

Temperaturbasierte energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen Akronym „TeBwA“

Abschlussbericht

Version vom 04.10.2023

Autoren

Manuel Joschka Seiz, Harald Drück,
Dominik Bestenlehner, Xiaoyong Lang

Förderkennzeichen: 03ETW010

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2019 bis 31.12.2022

Zuwendungsempfänger: Steinbeis Innovation gGmbH
Adornostr. 8, 70599 Stuttgart

Ausführende Stelle: Steinbeis Innovationszentrum Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT)
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart

Ansprechperson: Dr. Harald Drück

Tel.: 0711/685 – 63553

Fax: 0711/685 – 63503

E-Mail: drueck@swt-stuttgart.de

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03ETW010 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert.

Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Für die energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen werden derzeit konventionelle Wärmehähler verwendet. Diese führen bei Solaranlagen häufig zu nicht unerheblichen Kosten, die besonders bei kleinen solarthermischen Anlagen einen signifikanten Anteil der Gesamtinvestitionen darstellen. Das Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekts TeBwA (Temperaturbasierte energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen) war es, die Kosten für eine solche energetische Bilanzierung deutlich zu reduzieren.

Im Mittelpunkt stand hierbei die Erarbeitung eines Verfahrens, das die Berechnung des Volumenstroms in einer Rohrströmung mittels Temperaturmessungen ermöglicht. Um eine energetische Bilanzierung einer wärmetechnischen Anlage durchführen zu können, müssen neben den Temperaturen im Vor- und Rücklauf auch die Volumenströme aller relevanter hydraulischer Kreisläufe des betrachteten Systems ermittelt werden. Bei dem von Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT) entwickelten Verfahren erfolgt die Berechnung des Volumenstroms auf Basis der zeitlichen Ausbreitung eines Temperaturgradienten im Fluid. Um die Ausbreitung des Temperaturgradienten berechnen zu können, muss die Temperatur der Flüssigkeit im Rohr zunächst an zwei Punkten gemessen werden. Hierbei kommen ausschließlich kostengünstige Temperatursensoren zum Einsatz, wodurch das Verfahren in finanzieller Hinsicht deutlich kostengünstiger ist, als die Verwendung konventioneller Wärmehähler bzw. Volumenstrommessgeräte.

Innerhalb des Projekts wurden verschiedene Auswertelgorithmen entwickelt, die für die Anwendung des Verfahrens benötigt werden. Hinsichtlich der Entwicklung von Auswertelgorithmen für die Berechnung des Volumenstroms von Rohrströmungen wurden verschiedene Ansätze geprüft. Die Prüfung der Tauglichkeit der verfolgten Ansätze und die Weiterentwicklung der Auswertelgorithmen gestaltete sich als iterativer Prozess. Hierbei wurden sowohl synthetisch erzeugte, d. h. mit dem Simulationsprogramm TRNSYS berechnete als auch experimentell mit einem zu diesem Zweck errichteten Versuchsstand gemessene Daten herangezogen. Zudem wurden Daten herangezogen, die von vier mit Messtechnik ausgestatteten Feldtestanlagen stammten. Die entwickelten Auswertelgorithmen sind in der Lage, auftretende Volumenströme relativ präzise zu berechnen. Die auftretenden Abweichungen der ermittelten Volumenströme gegenüber den Referenzwerten liegen meist bei deutlich weniger als $\pm 10\%$.

Eine präzise Berechnung auftretender Volumenströme setzt das Vorhandensein einer Temperaturdynamik im strömenden Fluid voraus. Für Zeiträume, in denen diese zeitliche Temperaturdynamik zu gering ist, wurde daher nach Möglichkeiten gesucht, wie diese erhöht werden kann. Der Einsatz elektrischer Heizstäbe, die in das betreffende Rohr installiert werden, zeigte sich in diesem Zusammenhang als effektive Methode die Temperaturdynamik kurzfristig zu erhöhen. Es wurden daher Untersuchungen für eine systematische Aktivierung solcher elektrischer Heizstäbe durchgeführt. Hierbei konnte eine grundlegende Strategie entwickelt werden, die sich durch eine präzise Berechenbarkeit auftretender Volumenströme einerseits und möglichst wenig aufzuwendender elektrische Energie andererseits auszeichnet.

Für die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens ist es zudem wichtig, dass die Zeiträume, in denen Volumenströme auftreten, zuverlässig identifiziert werden können. Daher wurden auch für diesen Einsatzzweck entsprechende Auswertelgorithmen entwickelt. Hierbei mussten die unterschiedlichen charakteristischen Temperaturprofile der unterschiedlichen betrachteten hydraulischen Kreisläufe berücksichtigt werden. Bei den hydraulischen Kreisläufen handelt es

sich um den Heizungskreislauf, den Solarkreislauf, den Kesselkreislauf und den Trinkwasserkreislauf. Eine zuverlässige Identifikation auftretender Volumenströme in den hydraulischen Kreisläufen kann mit den entwickelten Auswertalgorithmen sichergestellt werden.

Im Rahmen des Projekts wurden des Weiteren vier Feldtestanlagen mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, um Messwerte zu erfassen, die aus dem regulären Betrieb der betreffenden Anlagen stammen. Die Feldtestanlagen beinhalteten jeweils einen zentralen Warmwasserspeicher und mehrere an diesen angeschlossene hydraulische Kreisläufe. Die erfassten Messwerte wurden zum einen im Rahmen der Weiterentwicklung der verschiedenen entwickelten Auswertalgorithmen verwendet. Zum anderen wurden auf Basis der aufgezeichneten Messwerte, temperaturbasierte energetische Bilanzierungen dieser Feldtestanlagen durchgeführt. Hierbei kamen ausschließlich kostengünstige Temperatursensoren zum Einsatz. Parallel wurden für die Feldtestanlagen energetische Bilanzierungen auf Basis konventioneller Wärmezähler durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse dieser beiden Arten der energetischen Bilanzierung zeigte, dass bei Anwendung des im Forschungsprojekt TeBwA entwickelten Verfahrens eine ausreichend präzise temperaturbasierte energetische Bilanzierung möglich ist. Die Abweichungen der Ergebnisse der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung auf Basis monatlicher Durchschnittswerte liegen im Allgemeinen bei deutlich unter $\pm 10\%$ gegenüber den Werten konventioneller Wärmezähler. Die hierbei erzielte Genauigkeit konnte auf Basis von Messwerten aus dem regulären Betrieb der untersuchten Feldtestanlagen erreicht werden. Durch den Einsatz elektrischer Heizstäbe zur Erhöhung der Temperaturdynamik der Rohrströmung lässt sich die Genauigkeit noch etwas weiter erhöhen.

