algorithmen und ihrer Parameter genommen. Es gab daher nicht einen einzigen Feldversuch nach Fertigstellung der Regelung sondern es gab einen Dauer-Feldversuch während des ganzen Projekts, mit fortwährenden Weiterentwicklungen.

Für alle Feldversuch-Anlagen wurde eine Fernüberwachung mit dem hauseigenen System „Webportal“ eingerichtet. Dadurch konnte die Reaktion einer Anlage auf eine Software-Änderung sehr schnell und direkt überprüft werden. Das Webportal zeigt Momentanwerte an, kann aber auch Datensätze aufzeichnen und Diagramme darstellen.

### 7.4.1 Erkenntnisse aus dem Feldversuch bzgl. der Erwartungen der Betreiber

- Der erste Feldversuchsteilnehmer berichtete, dass es im ganzen Haus sehr warm geworden sei, nachdem er auf die volumenstromgeführte Heizung umgestellt hatte. Es stellte sich heraus, dass er seine Thermostatventile bisher nie verwendet hatte, sie waren alle ganz aufgedreht. Stattdessen hatte er viel Mühe darauf verwendet, die Heizkennlinie und die Solltemperaturen so exakt einzustellen, dass die gewünschten Raumtemperaturen ungefähr erreicht wurden, was zuvor einigermaßen funktioniert hatte, da das Haus nur mäßig isoliert war, d.h. der Heizbedarf hing stark von der Außentemperatur ab. Die volumenstromgeführte Heizung funktionierte dann aber sehr zufriedenstellend nachdem die Thermostatventile eingestellt waren.
- Der zweite Feldversuchsteilnehmer hatte seinen Fußbodenheizkreis, der teils ähnlich Räume heizte wie ein Radiatorheizkreis, komplett ohne Heizkreisverteiler und ohne Ventilsteuerung gebaut.
- Es wurde zwar eine Ventilsteuerung nachgerüstet, allerdings stellte er die Raumsolltemperatur sehr hoch ein, während die maximale Vorlauftemperatur auf nur 38°C beschränkt war. So waren die Ventile fast immer ganz auf und die Heizung lief ebenso fast immer mit maximaler Vorlauftemperatur. zeigt den Heizbetrieb mit dieser Anlage. Da es noch einen unterstützenden Radiator-Heizkreis gibt, der teils dieselben Räume heizt und daher nur selten Bedarf hat, wird mit dem Heizungsregler „Ökoko“ immerhin Energie eingespart dadurch dass der fehlende Bedarf in Heizkreis 2 erkannt wird und der Puffersollwert auf den niedrigen Sollwert von Heizkreis 1 beschränkt bleibt.

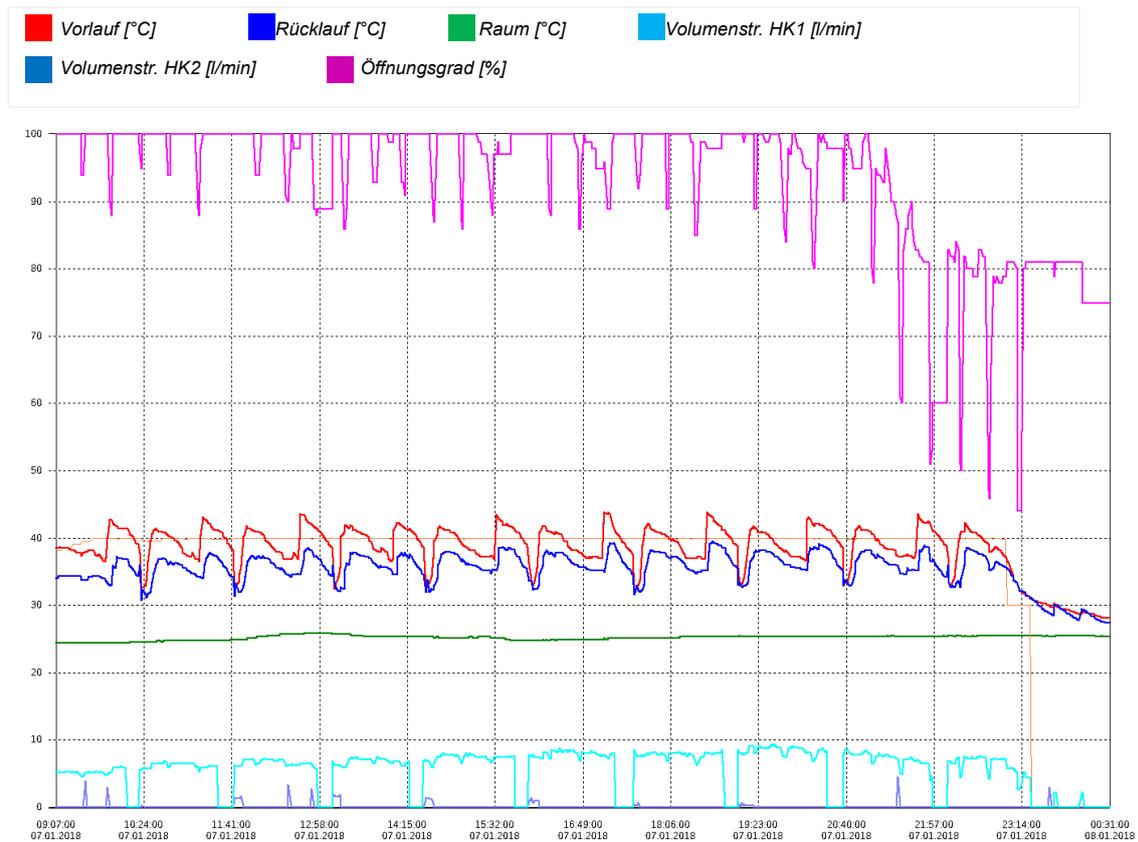


Abb. 7.27 Heizbetrieb im Feldversuch

- Das Einbeziehen eines Raumtemperaturfühlers mit Raumeinfluss führte dazu, dass der Heizkreis wenigstens manchmal abschaltete. Dies war aber vom Betreiber gar nicht gewünscht, da er es gewöhnt war, stets einen warmen Fußboden zu haben. War der Fußboden kalt, ging er von einer Fehlfunktion der Regelung aus, auch wenn der Führungsraum 25°C oder mehr hatte.
- Die Erwartungshaltung, dass in der Heizperiode die Heizkörper ständig warm sein müssten, sonst sei die Heizung defekt, fand sich oft unter den Feldversuchsteilnehmern. Die tatsächliche Raumtemperatur wurde erstaunlich selten abgelesen und als Beweis dafür angesehen, dass die Heizung funktioniert.
- Wenn Feldversuchsteilnehmer die App verwendeten um den Heizbetrieb zu beurteilen, dann stützten sie sich oft nur auf die Höhe der Vorlauftemperatur, um den Energieverbrauch im Heizkreis zu beurteilen. Die tatsächliche Heizkreisleistung wurde selten herangezogen, vermutlich weil sie mit dem bisherigen Regler nicht berechnet werden konnte und die Größe daher noch unvertraut war.
- Die Feldversuchsteilnehmer mussten sich erst daran gewöhnen, dass sie nun die Wärme in den Räumen direkt und nur mit der Einstellung der Thermostatventile beeinflussen konnten. Es war insgesamt aufwändiger als gedacht, das eigentlich recht einfache neue Regelprinzip zu vermitteln, da anscheinend niemand die schriftlichen Erklärungen las. Die Teilnehmer waren entweder wenig interessiert an der Regelung oder es waren Fachleute im Bereich Heizung, die sich aber stark auf ihr Wissen über den von der Einstellung her viel komplizierteren, aber vertrauten alten Heizungsregler stützten. Da sich im Bereich Heizungsregelung über Jahrzehnte hinweg nur sehr wenig geändert hat, muss die Einführung eines ganz neuen Regelprinzips sehr gut vorbereitet werden, damit der neue Regler akzeptiert wird.

### 7.4.2 Technische Erkenntnisse aus dem Feldversuch

- Abb. 7.32 zeigt einen Vergleich der von der volumenstromgeführten Heizung berechneten Vorlauf-Solltemperatur im Heizkreis mit einer aus einer Heizkennlinie berechneten Vorlauf-Solltemperatur. Man sieht dass der Heizbedarf nicht grundsätzlich der Außentemperatur folgt, sondern dass öfters bedarfsgeführte Anpassungen nötig waren.

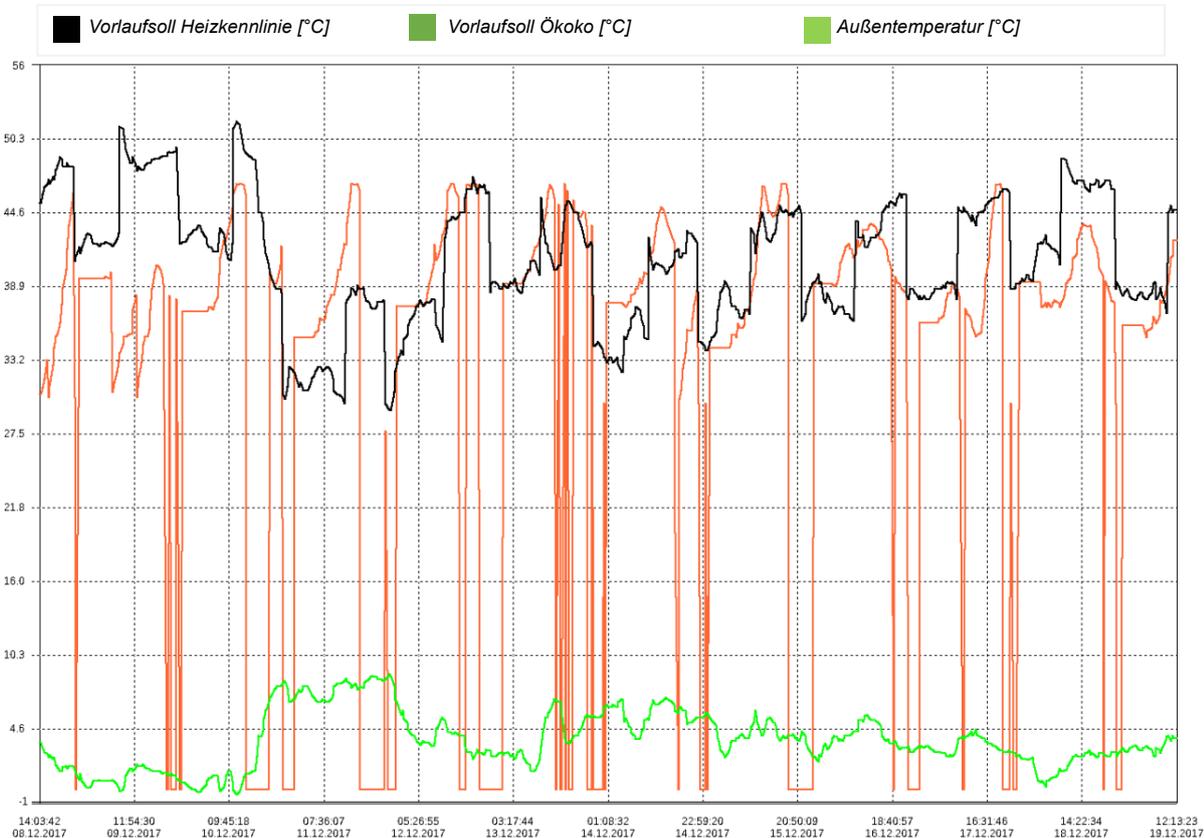


Abb. 7.28 Vergleich Vorlauf-Solltemperaturen von außentemperaturgeführter und volumenstromgeführter Heizung bei einer Feldanlage

- Zuerst war die Prämisse, dass die Heizkörperventilstellung stets der aktuellen Soll-Ist-Differenz der Raumtemperatur entspricht, evtl. mit einer Verzögerung von einigen Minuten. Die PWM-Ventilsteuerungen für Fußbodenheizkreisverteile verhalten sich allerdings grundlegend anders: Sie fahren periodisch auf und zu und erzielen dadurch nur im Mittel über 15-20 min einen Öffnungsgrad, welcher der Soll-Ist-Differenz der Raumtemperatur entspricht.
- Ein Feldversuchsteilnehmer hatte eine zeitprogrammierbare Ventilsteuerung für den ganzen Heizkreis im Einsatz, deren Schaltzeiten aber deutlich abwichen von denen, die sie an der Heizungsregelung eingestellt hatten. Das hat bei der volumenstromgeführten Heizung ein etwas verzögertes Aufheizen nach dem Öffnen der Ventile zur Folge, falls die Schaltzeiten der Heizung vor denen der Ventilsteuerung liegen, denn durch den fehlenden Durchsatz geht die Heizung zunächst in den Antriebs-Betrieb und muss dann durch zyklisches Messen des Durchsatzes erst „mitbekommen“ dass plötzlich wieder hoher Durchsatz möglich ist. Eine derartige Ventilsteuerung ist mit einem modernen Heizungsregler, an dem man Wochenzeitprogramme für bis zu 4 Heizniveaus eingeben kann, im Grunde unnötig.
- Programmierbare Thermostatventile an einzelnen Heizkörpern ergänzen hingegen die volumenstromgeführte Heizung sehr gut, da mit ihnen der zeitlich periodisch wechselnde Heizbedarf in den einzelnen Räumen gut definiert werden kann (z.B. Arbeitszimmer heizen 9-12 Uhr, Kinderzimmer 13-20 Uhr, Wohnzimmer 17-21 Uhr).