Abstract

Currently, conventional heat meters are used for the energy balancing of thermal heating systems. These often lead to considerable costs for solar thermal systems, which represent a significant share of the total investment, especially for small solar thermal systems. The aim of the project TeBwA (Temperaturbasierte energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen / Temperature-based Energy Balancing of Thermal Systems), which was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Protection, was to develop a technology that allows for energy balancing at significantly lower costs than energy balancing based on conventional heat meters.

The focus of this project was the development of a method that enables the calculation of the volume flow rate in a pipe on the basis of temperature measurements. In order to carry out an energy balancing of a thermal system, the volume flow rates of all relevant hydraulic circuits of the system under consideration must be determined. In the method developed by Solar and Heat Technology Stuttgart (SWT), the calculation of the volume flow rate is based on the temporal propagation of a temperature gradient in the fluid. To identify the propagation of a temperature gradient, the temperature of the fluid in the pipe must be measured at two points. Only low-cost temperature sensors are used, which makes the method significantly more cost-effective than the use of conventional heat meters or volume flow meters.

Within the context of the project, various evaluation algorithms were developed, which are required for the implementation of the method. With regard to the development of evaluation algorithms for the calculation of the volume flow rate in a pipe, various approaches were tested. The testing of the suitability of the approaches pursued and the further development of the evaluation algorithms turned out to be an iterative process. Data generated synthetically, i.e. calculated with the simulation program TRNSYS, and measured experimentally with the test rig, that was set up for this purpose were used. In addition, data from four field test systems equipped with measurement technology were used. The evaluation algorithms developed are capable of accurately calculating occurring volume flow rates. The deviations of the volume flow rates from the reference values are usually significantly less than $\pm 10\%$.

A precise calculation of occurring volume flow rates requires the presence of temperature dynamics in the flowing fluid. For periods in which these temperature dynamics are too low, strategies were therefore sought to increase them. In this context, the use of electric heating elements installed in the pipe in question proved to be an effective method of increasing the temperature dynamics in the short term. Investigations were therefore carried out into the systematic activation of such electric heating elements. A basic strategy was developed that is characterized by the precise calculability of the volume flows that occur on the one hand and the minimum amount of electrical energy that has to be used on the other.

For the successful application of the method, it is also important that the time periods in which volume flows occur can be reliably identified. Therefore, appropriate evaluation algorithms were also developed for this application. Here, the different characteristic temperature profiles of the various hydraulic circuits considered had to be taken into account. The hydraulic circuits are the heating circuit, the solar circuit, the boiler circuit and the drinking water circuit. A reliable identification of occurring volume flows in the hydraulic circuits can be ensured with the developed evaluation algorithms.

As part of the project, four field test systems were also equipped with extensive measurement technology in order to record measured values from the regular operation of the systems concerned. All the field test systems were equipped with a central hot water store and several hydraulic circuits connected to it. The measured values on the one hand were used for the further development of the different evaluation algorithms. On the other hand, temperature-based energy balancing of these field test systems was carried out on the basis of these measured values. Almost exclusively low-cost temperature sensors were used for this purpose. In parallel, energy balancing based on conventional heat meters was carried out for the field test systems. The comparison of the results of these two types of energy balancing showed that a precise temperature-based energy balancing is possible when using the method developed within the TeBwA research project. The deviations of the results of the temperature-based energy balancing based on monthly average values are usually well below $\pm 10\%$ compared to the values delivered by the conventional heat meters. The accuracy achieved here was based on measured values from regular operation of the field test systems investigated. By using electric heating elements to increase the temperature dynamics of the pipe flow, the accuracy can be increased somewhat further.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur.....	9
Lateinische Symbole.....	9
Griechische Symbole.....	10
Abkürzungen.....	11
Indizes.....	11
1. Einleitung.....	12
1.1 Motivation und Problemstellung.....	12
1.2 Grundprinzip und Stand der Technik.....	13
1.3 Zeitliche Gliederung der Arbeitspakete.....	14
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	16
2. Entwicklung von Auswertalgorithmen zur temperaturflankenbasierten Ermittlung von Volumenströmen (AP1).....	17
2.1 Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung des Volumenstroms im Rohr.....	18
2.1.1 Distanzmessungen.....	19
2.1.2 Verschiebung der zu vergleichenden Segmente.....	29
2.1.3 Vergleich der Ergebnisse.....	31
2.1.4 Identifikation der Zeiträume auftretender Volumenströme.....	38
2.2 Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung der Änderung der inneren Energie eines Warmwasserspeichers.....	41
2.3 Entwicklung und Anwendung von Kriterien hinsichtlich der Auswertbarkeit von Temperaturprofilen.....	42
2.4 Entwicklung von Methoden zur Extrapolation des Volumenstroms.....	43
3. Vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten (AP2).....	44
3.1 Aufbau des Versuchsstands.....	44
3.2 Strategie für die Aktivierung des elektrischen Heizstabs.....	47
4. Energetische Bilanzierung (AP3).....	54
4.1 Konventionelle energetische Bilanzierung und Bestimmung der generellen Funktionsfähigkeit der Anlagen anhand charakteristischer Kennwerte.....	54
4.1.1 Feldtestanlage EdK.....	56
4.1.2 Feldtestanlage LoK.....	62
4.1.3 Feldtestanlage LoT.....	67
4.1.4 Feldtestanlage WaT.....	72
4.2 Genauigkeit der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung.....	75
4.3 Erzeugung selbstlernender, adaptiver Auswertalgorithmen.....	79
4.4 Ökonomischer und ökologischer Vergleich energetische Bilanzierung.....	79

5.	Auswertung synthetisch generierter Daten (AP4)	83
6.	Auswertung von Messdaten aus DST-Tests (AP 5).....	84
7.	In-situ Messungen (AP 6)	85
7.1	Erstellung der Messkonzepte samt graphischer Darstellung.....	85
7.1.1	Feldtestanlage EdK.....	86
7.1.2	Feldtestanlage LoK	87
7.1.3	Feldtestanlage LoT	87
7.1.4	Feldtestanlage WaT	88
7.2	Erstellung der Messvereinbarungen und Einholung der Zustimmung der Anlagenbesitzer	88
7.3	Messtechnik in den vier Feldtestanlagen	89
7.3.1	Konventionelle Messtechnik.....	89
7.3.2	TeBwA- Messtechnik	91
7.4	Validierung und Optimierung der Algorithmen unter Verwendung von Messdaten aus den in-situ Anlagen.....	94
8.	Untersuchungen der Verfahrensunsicherheit (AP 7).....	95
8.1	Identifikation maßgeblicher Einflussfaktoren auf die Genauigkeit des entwickelten Verfahrens	95
8.2	Beurteilung der Auswirkung der beeinflussenden Variablen	95
8.2.1	Einfluss der zeitlichen Auflösung der Temperaturwerte.....	95
8.2.2	Einfluss des thermischen Kontakts zwischen Temperatursensoren und strömendem Fluid	97
9.	Projektleitung, Öffentlichkeits- und Normungsarbeit (AP8)	102
9.1	Projektleitung.....	102
9.2	Öffentlichkeitsarbeit	102
9.2.1	Teilnahme an Konferenzen und Tagungen.....	102
9.2.2	Vorträge.....	103
9.2.3	Normungsarbeit.....	103
9.2.4	Treffen Forschungsnetzwerk „EnergieWendeBauen“	104
10.	Verwertung der Ergebnisse	105
10.1	Wissenschaftliche Verwertung.....	105
10.2	Technische Verwertung	106
10.3	Wirtschaftliche Verwertung	106

11. Zusammenfassung und Ausblick.....	107
11.1 Zusammenfassung	107
11.2 Ausblick	107
12. Danksagung.....	110
13. Literaturverzeichnis	111

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	-	Vektor a
A_{Koll}	m^2	Bruttokollektorfläche
b	-	Vektor b
$C_{p,M}$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums
$C_{p,W}$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Spezifische Wärmekapazität Wasser
D	-	Anzahl berücksichtigter Messwerte
dyn_{seq}	K/s	Temperaturdynamik des betrachteten Zeitabschnitts
$\text{EW}_{\text{Erdgas}}$	$\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$	Spezifischer Emissionswert Erdgas
$f_{\text{Sol,th}}$	-	Solarthermischer Deckungsanteil
H_{Sol}	kWh/m^2	Zur Verfügung stehende Strahlungsenergie in der Ebene des Sonnenkollektors
$m_{\text{CO}_2,\text{sav}}$	kg_{CO_2}	Eingesparte Menge an CO_2 -Äquivalentemissionen
m_W	kg	Masse Wasser
N	-	Dimension der Vektoren
\dot{Q}_{Sp}	W	Übertragener Wärmestrom zwischen Wärmeträgermedium und Warmwasserspeicher
Q_{RHz}	kWh	Wärmeverbrauch für Raumheizung
Q_{Sol}	kWh	Durch solarthermischen Erzeuger in den Warmwasserspeicher eingebrachte Wärme
$Q_{\text{Sol,nutz}}$	kWh	Durch solarthermischen Erzeuger gelieferte Nutzwärme
Q_{TWW}	kWh	Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasserbereitung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Q_V	kWh	Wärmeverluste des Warmwasserspeichers
Q_{Zusatz}	kWh	Durch Zusatzwärmeerzeuger in den Warmwasserspeicher eingebrachte Wärme
$Q_{\text{Zusatz,nutz}}$	kWh	Durch Zusatzwärmeerzeuger gelieferte Nutzwärme
$Q_{\Delta\text{Sp}}$	kWh	Zunahme der im Warmwasserspeicher gespeicherten thermischen Energie
t	s	Zeit bzw. Zeitschritt
t_{seq}	s	Länge des Zeitabschnitts
T^{in}	K	Temperatur Sensor 1
t_{lag}	s	Zeitliche Verschiebung
$T_{\text{max,seq}}$	K	Größter Temperaturwert des betrachteten Zeitabschnitts
$T_{\text{min,seq}}$	K	Kleinster Temperaturwert des betrachteten Zeitabschnitts
T^{out}	K	Temperatur Sensor 2
\dot{V}_M	m ³ /s	Volumenstrom des Wärmeträgermediums

Griechische Symbole

ΔT_M	K	Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums vor und nach der Wärmeübertragung
ΔU	kJ	Änderung innere Energie
$\eta_{\text{Gas,bw}}$	-	Nutzungsgrad Gasbrennwertkessel
$\eta_{\text{Sol,th}}$	-	Solarthermischer Nutzungsgrad
κ	-	Skalierte euklidische Metrik
ρ_M	kg/m ³	Dichte des Wärmeträgermediums

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
AP	Arbeitspaket
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DST	Dynamic System Test
DWD	Deutscher Wetterdienst
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart
ISES	International Solar Energy Society
ISS	Institut für Signalverarbeitung und Systemtheorie der Universität Stuttgart
KNN	Künstliches neuronales Netz
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
Q	Quartal eines Kalenderjahres
SWT	Solar- und Wärmetechnik Stuttgart
TAP	Teilarbeitspaket
WZ	Wärmezähler

Indizes

Symbol	Bezeichnung
el	elektrisch
th	thermisch

1. Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die Ergebnisse und den Ablauf des von Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT) durchgeführten und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03ETW010 geförderten Forschungsprojekts TeBwA (**T**emperaturbasierte **e**nergetische **B**ilanzierung **w**ärmetechnischer **A**nlagen) dar. Das Hauptziel des Projekts bestand darin, ein neuartiges Verfahren für die energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen zu entwickeln. Das neu entwickelte Verfahren sollte sich hierbei gegenüber den aktuell üblichen Verfahren durch deutlich geringere Kosten auszeichnen und gleichzeitig eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit aufweisen.