- Bei Heizkreisen mit Wandheizungen oder auch gemischten Heizkreisen sollte man den Einsteller „Fußbodenheizung“ setzen, auch wenn man keine PWM-Ventile hat. Denn die Wärmeabgabe einer Flächenheizung steigt erstens viel schneller mit der Oberflächentemperatur an als die einer Radiatorheizung, außerdem ist sie träger, d.h. eine auch nur kurz zu hohe Vorlauftemperatur hat langes Nachheizen zur Folge.
- Eine wertvolle Erkenntnis des Entwicklungsprojekts war, dass die neueren Gasbrennwertkessel mit ihren ab Werk eingebauten Hocheffizienzpumpen im Heizungsregler bisher nicht ausreichend berücksichtigt worden waren: Früher hatte der Kessel keine eingebaute Pumpe eingebaut, sondern die Kesselpumpe wurde bauseits bereitgestellt und an die Heizungsregelung angeschlossen. Jetzt hat der Heizungsregler keinen Einfluss mehr auf die Pumpenregelung, da das PWM-Signalkabel der internen Kesselpumpe nicht aus dem Kessel herausgeführt und an den Heizungsregler angeschlossen werden darf, obwohl dies technisch möglich ist und im Feldversuch erfolgreich getestet wurde. Das Ergebnis bei Puffersystemen oder Systemen mit hydraulischer Weiche ist, dass die Kesselpumpe oft mit zu geringem Volumenstrom läuft und der Kessel deshalb einen Betriebspunkt bei niedriger Leistung findet, an dem er den vorgegebenen Sollwert erreicht. Bei starker Heizlast bleibt aber die Heizkreisvorlauftemperatur deutlich zu niedrig, was von den Betreibern auch durchaus bemerkt wird. Mit dem konventionellen Heizungsregler gab es auch früher schon Beschwerden darüber, die Kessel würden an kalten Tagen nur mit mittlerer Leistung laufen und die Heizung würde deswegen nicht warm genug werden, aber da es nur wenig und unvollständige Aufzeichnungsdaten gab (keine Volumenströme, keine interne Kesselleistung etc.) konnte zuvor keine Lösung gefunden werden.

### **7.4.3 Weiterentwicklungen der Regelung während des Feldversuchs.**

- Die anfangs in der Simulation entwickelten Regel-Algorithmen tendierten grundsätzlich eher zu einem Heizbetrieb mit niedrigen Vorlauftemperaturen und dafür im Ausgleich höheren Volumenstrom. Das war mit Blick auf Besitzer großer heizungsunterstützender Solaranlagen so entwickelt worden. Im Feldversuch gab es aber Reklamationen bzgl. hörbarer Fließgeräusche, daher wurde die Abstimmung wieder geändert zu eher niedrigen Volumenströmen bei gleichzeitig etwas leicht höherer Vorlauftemperatur.
- Die Regelungsalgorithmen wurden im Modus „Fußbodenheizung“ an das Verhalten von PWM-Ventilen angepasst durch Berechnen einer zeitlich gemittelten Ventilöffnung, durch längeres Pumpen im Antriebs-Betrieb und durch eine längere Nachlaufzeit des Heizbetriebs vor Übergang in den Antriebsbetrieb.
- Zu Beginn des Projekts war eine Ansteuerung für die Kesselpumpe der Gasbrennwertkessel entwickelt worden, die sehr gut funktionierte. Als sich herausstellte dass es nicht zulässig ist, das PWM-Signalkabel aus dem Kessel herauszuführen, dass die kesselinterne Pumpenansteuerung aber auch nicht geeignet war für Puffersysteme und solche mit hydraulischer Weiche, wurde die „dynamische Sollwerterhöhung“ entwickelt, um das Problem auf andere Art zu lösen (siehe Kapitel 2.4.7)
- Anfangs war der Einsteller „Öko-Komfort“ definiert worden. Er nimmt Einfluss auf die Sollventilöffnung auf die geregelt wird und auf die Geschwindigkeit, mit welcher die Vorlaufsoltemperatur auf eine Änderung der Ventilöffnung reagiert. Im Feldversuch zeichnete sich ab, dass dieser Einsteller mehr mit der Heizkreishydraulik zu tun hat als mit Ökologie oder Komfort. Er muss höher gewählt werden für einen hydraulisch schlecht abgeglichenen Heizkreis oder einen Heizkreis, in dem öfters mehrere Räume gar nicht beheizt werden sollen, dann aber schnell warm werden sollen sobald jemand die Thermostatventile öffnet. Der Einsteller „Hydrokomfort“ wurde daher umdefiniert und den Betreibern empfohlen ihn einmalig an ihre Anlage anzupassen und ihn dann nicht mehr zu verändern.

#### **7.4.4 Fazit des Feldversuchs**

- Das neue Regelprinzip der „volumenstromgeführten Heizung“ überzeugt und funktioniert.
- Es gibt im Bereich Heizung sehr viele unterschiedliche Komponenten wie verschiedenste Arten von Heizkörperventilen, Pumpen, Kessel mit eigenen Regelungen etc. Zudem gibt es sehr viele unterschiedliche Hydrauliken, Ansichten und Verhaltensweisen im Bereich Heizung. Daher ist die Entwicklung eines neuartigen Heizungsprinzip zeitlich aufwändig und die Regelung muss sehr universell gehalten werden.
- Die Akzeptanz der neuen Regelung hat etwas darunter gelitten, dass anfangs viele Anpassungen gemacht werden mussten, weil es keine andere Testmöglichkeit gab als in echten bewohnten Häusern. Die echten Vorteile der neuen Regelung waren für die Feldversuchsteilnehmer nicht unmittelbar ersichtlich, weil sie selbst nicht die ganzen komplizierten Einstellungen am herkömmlichen Regler machen mussten und auch den Energieverbrauch nicht vergleichen konnten, Zudem war die Bedienmöglichkeit anfangs sehr eingeschränkt, da die endgültige Bedien-App erst gegen Ende des Projektzeitraums fertig wurde.
- Der Einsatz der Volumenstromsensoren ist auch abgesehen vom volumenstromgeführten Heizen ein echtes Plus: Sowohl für die Diagnostik als auch für die Wärmemengenzählung und die Darstellung der Wärmemengen in der App. Auch wenn die Genauigkeit nicht an die eines geeichten Zählers herankommt, verschafft es dem Betreiber einen viel besseren Einblick in das Heizsystem, speziell den tatsächlichen Beitrag der Solaranlage. Diese Transparenz ist die Voraussetzung für eine etwaige Änderung des Nutzerverhaltens.

## 7.5 Erprobung der App im Feld

Das Ziel ist es, die Bedienoberfläche so zu gestalten, dass der Anlagenbetreiber die Informationen über das System leicht aufnehmen kann und bei Bedarf einfach in den Regelbetrieb eingreifen kann.

Nach Abschluss der App-Entwicklung wurden die Nutzer in einer Online-Umfrage zur App befragt. Nachstehend wird eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben. Die kompletten Ergebnisse der Umfrage sind im Anhang 9.1 aufgeführt. Um besseres Feedback zu erhalten und die App auf mehreren Geräten zu testen, wurde die Anzahl der Tester gegenüber dem ursprünglichen Feldversuch erweitert.

### Teilnehmer:

- 22 Teilnehmer, die Ihre Heizung mit der App steuern
- 63 % der Teilnehmer sind über 45 Jahre alt
- 95 % der Teilnehmer sind männlich
- 95 % der Teilnehmer sind neuen Techniken grundsätzlich offen eingestellt
- 68 % der Teilnehmer verwendeten für die Bedienung der App ein Apple Smartphone.

### App Nutzung:

- 64 % der Befragten bedienten den Regler gleichermaßen über das Internet und im Heimnetzwerk. 32 % der Befragten gaben an, den Regler meistens von Zuhause zu bedienen.
- Alle Befragten nutzen die App im Durchschnitt mindestens einmal pro Woche. 32 % gaben an die App mehrmals täglich zu verwenden.
- Die App wird hauptsächlich verwendet um Mess- und Statuswerte abzufragen. Einstellungsänderungen werden eher selten durchgeführt.

*Tabelle 7.5 Nutzung der App (Mehrfachnennungen sind möglich)*

Bewertung	Anzahl	Prozent
Solarertrag abrufen	13	59%
Temperaturen kontrollieren	22	100%
Status Heizungsanlage prüfen	14	64%
Programmwechsel durchführen	4	18%
1x Warmwasser \ 1x Zirkulation	2	9%
Einstellungen ändern	5	23%
Wärmemengen Heizung/Warmwasser etc. abrufen	9	41%
Sonstiges	2	9%

### Nutzerbewertung:

Um Verbesserungspotentiale aufzuzeigen, wurden einzelne Aspekte auf einer Skala von 1-5 bewertet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

*Tabelle 7.6 Zusammenfassung der Bewertungen Skala 1=schlecht 5 =super*

Bewertung	Bewertung [1-5]	Rückmeldungen
Intuitive Bedienbarkeit	3.9	22
Design	3.9	20
Menüstruktur	4	20
Darstellung Energiemengen	3.8	17
Darstellung Heizungssystem	3.8	19
Startbildschirm Solar	4	17
Startbildschirm Heizung	3.9	19
Einstellungsmenü	3.9	18
Hilfetexte	3.9	14
Zeitprogramme	3.2	20
Generelle Weiterempfehlung?	4.2	22

Aus der Bewertung konnte ein klarer Handlungsbedarf bei den Zeitprogrammen festgestellt werden. In der folgenden Abbildung Abb. 7.33 sind diese dargestellt. Expliziert moniert wurde, dass die Zeitprogramme für jeden Tag einzeln eingetragen werden müssen.

Die Umfrage zeigte, dass es bei einem Drittel der Befragten bei der Bedienung des Reglers öfters zu Problemen kam.