1.1 Motivation und Problemstellung

Um eine Aussage über die Effizienz treffen zu können, mit der eine wärmetechnische Anlage betrieben wird, muss zunächst die Energie ermittelt werden, die zwischen den zentralen Komponenten der betreffenden wärmetechnischen Anlage und ihrer Umgebung übertragen wird. Bei Anlagen mit einem zentralen Warmwasserspeicher sind hierbei v. a. die hydraulischen Kreisläufe zu betrachten, die an den Warmwasserspeicher angeschlossen sind und diesem Wärme zuführen bzw. von diesem Wärme abführen. Darüber hinaus müssen u. a. die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers an die Umgebung ermittelt werden. Auf dieser Basis kann eine energetische Bilanzierung durchgeführt werden und es lassen sich charakteristische, das Anlagenverhalten beschreibende Kenngrößen wie beispielsweise der solare Deckungsanteil solarthermischer Anlagen berechnen. Durch eine kontinuierliche Überprüfung dieser charakteristischer Kenngrößen, kann u. a. festgestellt werden, ob die betreffende wärmetechnische Anlage ein verbesserungswürdiges Betriebsverhalten aufweist oder sich ihr Betriebsverhalten im Lauf der Zeit verschlechtert und Handlungsbedarf hinsichtlich einer Optimierung des Betriebsverhaltens besteht.

Eine energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen erfordert demnach u. a. die Erfassung aller Wärmeströme, die einem zentralen Warmwasserspeicher zu- bzw. abgeführt werden. Hierfür werden aktuell Wärmehähler¹ (WZ) verwendet, die in die hydraulischen Kreisläufe installiert werden, die jeweils auftretenden Wärmeströme erfassen und diese über der Zeit zu Wärmemengen aufzusummieren. Die Anschaffungskosten dieser Wärmehähler stellen bei kleinen wärmetechnischen Anlagen einen nicht unerheblichen Anteil der gesamten Investitionskosten dar. Aus diesem Grund wird häufig auf eine energetische Bilanzierung entsprechender Anlagen verzichtet, was dazu führt, dass nicht festgestellt werden kann, ob diese effizient betrieben werden.

Das Ziel des Projekts TeBwA besteht darin, eine energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen zu realisieren, ohne auf teure und störanfällige Messtechnik zurückzugreifen. Verwendet werden bei dem im Rahmen dieses Projekts entwickelten Verfahren demnach keine konventionellen Wärmehähler, sondern ausschließlich kostengünstige, robuste Temperatursensoren. Dies soll insbesondere die energetische Bilanzierung kleiner wärmetechnischer Anlagen, wie beispielsweise solarthermische Anlagen für Ein- oder Zweifamilienhäuser, begünstigen, bei denen aus Kostengründen derzeit häufig auf eine solche energetische Bilanzierung verzichtet wird.

¹ Auch wenn umgangssprachlich meist der Begriff „Wärmemengenzähler“ verwendet wird, lautet der formal korrekte Terminus „Wärmehähler“; vgl. z. B. DIN EN 1434-3:2016-02 (Wärmehähler – Teil 3: Datenaustausch und Schnittstellen)

1.2 Grundprinzip und Stand der Technik

Wie in Abschnitt 1.1 erläutert, müssen für eine energetischen Bilanzierung einer wärmetechnischen Anlage zunächst die auftretenden Wärmeströme ermittelt werden, die mittels der an den zentralen Warmwasserspeicher angeschlossenen hydraulischen Kreisläufe übertragen werden. Gemäß Gleichung (1-1) ist für die Berechnung der Größe dieser Wärmeströme u. a. die Kenntnis über den während der Wärmeübertragung auftretenden Volumenstrom des Wärmeträgermediums erforderlich.

$$\dot{Q}_{Sp} = \dot{V}_M \cdot \rho_M \cdot c_{p,M} \cdot \Delta T_M \quad (1-1)$$

mit:

\dot{Q}_{Sp}	Übertragener Wärmestrom zwischen Wärmeträgermedium und Warmwasserspeicher [W]
\dot{V}_M	Volumenstrom des Wärmeträgermediums [m ³ /s]
ρ_M	Dichte des Wärmeträgermediums [kg/m ³]
$c_{p,M}$	Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums [J/(kg·K)]
ΔT_M	Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums vor und nach der Wärmeübertragung [K]

Für eine erfolgreiche Anwendung des im Rahmen des Projekts TeBwA entwickelten Verfahrens ist es von essentieller Bedeutung, den während der Wärmeübertragung auftretenden Volumenstrom unter ausschließlicher Verwendung kostengünstiger Temperatursensoren berechnen zu können. Daher wurde in Rahmen des Projekts TeBwA zunächst ein Verfahren für eine zuverlässige temperaturbasierte Volumenstrombestimmung entwickelt. Die temperaturbasierte Volumenstrombestimmung wurde erstmals von [1] beschrieben. Sie beruht auf dem Vergleich zweier zeitlicher Temperaturprofile. Die hierbei benötigten Temperaturwerte werden von zwei Temperatursensoren erfasst, die in einer definierten Entfernung voneinander in ein flüssigkeitsdurchströmtes Rohr installiert werden. Das Ziel des Vergleichs der beiden Temperaturprofile ist die Ermittlung der Zeit, die die Strömung für das Zurücklegen der Strecke zwischen den beiden Temperatursensoren benötigt. Wurde diese Zeit ermittelt, so kann bei bekanntem Abstand zwischen den Temperatursensoren und bei bekanntem Rohrquerschnitt der Volumenstrom der Strömung berechnet werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung dieses Vorgehens ist das Vorliegen einer ausreichend hohen Temperaturdynamik. Abbildung 1-1 zeigt eine Skizze der Messstrecke des im Rahmen des Projekts TeBwA errichteten Versuchsstands samt der beiden Temperatursensoren.



Abbildung 1-1: Messstrecke des Versuchsstands mit Temperatursensoren

Eine detaillierte Beschreibung des entwickelten Verfahrens und der Auswertelgorithmen für eine temperaturbasierte Volumenstrombestimmung findet sich in Abschnitt 2.

Mit dem so berechneten Volumenstrom wird dann gemäß Gleichung (1-1) der Wärmestrom des betrachteten hydraulischen Kreislaufs berechnet. Hierfür müssen die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums bekannt sein. Zudem muss die Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums vor und nach der Wärmeübertragung mittels Temperatursensoren am Ein- und Austritt des zentralen Warmwasserspeichers bestimmt werden. Im Anschluss an die Berechnung der zwischen den hydraulischen Kreisläufen und dem Warmwasserspeicher auftretenden Wärmeströme können die aus diesen Wärmeströmen resultierenden Wärmemengen durch eine Integration über die Zeit berechnet werden. Auf Basis dieser Wärmemengen kann unter zusätzlicher Berücksichtigung der Wärmeverluste des Warmwasserspeichers eine energetische Bilanzierung der wärmetechnischen Anlage erfolgen. Eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens im Rahmen der energetischen Bilanzierung einer wärmetechnischen Anlage und eine Darstellung der Ergebnisse der energetischen Bilanzierung von vier mit umfangreicher Messtechnik ausgerüsteten Feldtestanlagen findet sich in Abschnitt 4.

1.3 Zeitliche Gliederung der Arbeitspakete

Das Projekt teilte sich entsprechend der Angaben im Projektantrag zum Forschungsvorhaben „Temperaturbasierte energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen“ vom 25.09.2018 in acht Arbeitspakete (AP) auf. In Tabelle 1-1 sind die Bearbeitungszeiträume der einzelnen Arbeitspakete graphisch dargestellt.

Tabelle 1-1: Arbeitspakete incl. Bearbeitungszeiträume

Arbeitspakete	Status	2019				2020				2021				2022			
		Q1	Q2	Q3	Q4												
1 Entwicklung von Auswerteargorithmen	✓		■	■	■	■	■	★	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2 Vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten	✓			■	■	■	■										
3 Energetische Bilanzierung	✓				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4 Auswertung synthetischer Daten	✓						■	■	■	■							
5 Auswertung von Messdaten aus DST-Tests	✓													■	■		
6 In-situ Messungen	✓					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7 Untersuchungen der Verfahrensunsicherheiten	✓													■	■	■	■
8 Projektleitung, Öffentlichkeits- und Normungsarbeit	✓	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

✓ Erledigt
 ★ Meilenstein und Abbruchkriterium

Aus Tabelle 1-1 ist ersichtlich, dass AP 1 „Entwicklung von Auswerteargorithmen“ im Zeitraum zwischen Q2-2019 und Q4-2022 bearbeitet wurde. Der Grund für diesen langen Bearbeitungszeitraum ist, dass die Entwicklung der verschiedenen Auswerteargorithmen eng mit der Auswertung der experimentell, mittels des zu diesem Zweck errichteten Versuchsstands, erzeugten Messwerten und der Auswertung der in-situ Messwerte verbunden war. Die Erfahrungen aus diesen Auswertungen wurden bei der Weiterentwicklung der Auswerteargorithmen genutzt. In Zusammenhang mit AP 1 wurde im Projektantrag ein Meilenstein M 1 festgelegt, der gleichzeitig ein Abbruchkriterium bei Nichterfüllung der Forderung an die zu entwickelnden

Auswertelgorithmen darstellte. Die Forderung bestand darin, dass die Abweichungen der auf Basis von Temperaturflanken ermittelten Volumenströme im Solarkreislauf durchschnittlich maximal $\pm 10\%$ betragen sollten. Diese Forderung wurde erfüllt und die Erfüllung mit dem zugehörigen Bericht zum Meilenstein M 1 in der Version vom 10.09.2020 nachgewiesen. Auch die sonstigen AP 1 zugeordneten Arbeiten zur Entwicklung von Auswertelgorithmen zur temperaturflankenbasierten Ermittlung von Volumenströmen, wurden erfolgreich im Bearbeitungszeitraum abgeschlossen. Eine detaillierte Beschreibung der in Rahmen von AP 1 durchgeführten Arbeiten findet sich in Abschnitt 2 des vorliegenden Abschlussberichts.

Die Bearbeitung von AP 2 „Vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten“ erfolgte zwischen Q3-2019 und Q2-2020 und konnte ebenfalls erfolgreich im Bearbeitungszeitraum des Projekts abgeschlossen werden. Für die erfolgreiche Durchführung dieses AP wurde zunächst ein Versuchsstand geplant und errichtet. Nach erfolgreicher Errichtung des Versuchsstands, wurde dieser verwendet, um Messwerte zu generieren. Diese Messwerte wurden anschließend mithilfe der in AP 1 entwickelten Auswertelgorithmen ausgewertet. Zudem wurde in AP 2 eine Strategie für die Aktivierung des elektrischen Heizstabs entwickelt. Die AP 2 betreffenden Einzelheiten werden in Abschnitt 3 dieses Abschlussberichts beschrieben.

Die Bearbeitung von AP 3 „Energetische Bilanzierung“ wurde zwischen Q4-2019 und Q4-2022 durchgeführt und erfolgreich in der Bearbeitungszeit des Projekts abgeschlossen. Im Rahmen von AP 3 wurden vier mit Messtechnik ausgestattete Feldtestanlagen energetisch bilanziert. Hierbei wurde primär die Genauigkeit ermittelt, mit der eine temperaturbasierte energetische Bilanzierung der Feldtestanlagen umgesetzt werden kann. Ergänzend wurden für die Feldtestanlagen Kennwerte ermittelt, die deren Betriebsverhalten charakterisieren. Detailliert wird auf die Bearbeitung von AP 3 in Abschnitt 4 dieses Abschlussberichts eingegangen.

Die Durchführung von AP 4 „Auswertung synthetischer Daten“ erfolgte zwischen Q2-2020 und Q1-2021. Die Bearbeitung dieses AP konnte ebenfalls erfolgreich in der Bearbeitungszeit des Projekts abgeschlossen werden. Die Auswertung synthetischer Daten sollte dazu dienen, den experimentellen Aufwand zu begrenzen, da die interessierenden Parameter bei Verwendung synthetischer Daten mit geringem Aufwand variiert werden können. Da sich die Aussagekraft der Auswertung synthetischer Daten als begrenzt herausstellte, wurden allerdings in der Folge schwerpunktmäßig experimentell erzeugte Messwerte und in-situ Messwerte ausgewertet. Detailliert werden die im Rahmen von AP 4 durchgeführten Arbeiten in Abschnitt 5 beschrieben.