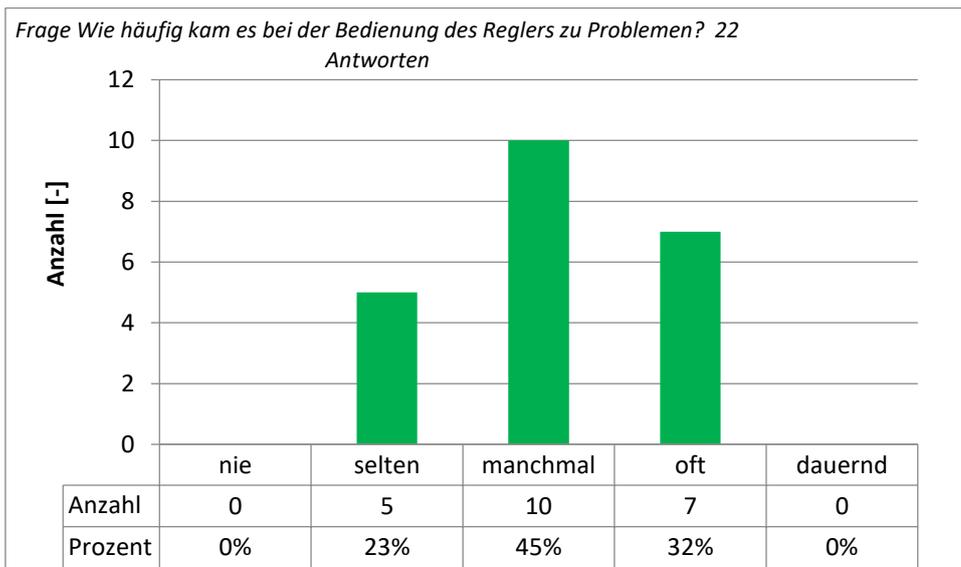


Abb. 7.29 Probleme bei der Bedienung des Reglers

Die häufigen Probleme sind hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass im Feld kein fertiges Produkt getestet, sondern die Entwicklung von einem parallel laufenden Feldversuch begleitet wurde. Vor allem beim Verbindungsaufbau zwischen App und Regler kam es im Feld immer wieder zu Problemen. Für den Übergang in die Serie sind vor allem noch Verbesserungen an der Verbindungsstabilität notwendig. Die App stellt dem Nutzer Informationen zum Energieverbrauch und der Bereitstellung in Form von Balkendiagrammen (vgl. Abb. 5.6) zur Verfügung. Hierdurch soll eine Sensibilisierung und Motivation zum Energiesparen stattfinden. 27 % der Befragten gaben an, dass sich durch die Darstellung der Wärmengen der Umgang mit der Heizenergie verändert hat.

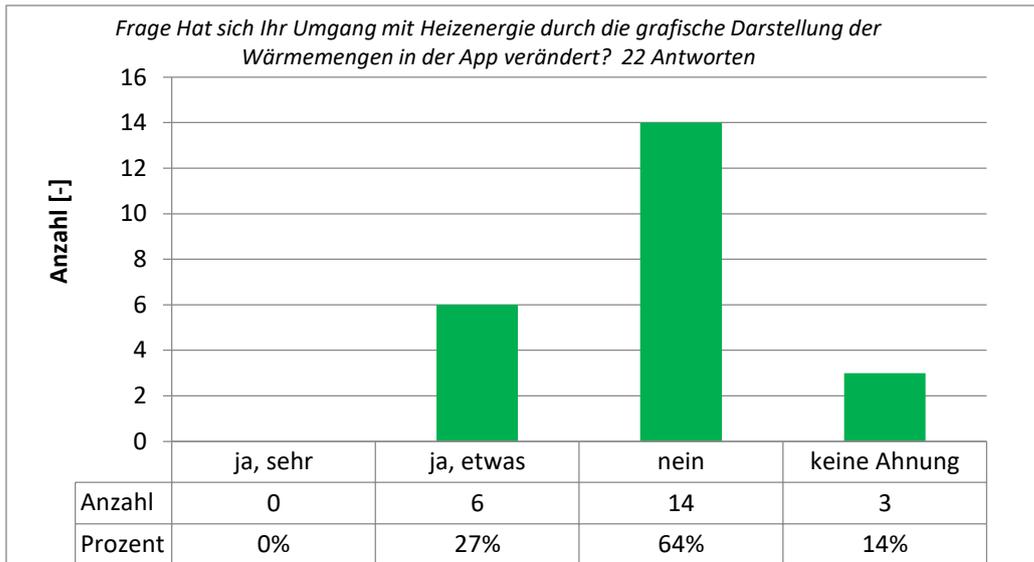


Abb. 7.30 Beeinflussung der Nutzer durch Visualisierung der Wärmemengen

Die meisten Feldversuchsteilnehmer sind bereits sensibilisiert was das Thema Energieverbrauch ihrer Heizung angeht. In der Serie ist mit einer höheren Beeinflussung durch die angezeigten Wärmemengen zu rechnen.

Mehr als ein Drittel der Teilnehmer bezeichnen sich als eher umweltbewusst. 55 % versuchen einen Kompromiss zwischen Umweltschutz und Komfort zu finden.

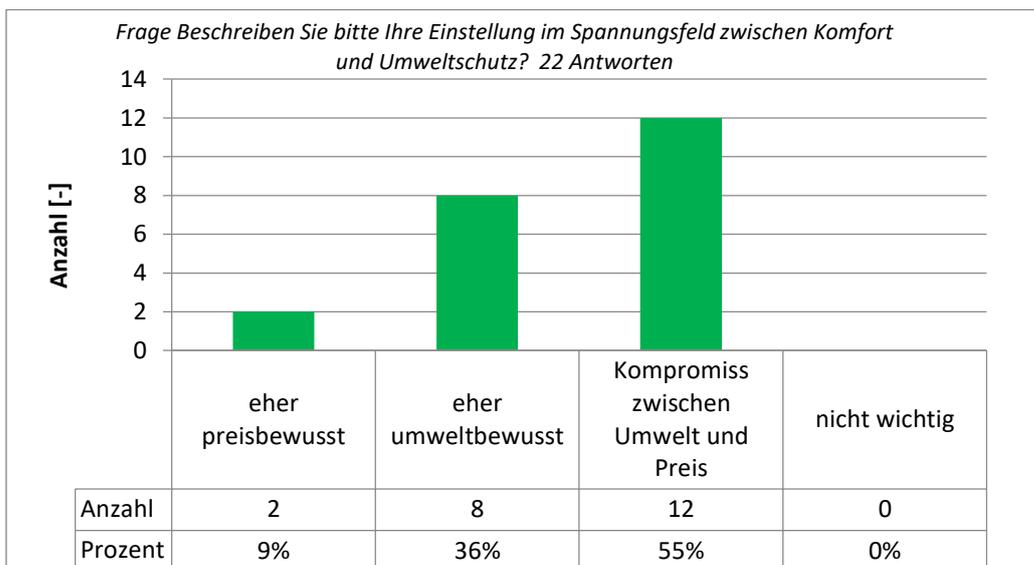


Abb. 7.31 Einstellung der Feldversuchsteilnehmer zur Abwägung zwischen Komfort und Umweltschutz

Über den Einstellparameter „Solarvorrang“ kann eingestellt werden, wie lange die Solaranlage, unter bestimmten Umständen, Vorrang vor dem Kessel erhält (Details siehe Kapitel XY). Bewusst nutzen diese Funktionalität 55 % der Befragten, um den Solarertrag zu erhöhen. Durch die Verzögerung der Nachheizung kann es zu Einschränkungen des Komforts kommen. Eine Unterschreitung der Solltemperatur, zu Beginn der morgendlichen Aufheizphase, ist für die Hälfte der Befragten in Ordnung, wenn dadurch Energie/Geld eingespart werden kann. 36 % ist einer Unterschreitung negativ eingestellt. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Warmwasserkomfort. Dabei würden ca. 55 % der Befragten Einschränkungen in Kauf nehmen.

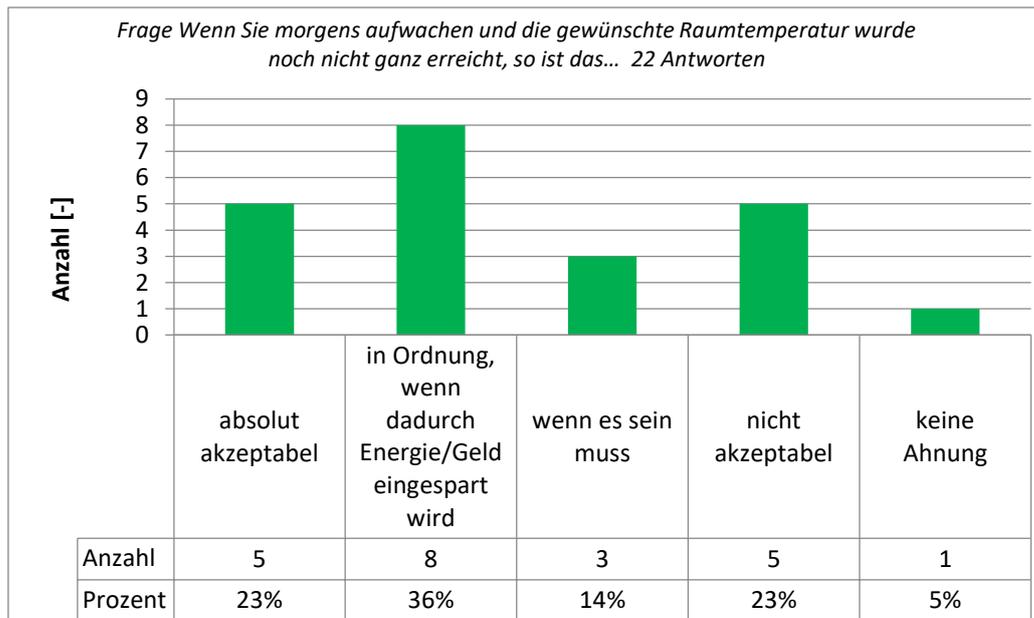


Abb. 7.32 Toleranz gegenüber Sollwertunterschreitungen im Heizbetrieb

Generell zeigt sich dadurch, dass Nutzer dem Regler Freiraum geben möchten Energie einzusparen und dadurch auch eine Abweichung vom regulären Komfortniveau in Kauf nehmen. Jedoch ist es so, dass diese Bereitschaft nicht bei allen Nutzer gleich ausgeprägt. Es ist daher notwendig, diese Funktionen aktivieren und deaktivieren zu können.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] B. f. W. u. E. (BMWi), „Energieeffizienz in Zahlen 2018,“ [Online]. Available: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=12) . [Zugriff am 01 05 2019].
- [2] B. f. W. u. E. (BMWi), „Erneuerbare Energien in Zahlen 2017,“ [Online]. Available: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=27](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=27) . [Zugriff am 02 05 2019].
- [3] B. F. W. U. ENERGIE, „Energieeffizienzstrategie Gebäude (Langfassung),“ 2015. [Online]. Available: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=25](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile&v=25). [Zugriff am 05 06 2019].
- [4] statista, 23 Mai 2019. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>.
- [5] F. i. A. Fischetti, „Transparente Werte beeinflussen Nutzer,“ Sanitär Heizung Klima, August 2016.
- [6] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Eichanweisung für Wärmezähler, Wien: Amtsblatt f. d. Eichwesen, 1999.
- [7] Prüfbericht Trinkwarmwasserspeichers Aqua300.
- [8] Marani G. S.p.A., Prüfbericht Warmwasserspeicher Bestimmung des Bereitschaftswärmeaufwandes nach EN 12897, Bovolone (VR) , 2006.
- [9] M. H. F. Bitkom, Smartphone-Markt: Konjunktur und Trends, Berlin: Bitkom, 2018.
- [10] opensignal, „ANDROID FRAGMENTATION VISUALIZED (AUGUST 2015),“ August 2015. [Online]. Available: [https://www.opensignal.com/sites/opensignal-com/files/data/reports/global/data-2015-08/2015\\_08\\_fragmentation\\_report.pdf](https://www.opensignal.com/sites/opensignal-com/files/data/reports/global/data-2015-08/2015_08_fragmentation_report.pdf). [Zugriff am 10 Juni 2019].
- [11] C. Wittwer, „ColSim - Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen,“ Dissertation Universität Karlsruhe, 1999.