Die zu AP 5 „Auswertung von Messdaten aus DST-Tests“ gehörigen Arbeiten wurden im Zeitraum von Q1-2022 bis Q2-2022 durchgeführt. Hierbei stellte sich jedoch heraus, dass die Messdaten aus DST-Tests nicht für die temperaturflankenbasierte Volumenstromberechnung eingesetzt werden können, da die zeitliche Auflösung dieser Messdaten nicht ausreichend hoch ist. Genauere Angaben zu AP 5 finden sich in Abschnitt 6 des vorliegenden Abschlussberichts.

AP 6 „In-situ Messungen“ wurde im Zeitraum von Q1-2020 bis Q4-2022 bearbeitet. Im Rahmen von AP 6 wurden unter anderem Messkonzepte für die vier in der Folge mit Messtechnik ausgerüsteten Feldtestanlagen ausgearbeitet. Zudem wurden Messvereinbarungen für die Zusammenarbeit mit den Besitzern der Feldtestanlagen erstellt und von den Besitzern jeweils eine schriftliche Zustimmung für die energetische Vermessung der betreffenden Anlage eingeholt. Anschließend erfolgte eine Ausrüstung der vier Feldtestanlagen mit umfangreicher Messtechnik. Einzelheiten zu AP 6 finden sich in Abschnitt 7 dieses Abschlussberichts.

Die Bearbeitung von AP 7 „Untersuchungen der Verfahrensunsicherheiten“ erfolgte zwischen Q1-2022 und Q4-2022 und wurde während des Bearbeitungszeitraums des Projekts erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen von AP 7 wurden Faktoren identifiziert, die einen maßgeblichen Einfluss auf eine erfolgreiche Umsetzung des entwickelten Verfahrens haben. Detaillierte Angaben zu AP 7 finden sich in Abschnitt 8 des vorliegenden Abschlussberichts.

Eine Begleitung des Projekts im Rahmen von AP 8 „Projektleitung, Öffentlichkeits- und Normungsarbeit“, erfolgte während der gesamten Bearbeitungszeitraum des Projekts von Q1-2019 bis Q4-2022. Die einzelnen AP 8 zugeordneten Maßnahmen werden in Abschnitt 9 beschrieben.

Bei der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete kam es aufgrund der Corona-Pandemie und kurzfristig aufgetretenen personellen Engpässen zunächst zu Verzögerungen. Dies erforderte die Beantragung einer kostenneutralen Verlängerung des Bearbeitungszeitraums beim Projektträger um neun Monate bis zum 31.12.2022. Der entsprechende Antrag auf kostenneutrale Laufzeitverlängerung wurde bewilligt und es konnten so letztlich alle geplanten Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die während der Projektlaufzeit erfolgte Zusammenarbeit mit anderen Stellen wird nachfolgend aufgeführt.

Mit dem Institut für Signalverarbeitung und Systemtheorie (ISS) der Universität Stuttgart, in Person des Leiters des Instituts, Prof. Dr.-Ing. Yang, wurde im Juli 2022 eine Zusammenarbeit vereinbart. Durch die Zusammenarbeit soll eine Weiterentwicklung des im Projekt TeBwA entwickelten Verfahrens begünstigt werden. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit sollte eine Masterarbeit, die gemeinsam durch das ISS, das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart und durch Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT) betreut werden sollte, durchgeführt werden. In dieser Masterarbeit sollte geprüft werden, wie das entwickelte Verfahren durch den Einsatz künstlicher neuronaler Netze weiter verbessert werden kann. Während der Laufzeit des Projekts konnte für die Bearbeitung der Masterarbeit jedoch kein geeigneter Kandidat gefunden werden.

Eine weitere Zusammenarbeit wurde im September 2022 mit der Fakultät für Informatik der Eberhard Karls Universität Tübingen in Person von Prof. Dr. rer. nat. Franz und Herrn Ebmaier vereinbart. Auch im Rahmen dieser Zusammenarbeit sollen Möglichkeiten untersucht werden, wie das im Rahmen des Projekts TeBwA entwickelte Verfahren durch den Einsatz künstlicher neuronaler Netze verbessert werden kann. Gespräche über konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten der Zusammenarbeit werden aktuell geführt. In diesem Zusammenhang wurden auch Kontakte zur Stiftung Energieeffizienz aufgenommen.

Zusätzlich wurde das neu entwickelte Verfahren zur energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen dem DIN-Normenausschuss „Thermische Solaranlagen“ vorgestellt und mit den dort vertretenen Expertinnen und Experten diskutiert.

Ergänzend wurde auch an mehreren Projektleitungstreffen des BMWK-Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen teilgenommen.

2. Entwicklung von Auswertalgorithmen zur temperaturflankenbasierten Ermittlung von Volumenströmen (AP1)

Voraussetzung für eine energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen ist es, Kenntnis über die Höhe des Volumenstroms zu haben, der in den hydraulischen Kreisläufen der energetisch zu bilanzierenden Anlagen im betrachteten Zeitraum auftritt. Im Fall einer Heizungsanlage mit zentralem Warmwasserspeicher handelt es sich hierbei um die hydraulischen Kreisläufe, die an diesen Speicher angeschlossen sind und Wärme in diesen einbringen bzw. aus diesem austragen. Bei dem im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Verfahren der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen basiert die Bestimmung der Volumenströme der hydraulischen Kreisläufe ausschließlich auf der Erfassung und Auswertung der Temperaturen der in den jeweiligen Rohren strömenden Flüssigkeiten. Für die Erfassung der benötigten Temperaturwerte wird in jeden der hydraulischen Kreisläufe eine Messstrecke installiert, in welche wiederum zwei Temperatursensoren in definiertem Abstand eingebacht werden. Die Spitzen der Temperatursensoren befinden sich hierbei in direktem Kontakt mit dem strömenden Fluid, wodurch eine unmittelbare Erfassung der Fluidtemperatur gewährleistet wird.