- [12] W. Hube, Prädiktive Wärmeflussregelung solaroptimierter Wohngebäude mit neuartigem Verschattungs- und Speichersystemen –thermische Simulation komplexer Gebäude-, Kaiserslautern: Dissertation Universität Kaiserslautern, 2004.
- [13] C. Wittwer und W. Hube, „Betrachtungen zur Heizkennlinie eines Niedrigenergie Mehrfamilienhaus und CoSim-Erweiterung zur Untersuchung integraler Regelungen zur Wärmeversorgung,“ in Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 2001.
- [14] S. A. T. „ W. T. V. B. P. F. William H. Press, Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [15] C. Kettner, „Vergleich verschiedener Kollektormodelle,“ Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH, Karlsbad, 2003.
- [16] DIN EN ISO 7730, 2007. Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:20. 2007.
- [17] DIN EN 15251:2012-12, 2012. Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. 2012.
- [18] B. f. W. u. Ausfuhrkontrolle, „Heizungsoptimierung,“ [Online]. Available: [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Heizungsoptimierung/heizungsoptimierung\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Heizungsoptimierung/heizungsoptimierung_node.html). [Zugriff am 05 06 2019].
- [19] B. F. W. U. ENERGIE, „Klimaschutz in Zahlen Sektorenziele,“ [Online]. Available: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutz\\_in\\_zahlen\\_sektorenziele2030\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_in_zahlen_sektorenziele2030_bf.pdf). [Zugriff am 05 06 2019].
- [20] Statista Research Department, „<https://de.statista.com>,“ 2016. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/209449/umfrage/altersstruktur-von-oel-und-gasheizungen-in-deutschland/>. [Zugriff am 20 05 2019].

## 9 Anhang

### 9.1 Weitere Anlagenhydrauliken

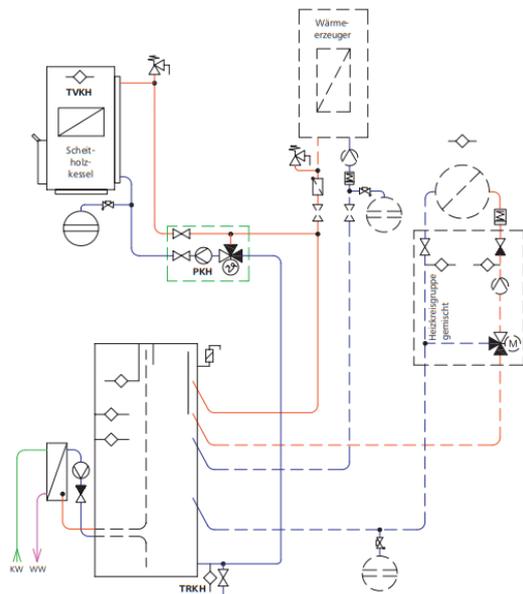


Abb. 9.1 Anlagenhydraulik Kombispeicher mit Scheitholzkessel (links oben), Kombispeicher mit Frischwasserstation (links unten), Wärmeerzeuger und gemischter Heizkreise (rechts)

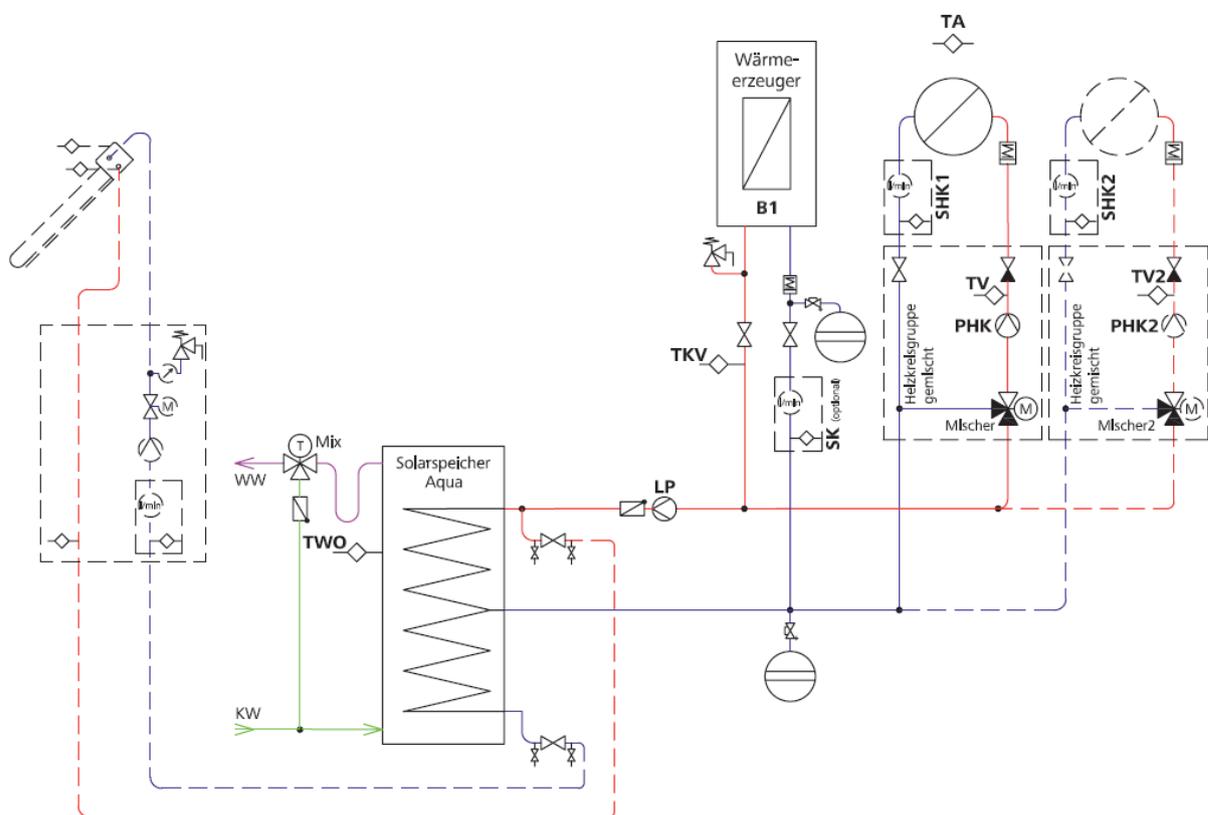


Abb. 9.2 Anlagenhydraulik: Thermische Solaranlage (links), Warmwasserspeicher mit Ladepumpe (mittig), Wärmeerzeuger und zwei gemischte Heizkreise (rechts)

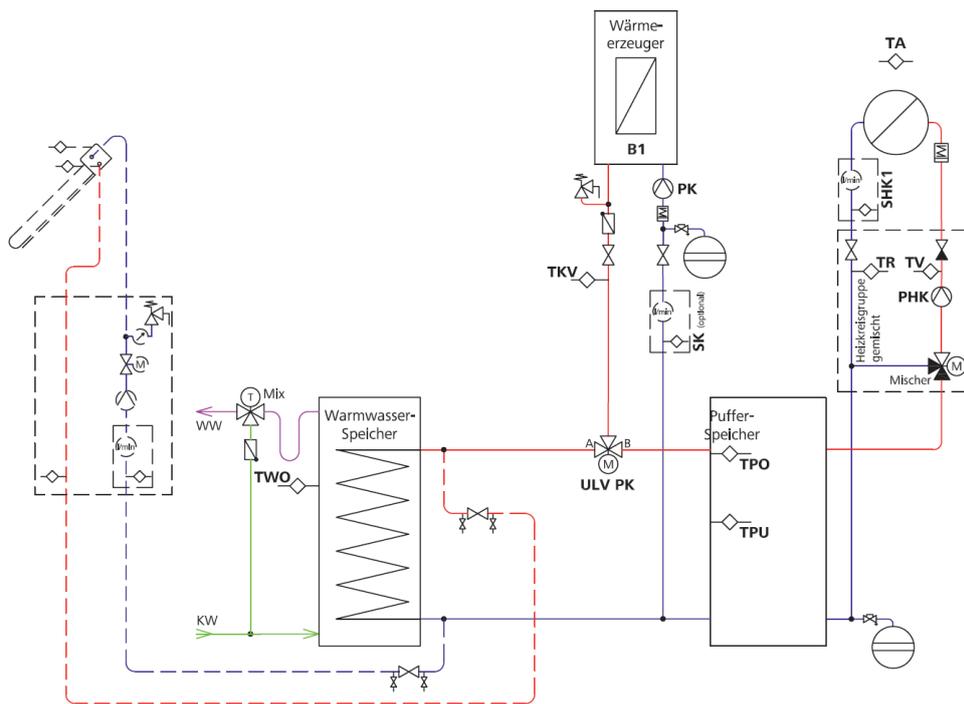


Abb. 9.3 Anlagenhydraulik Umlenventil: Thermische Solaranlage (links), Warmwasserspeicher mit Umlenventil (mittig), Wärmeerzeuger, Pufferspeicher und zwei gemischte Heizkreise (rechts)

## 9.2 Weitere Auftragungen zur Bewertung

Weitere Auftragungen, welche nicht weiter im Detail diskutiert sind, welche jedoch die Aussage unterstützen, dass die Regelung funktioniert sind im Folgenden dargestellt.

### 9.2.1 Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Temperaturdifferenz

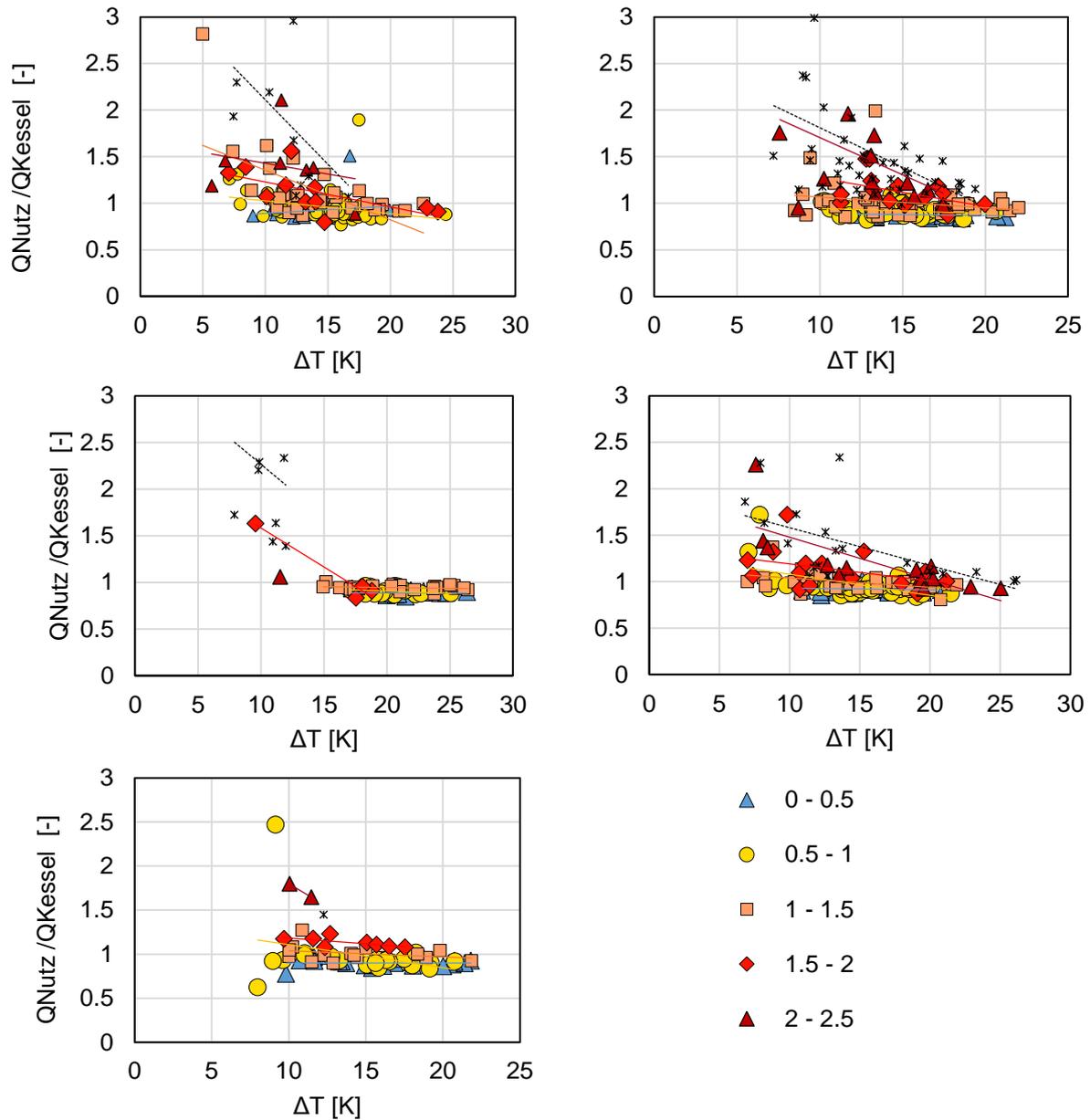


Abb. 9.4: Feldtestgebäude 1 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Heizraumtemperatur und mittlerer Speichertemperatur<sup>10</sup>