Die Auswertung der von diesen beiden Sensoren erfassten Temperaturverläufe ergibt anschließend die Zeit, die das Fluid benötigt, um die Strecke zwischen den beiden Temperatursensoren zurückzulegen. Auf Basis dieser Zeit lässt sich, bei bekanntem Querschnitt des Rohrs und bei bekanntem Abstand zwischen den beiden Temperatursensoren, der Volumenstrom des Fluids berechnen. Das der Auswertung zugrundeliegende physikalische Prinzip stellt hierbei die räumliche und zeitliche Ausbreitung eines Temperaturgradienten dar. Voraussetzung für eine erfolgreiche temperaturbasierte Bestimmung des Volumenstroms ist demnach eine Temperaturänderung des strömenden Fluids im betrachteten Zeitraum. Eine beispielhafte Darstellung der zeitlichen Temperaturverläufe zweier in eine Messstrecke eingebrachter Temperatursensoren ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

Aus Abbildung 2-1 ist ersichtlich, dass der zeitliche Temperaturverlauf von Temperatursensor 1 durch eine horizontale, d.h. zeitliche Verschiebung, näherungsweise in jenen von Temperatursensor 2 überführt werden kann.

Im Forschungsprojekt TeBwA, wurden verschiedene Ansätze für die temperaturflankenbasierte Ermittlung von Volumenströmen verfolgt und auf Basis dieser Ansätze Auswertalgorithmen entwickelt. Die entwickelten Auswertalgorithmen wurden einerseits anhand synthetisch erzeugter und andererseits experimentell gemessener Temperaturwerte hinsichtlich der Präzision untersucht, mit der diese den Volumenstrom in einem flüssigkeitsdurchströmten Rohr berechnen können. In einem ersten Schritt wurden synthetisch erzeugte Messwerte für die Auswertung herangezogen, da die verschiedenen Einflussfaktoren wie Fluidtemperatur, Umgebungstemperatur oder Strömungsgeschwindigkeit des Fluids in Simulationen mit geringem Aufwand verändert werden können. Für die synthetische Generierung von Messwerten, wurde das Simulationsprogramm TRNSYS verwendet. Hierbei wurde zunächst eine solare Kombianlage zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Gebäudeheizung modelliert. Auf Basis dieses Modells wurden anschließend Simulationen durchgeführt und hierbei die auszuwertenden Messwerte erzeugt. Die Auswertalgorithmen, die in der Lage waren den Volumenstrom unter verschiedenen Bedingungen mit hoher Genauigkeit zu berechnen, wurden anschließend für eine Auswertung experimentell generierter Messwerte verwendet.

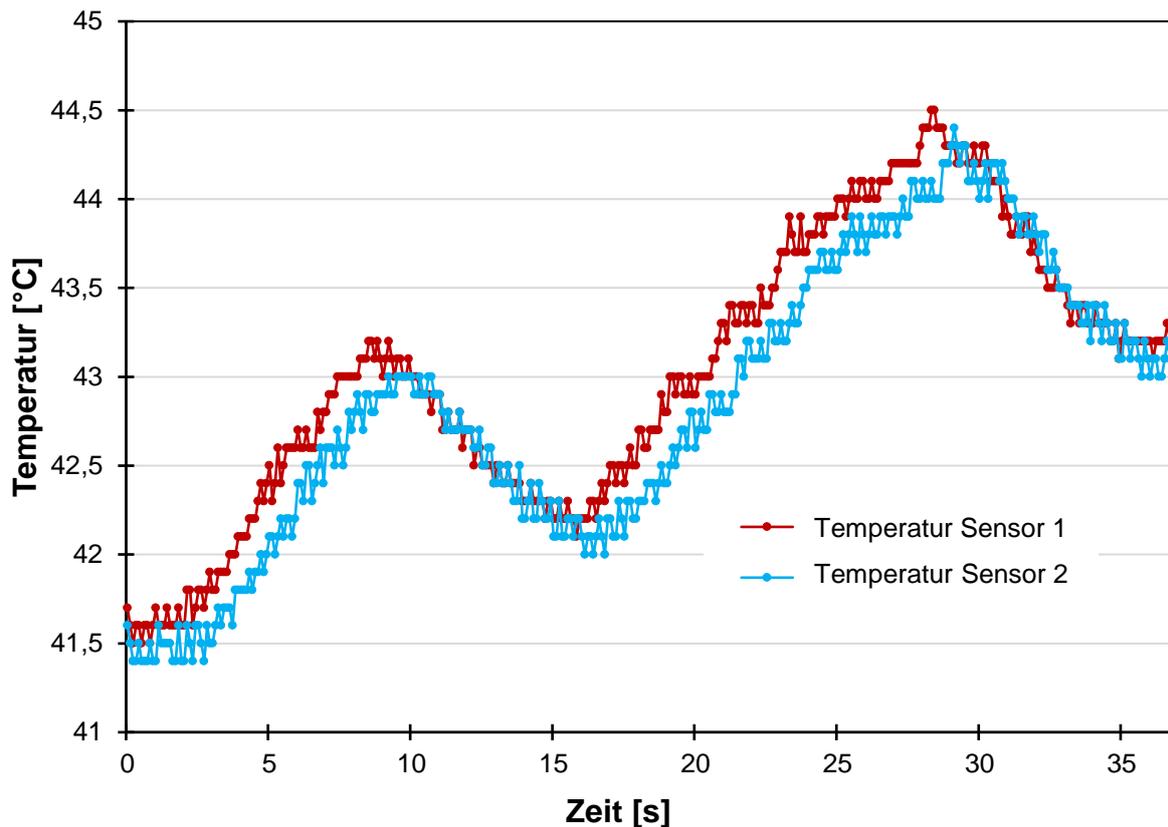


Abbildung 2-1: Zeitliche Temperaturverläufe an zwei Messstellen im Inneren eines wasserdurchströmten Rohrs

Die Erzeugung dieser Messwerte erfolgte auf Basis eines eigens zu diesem Zweck errichteten Versuchsstands. Eine Darstellung und Beschreibung dieses Versuchsstands finden sich in Abschnitt 3. Jene Auswertalgorithmen, die auch auf Basis experimentell generierter Messwerte vielversprechende Ergebnisse zeigten, wurden optimiert und im Rahmen von AP3 „Energetische Bilanzierung“ für die Auswertung der Messwerte aus den Feldtestanlagen weiterverwendet (siehe Abschnitt 4).