<sup>10</sup>  $\Delta T = T_{\text{HR}} - T_{\text{Sp,m}}$

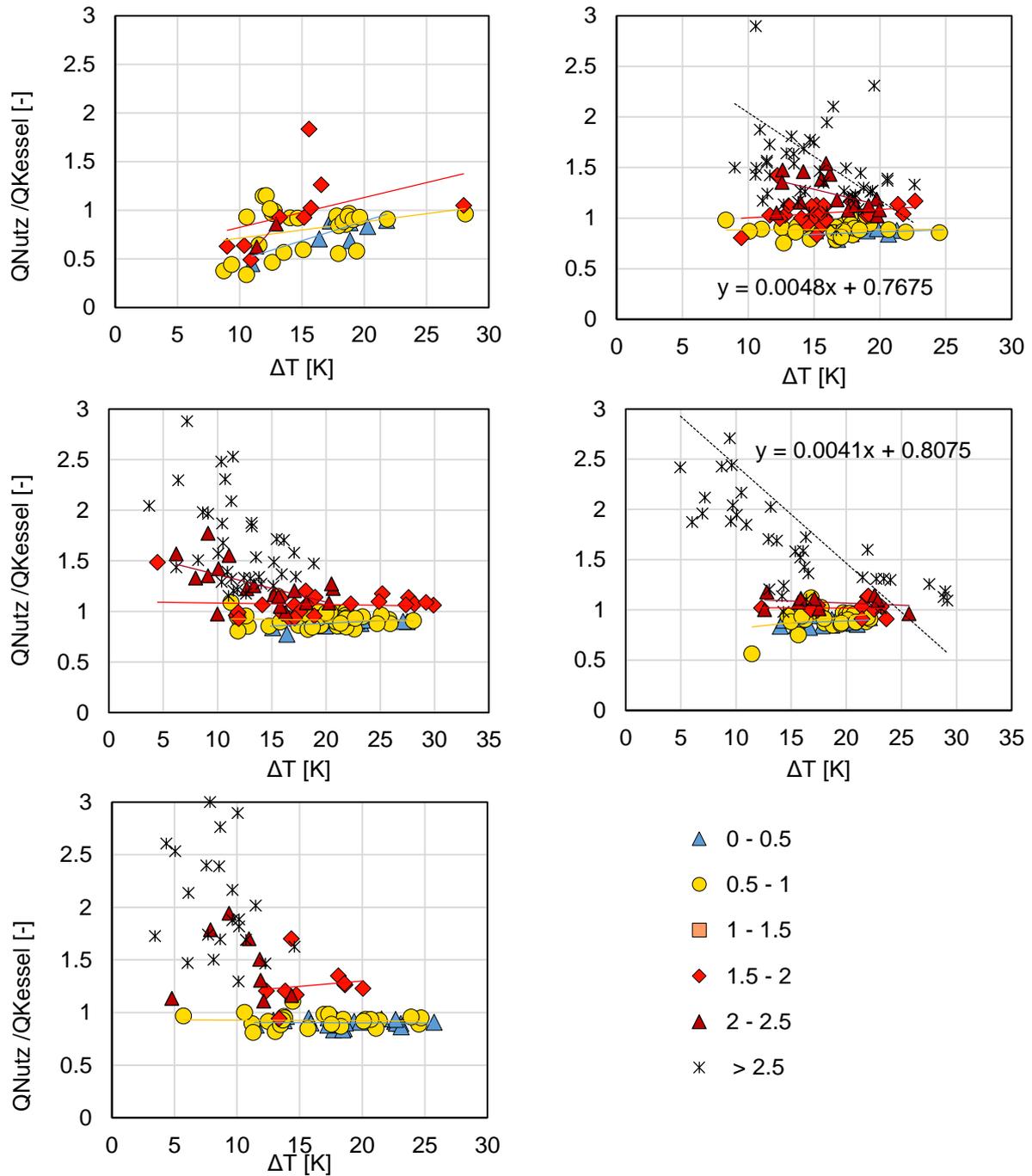


Abb. 9.5 Feldtestgebäude 2 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Heizraumtemperatur und mittlerer Speichertemperatur

**9.2.2 Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Strahlungssumme**

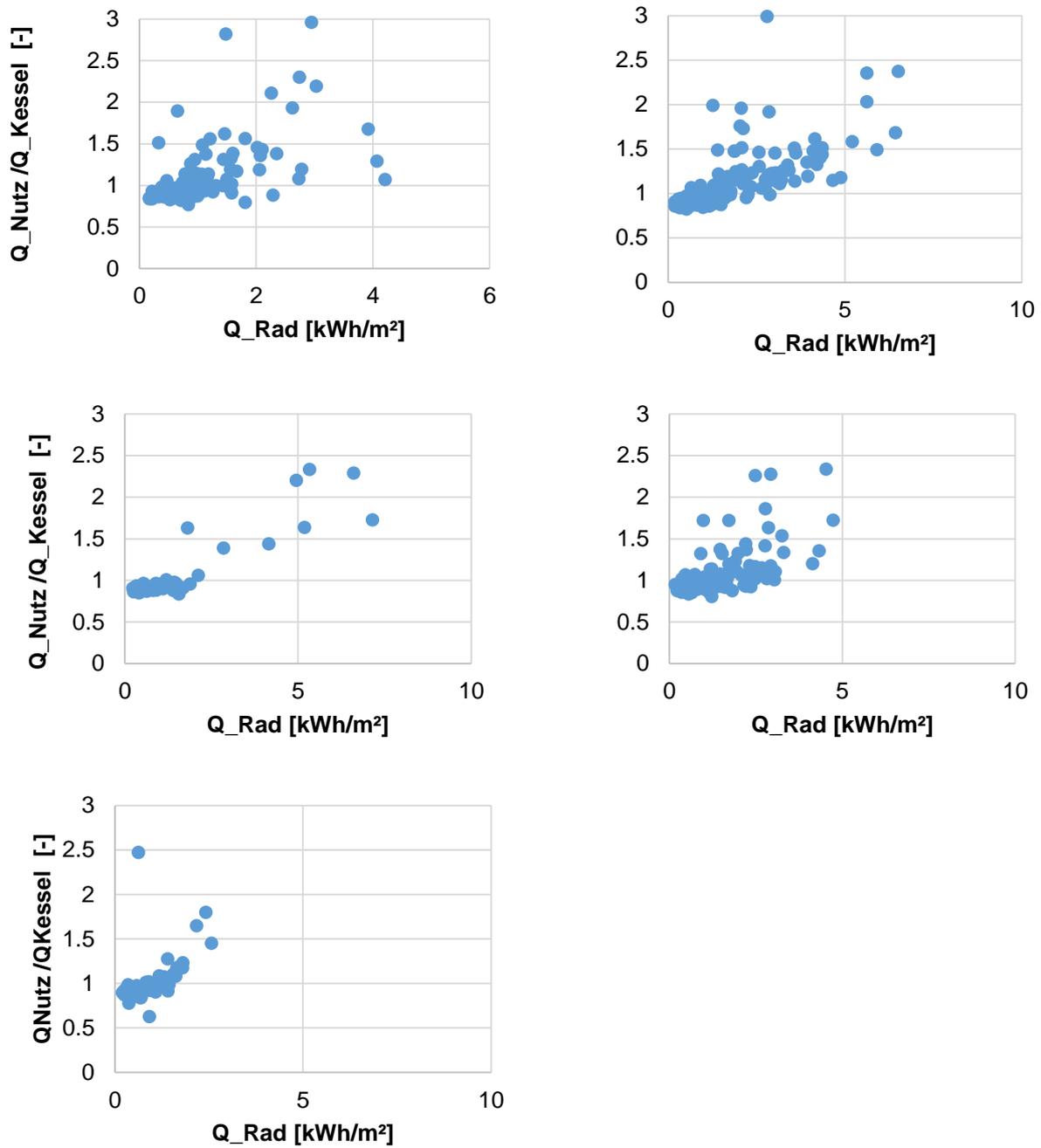


Abb. 9.6: Feldtestgebäude 1 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Tagesstrahlungssumme

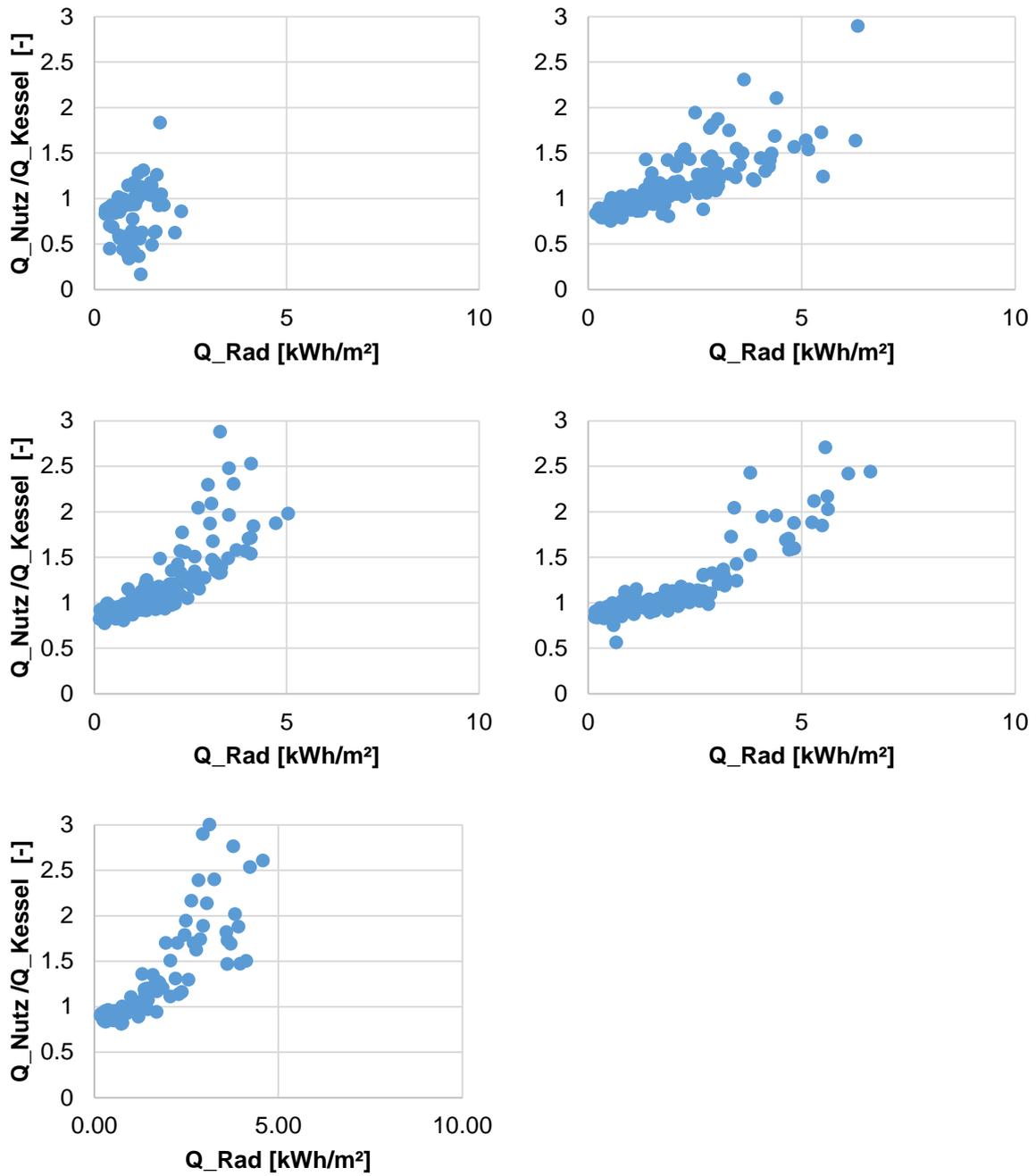


Abb. 9.7: Feldtestgebäude 2 - Quotient von Nutzenergie zu Kesselenergie über Tagesstrahlungssumme

### 9.3 Energieverluste bei Feldtestanlage 2

#### 9.3.1 Energieverluste durch Inrohr-Zirkulation

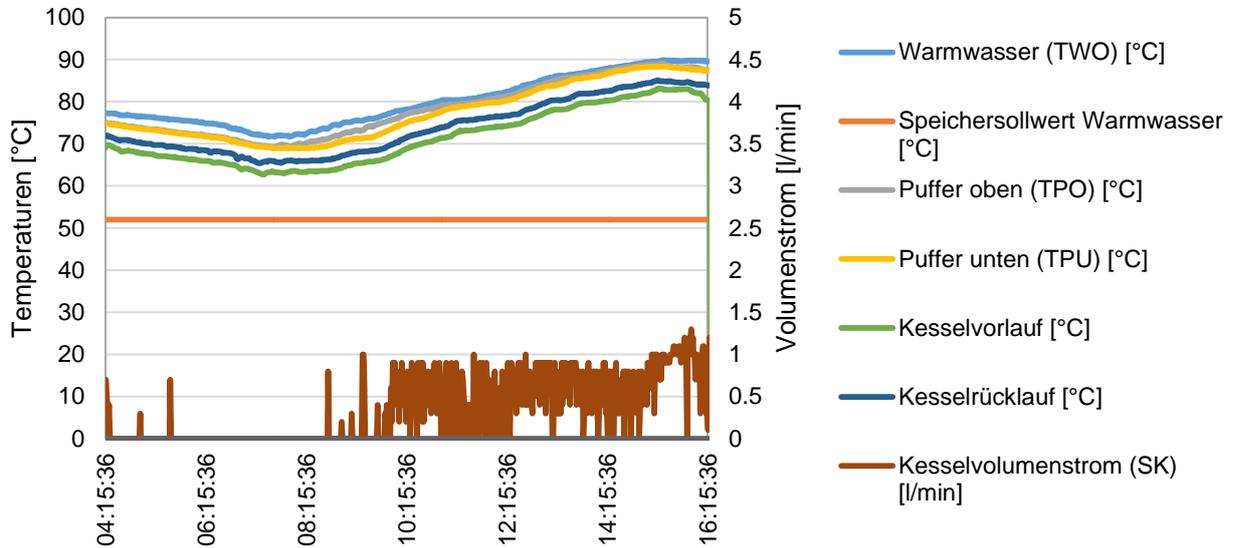


Abb. 9.8: Beispiel von Zirkulationsströmen im Rohr (braune Kurve) bei ausgeschalteter Kesselkreispumpe

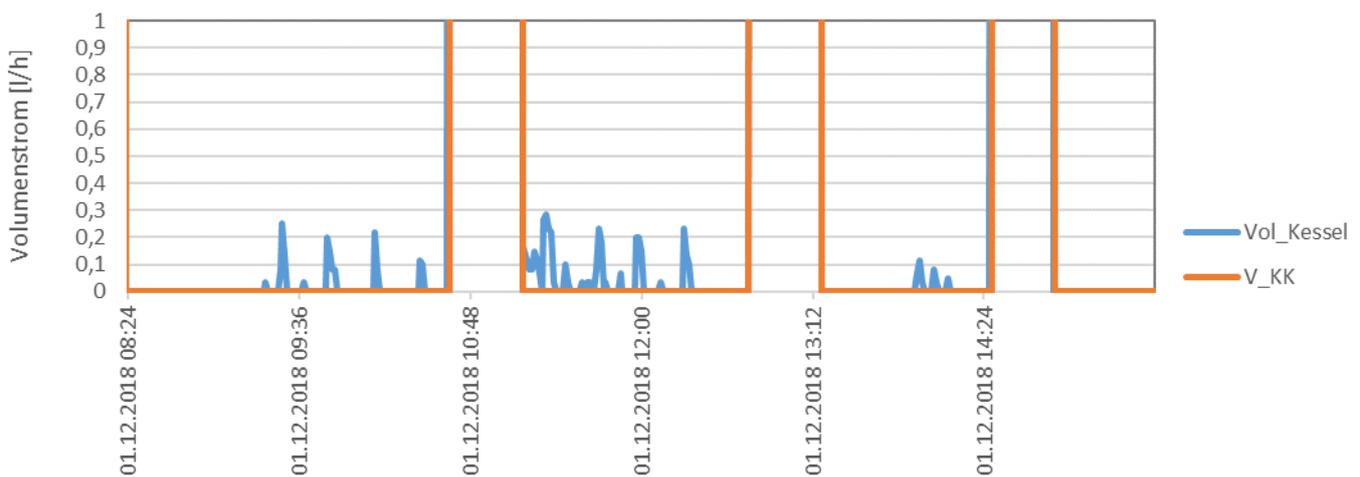


Abb. 9.9: Beispiel von Zirkulationsströmen im Rohr (blaue Kurve) bei ausgeschalteter Kesselkreispumpe, welche vom Sensor von REUT (orangene Kurve) nicht erfasst wird.

### 9.3.2 Energieverluste durch defekte Rückschlagklappe

Es wurde beobachtet, dass die Kesseltemperatur sich kurzzeitig an die der Solaranlage angleicht und dann wieder auskühlt, da der Kessel weniger gut gedämmt ist als der Speicher. Da der Solarkreis und der Kesselkreis sich einen Anschluss (Vorlauf) an den Speicher teilen, kommt es scheinbar zu kurzzeitigen Rückstößen Richtung Kesselkreis. Die Laufzeit der Solaranlage hat Auswirkung auf die Häufigkeit des Phänomens. Es wird daher vermutet, dass die Rückschlagklappe des Gaskessels nicht funktionsfähig war.

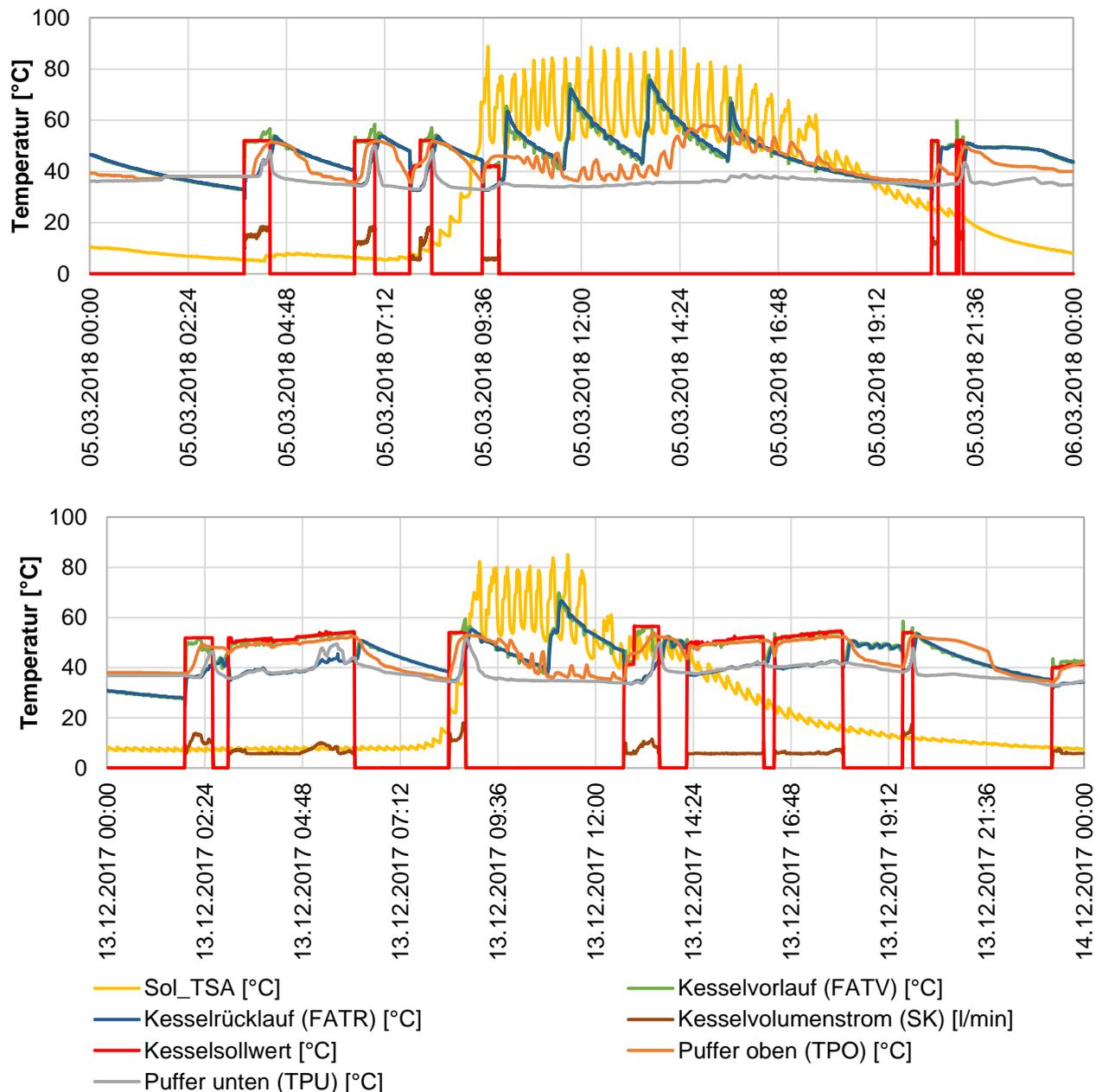


Abb. 9.10: Beispiele für kurzzeitiges Angleichen der Kesseltemperaturen an die Solarkreistemperaturen

## 9.4 Direkter Vergleich der Roh-Messdaten während des Feldversuches

Zur Beurteilung der Güte der Messungen des Heizungsreglers wurden alle Monate als Vergleich herangezogen, hier sind einzelne Tage als Beispiel aufgeführt.

In Abbildung Abb. 9.11 ist die Temperaturdifferenz vor der Korrektur dargestellt. Im Vergleich dazu zeigt die Abb. 9.12 den positiven Effekt des Temperatursensorabgleiches. Die Übereinstimmung der Temperaturdifferenz im Heizungskreis ist nun deutlich besser. Als Konsequenz ist die Übereinstimmung der gemessenen Wärmemengen sehr gut (kleiner als 5 %).

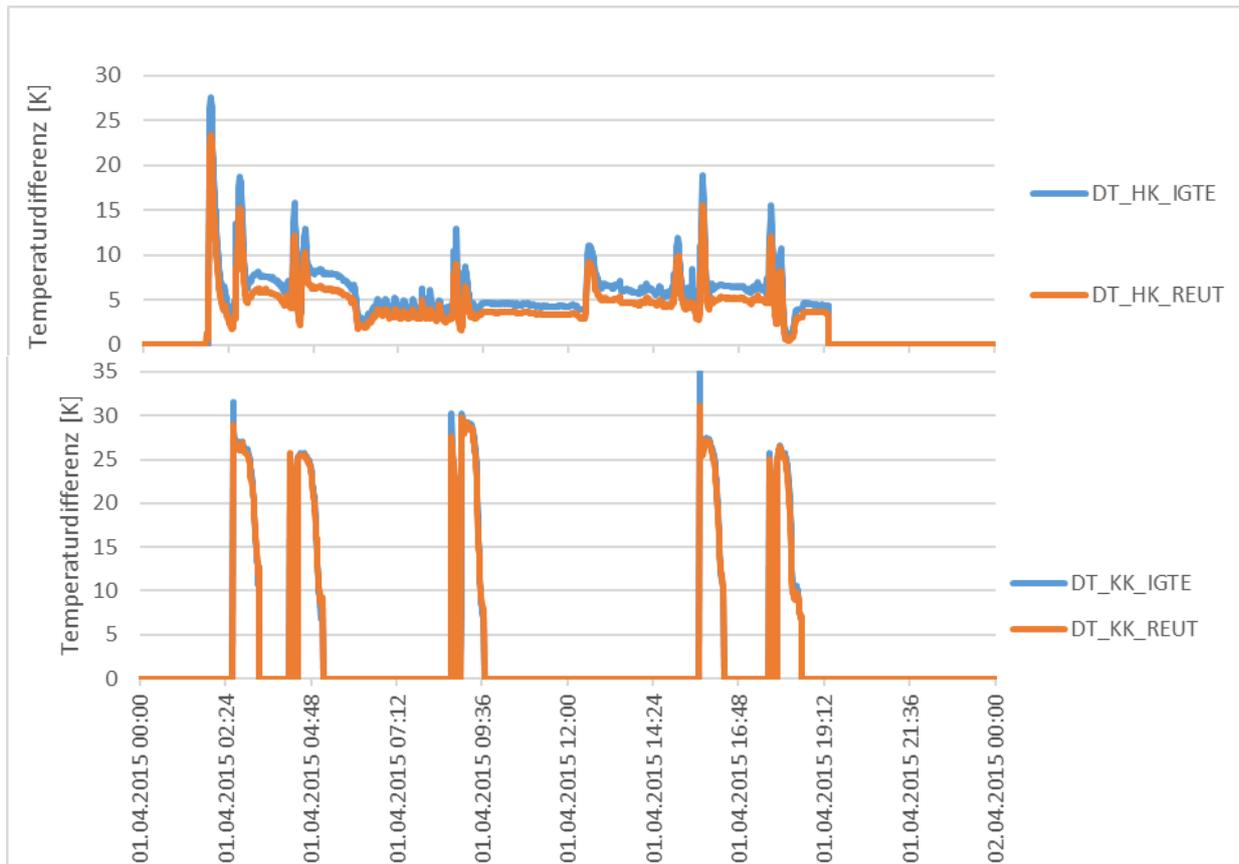


Abb. 9.11 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenzen im Heizkreis(HK) und Kesselkreis (KK) der In-Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 im Vergleich am 01. April 2015

Im Folgenden ist die Temperaturdifferenz, der Volumenstrom und die sich daraus ergebende Wärmemenge im Heizkreis des Feldtestgebäudes 1 nach Einführung des Sensorabgleichsprogrammes (s. Kapitel 2.9) dargestellt.

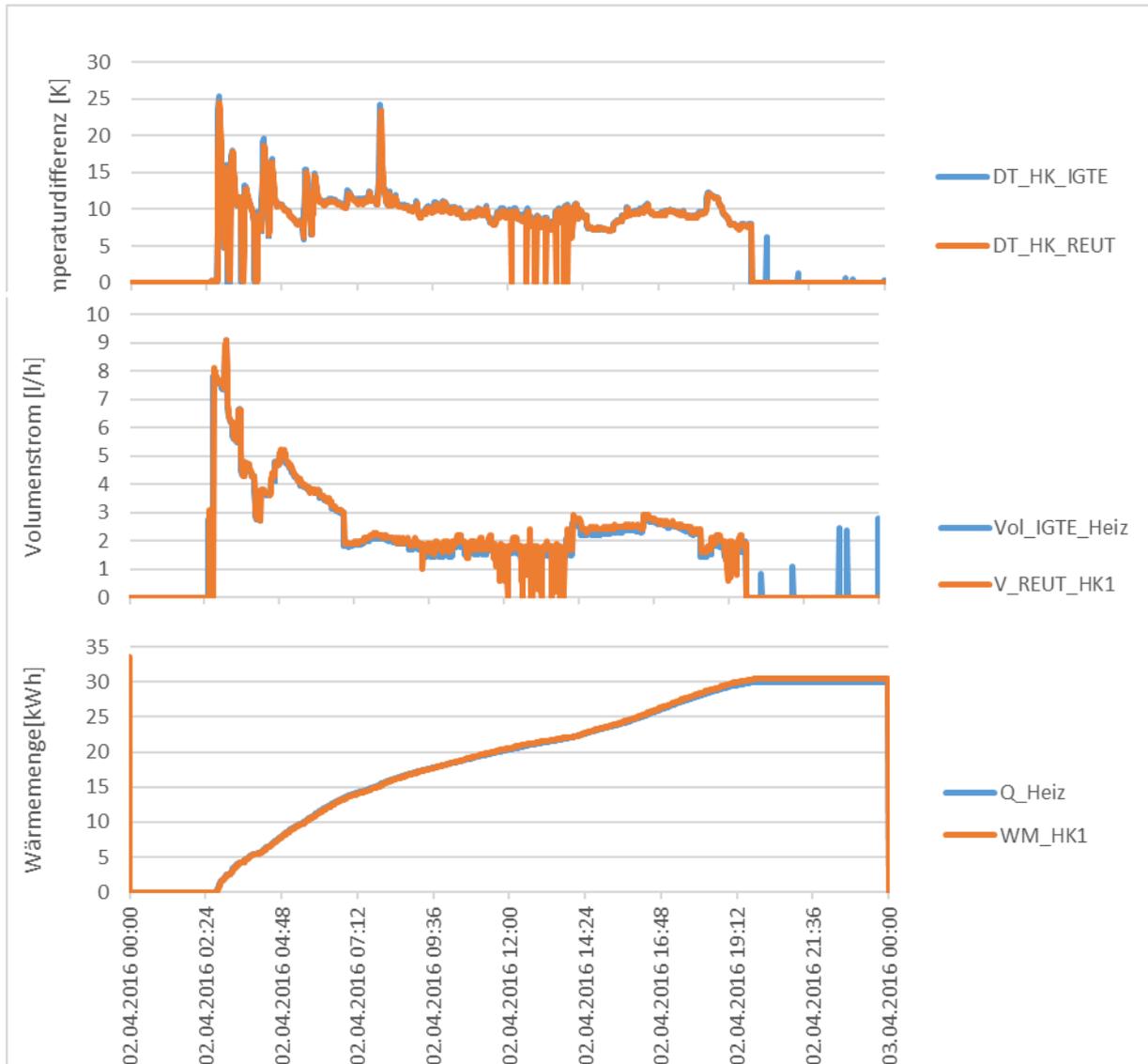


Abb. 9.12 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Heizkreis (HK) der In-Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 am 02. April 2016

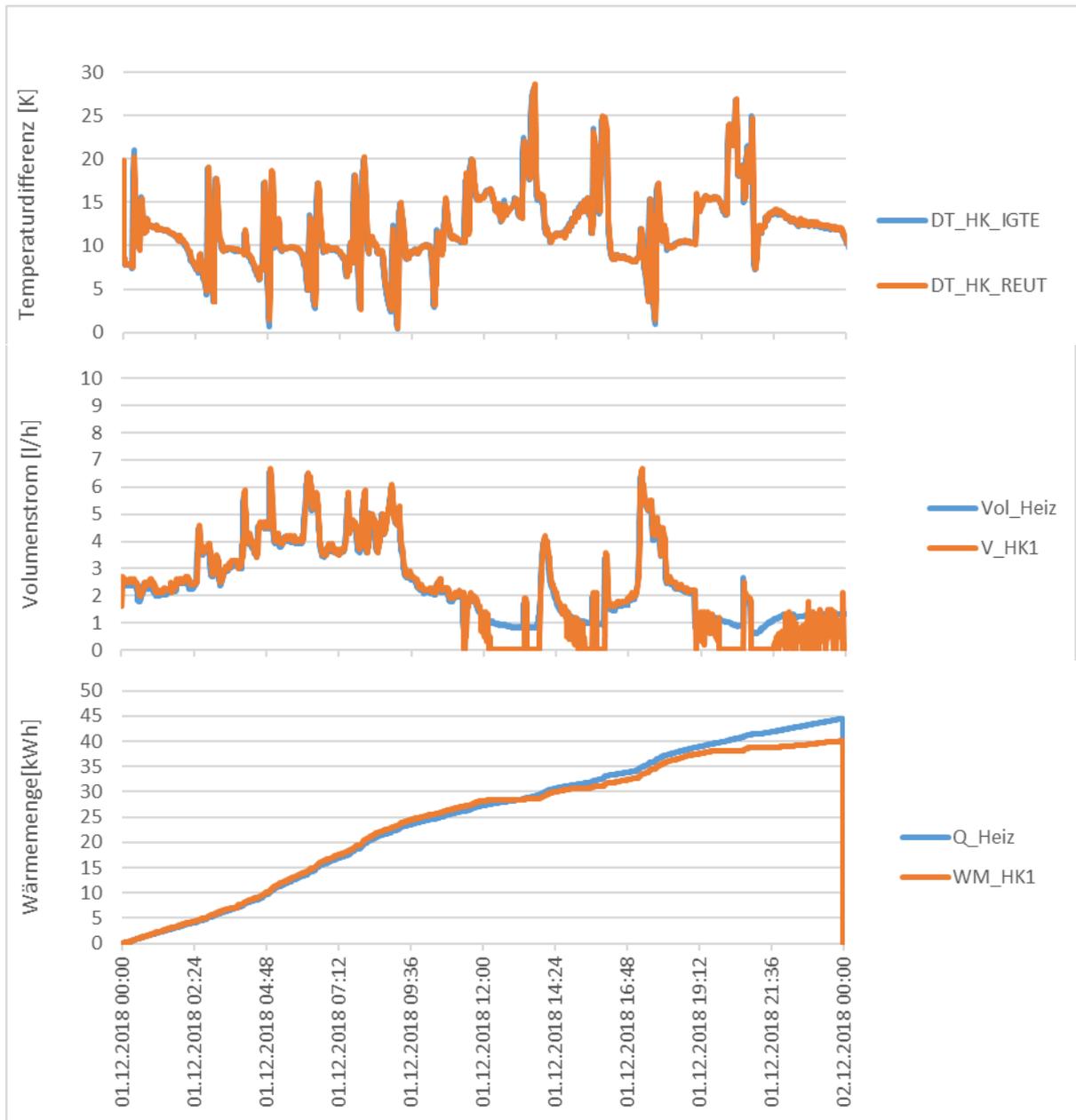


Abb. 9.13 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Heizkreis der In-Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 am 02. Dezember 2018

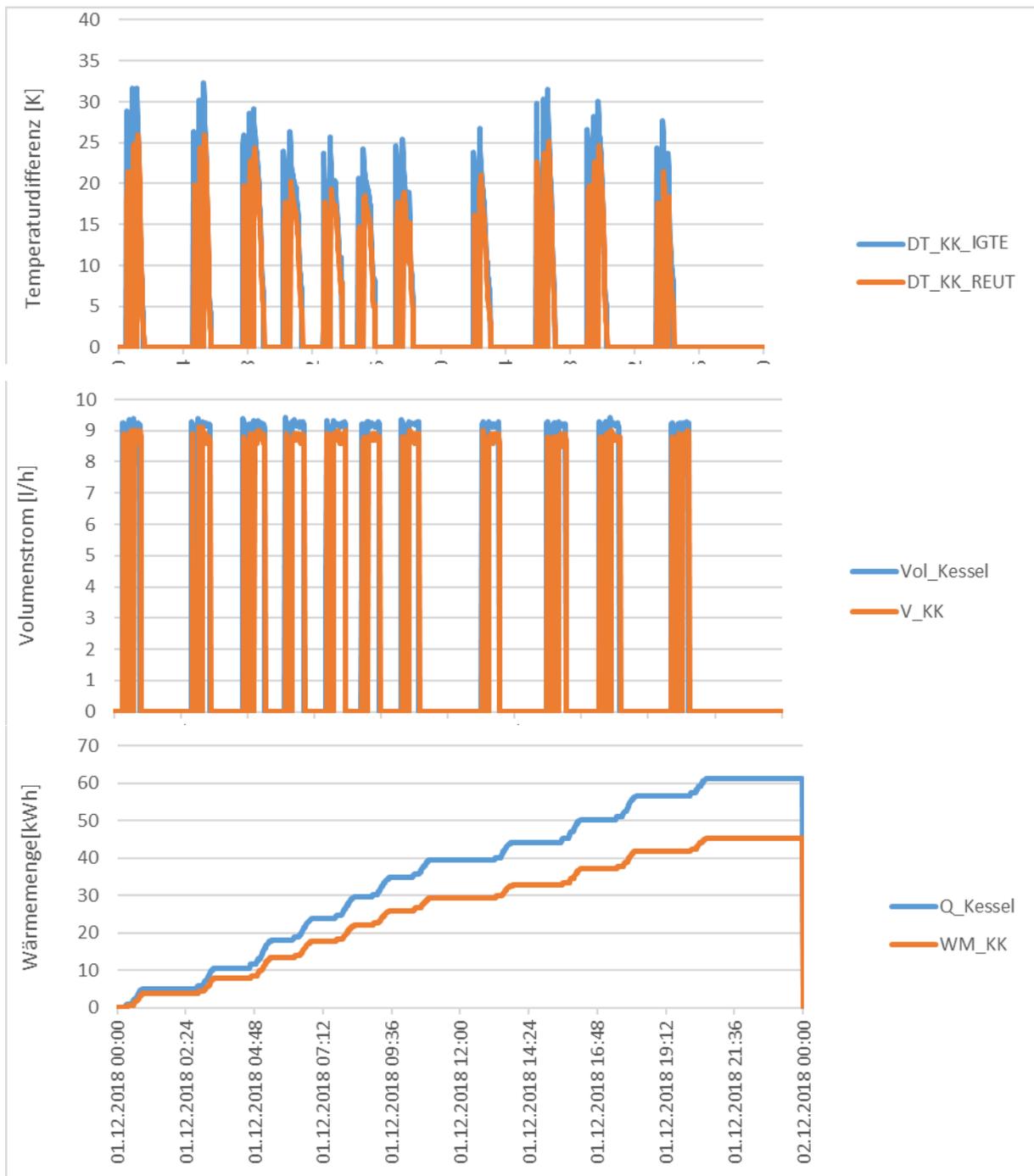


Abb. 9.14 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Kesselkreis der In Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 1 01. Dezember 2018

Im folgenden ist die Temperaturdifferenz und der Volumenstrom im Kesselkreis der Feldtestanlage 2 dargestellt. Die Übereinstimmung der Temperaturdifferenzen und der Volumenströme ist, abgesehen von den kurzzeitigen Temperaturspitzen, sehr gut. Die Spitzen rührten von einer kurzzeitigen Störung

Abschlussbericht ÖKOKO

des Vorlaufsenors am Gaskessel her und konnte vor Projektende nicht mehr behoben werden. Auf die Darstellung der Wärmemenge wurde hier bewusst verzichtet, da die kurzzeitigen Spitzen die Ergebnisse verfälscht haben. Vor Auftreten des Fehlers war die Abweichung jedoch kleiner als 10 %.

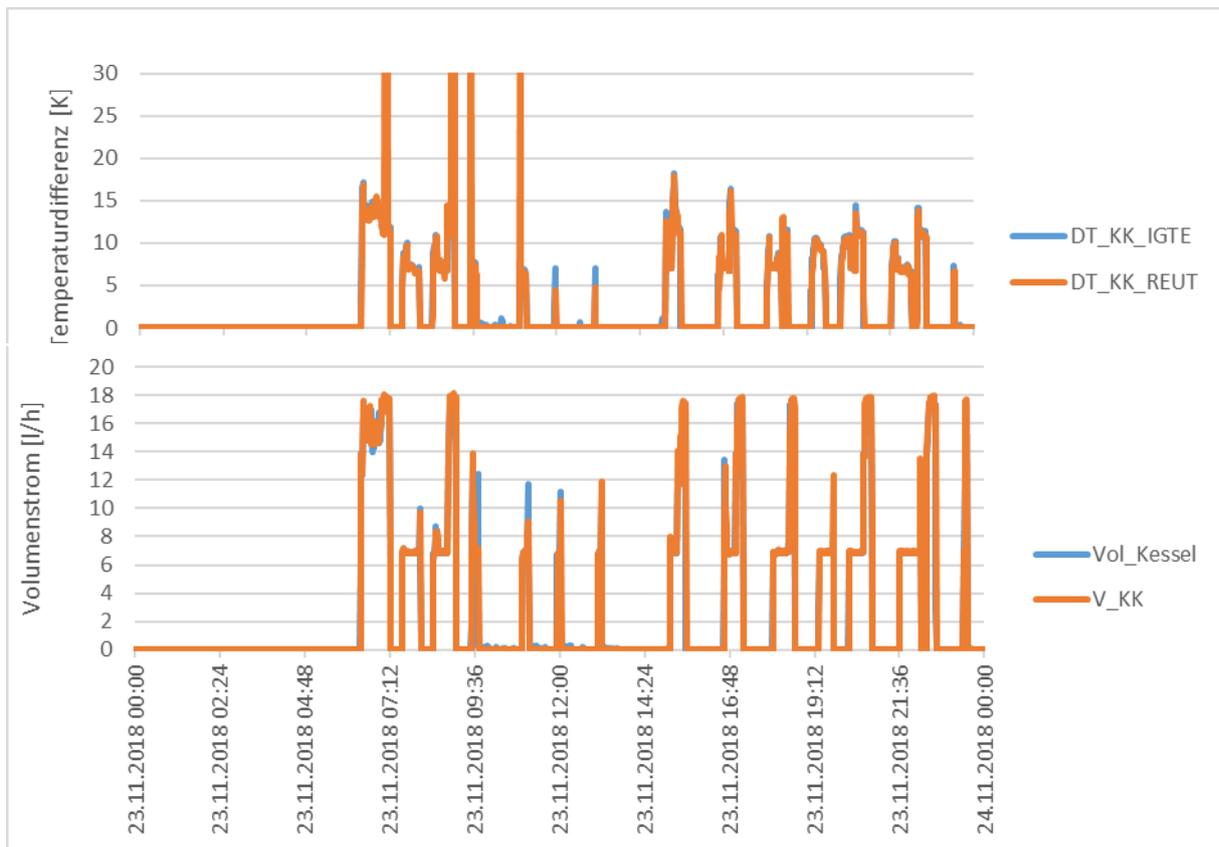


Abb. 9.15 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Kesselkreis der In Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 2 23. November 2018

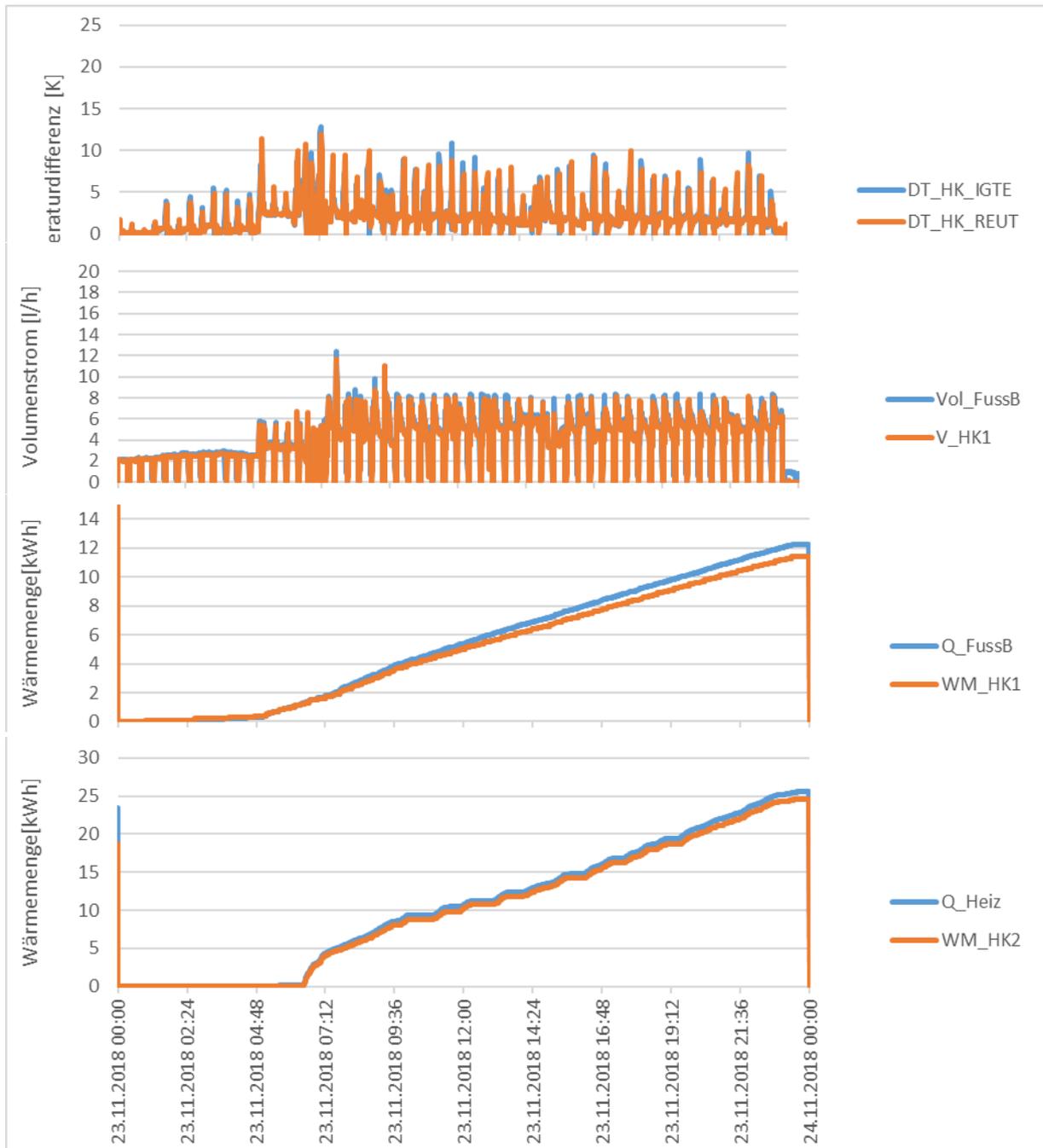


Abb. 9.16 Beispiel Vergleich Tagesverlauf Temperaturdifferenz, Volumenstrom und Wärmemenge im Heizkreis (HK1) und Fußbodenheizung (HK2) der In Situ Messung IGTE (blau) und REUT (orange) im Feldtestgebäude 2 23. November 2018