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die entwickelten Auswertalgorithmen beschrieben und deren Tauglichkeit für eine Berechnung des Volumenstroms in flüssigkeitsdurchströmten Rohren erläutert. Anschließend wird die Auswertbarkeit verschiedener Temperaturprofile thematisiert. Hierbei werden Kriterien diskutiert, welche die Tauglichkeit verschiedener Temperaturprofile im Hinblick auf deren Auswertbarkeit charakterisieren. Zudem werden Möglichkeiten erläutert, wie mit Zeiträumen umgegangen werden kann, in denen die Bedingungen für die temperaturbasierte Volumenstromberechnung ungünstig sind.

2.1 Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung des Volumenstroms im Rohr

Nachfolgend werden die verfolgten Ansätze bzw. die auf den Ansätzen basierenden Auswertalgorithmen zur Volumenstromberechnung eines flüssigkeitsdurchströmten Rohrs erläutert und deren Tauglichkeit im Hinblick auf eine Berechnung des Volumenstroms flüssigkeitsdurchströmter Rohre diskutiert.

2.1.1 Distanzmessungen

2.1.1.1 Lokale Maxima

Für die Prüfung dieses Ansatzes auf dessen Tauglichkeit wurden experimentell erzeugte Daten ausgewertet. Hierbei wurden Datenpakete bestehend aus der jeweils gleichen Anzahl an Messwerten verwendet. Anschließend wurden für diese Pakete jeweils die Punkte mit der höchsten Temperatur an Temperatursensor 1 und an Temperatursensor 2 bestimmt. Durch Subtraktion der Indizes dieser beiden Datenpunkte wurde der entsprechende Zeitunterschied berechnet, mit welchem wiederum der Volumenstrom berechnet werden konnte. In Abbildung 2-2 werden die zeitlichen Temperaturverläufe an Temperatursensor 1 und Temperatursensor 2 und die zugehörigen lokalen Maxima dargestellt.

Die Anwendbarkeit dieses Ansatzes beschränkt sich auf Bereiche, in denen die Temperaturen an beiden Temperatursensoren kontinuierlich zunehmen. Ein weiteres Problem dieses Ansatzes besteht darin, dass es sich bei den beiden ermittelten Maxima innerhalb eines definierten Bereichs an Datenpunkten nicht zwingend um einander zugehörige Temperaturspitzen handelt. So können sich die einander zugehörigen Temperaturspitzen gegebenenfalls in benachbarten Datenpaketen befinden. Der zeitliche Abstand wird in diesem Fall falsch berechnet. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

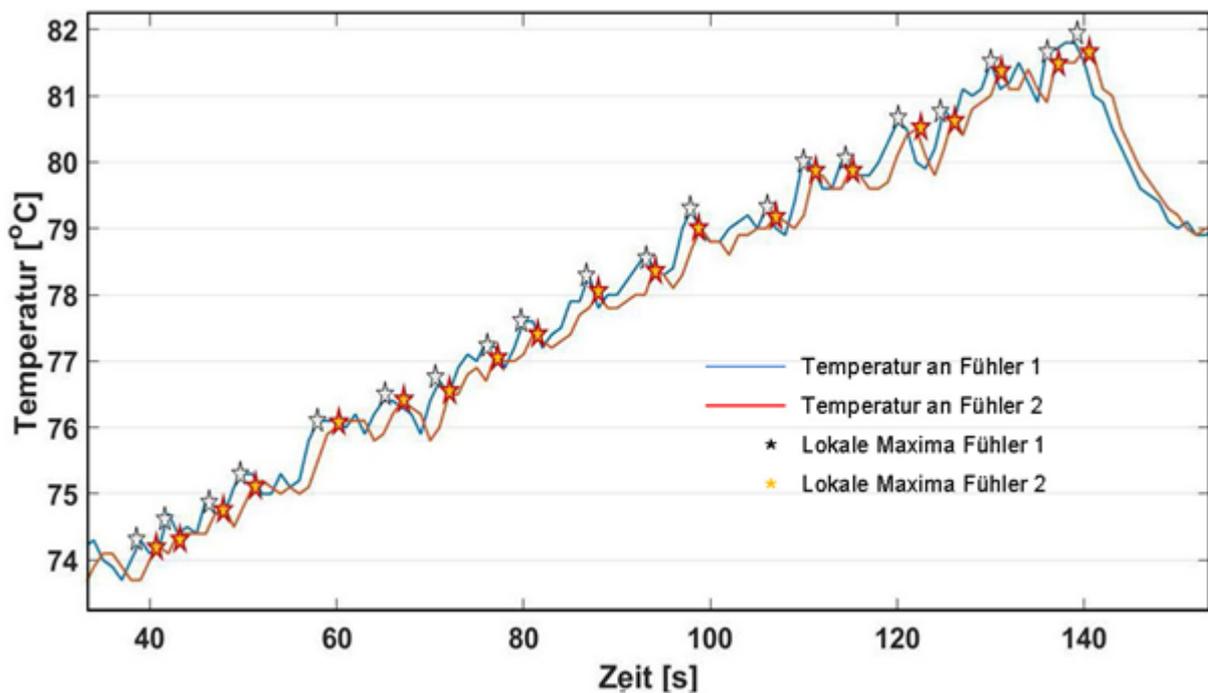


Abbildung 2-2: Temperaturprofile der beiden Temperatursensoren und die jeweiligen lokalen Maxima

2.1.1.2 Polynomfunktionen

Für diesen Ansatz wurde zum einen auf synthetisch erzeugte, d. h. mit dem Simulationsprogramm TRNSYS berechnete und experimentell, mit dem zu diesem Zweck errichteten Versuchsstand, gemessene Messdaten zurückgegriffen. Die Temperaturwerte, die von den beiden Temperatursensoren während der Messung erfasst wurden, wurden verwendet, um jeweils eine Polynomfunktion sechsten Grades zu bestimmen.

Die in Abbildung 2-3 dargestellten Temperaturverläufe wurden auf Basis experimentell erzeugter Messwerte erstellt. Es wird der zeitliche Verlauf der Temperaturwerte an Temperatursensor 1 und an Temperatursensor 2 dargestellt. Zusätzlich sind die Kurvenverläufe der Funktionen sechsten Grades zu erkennen, die den Verlauf der Messwerte beschreiben.

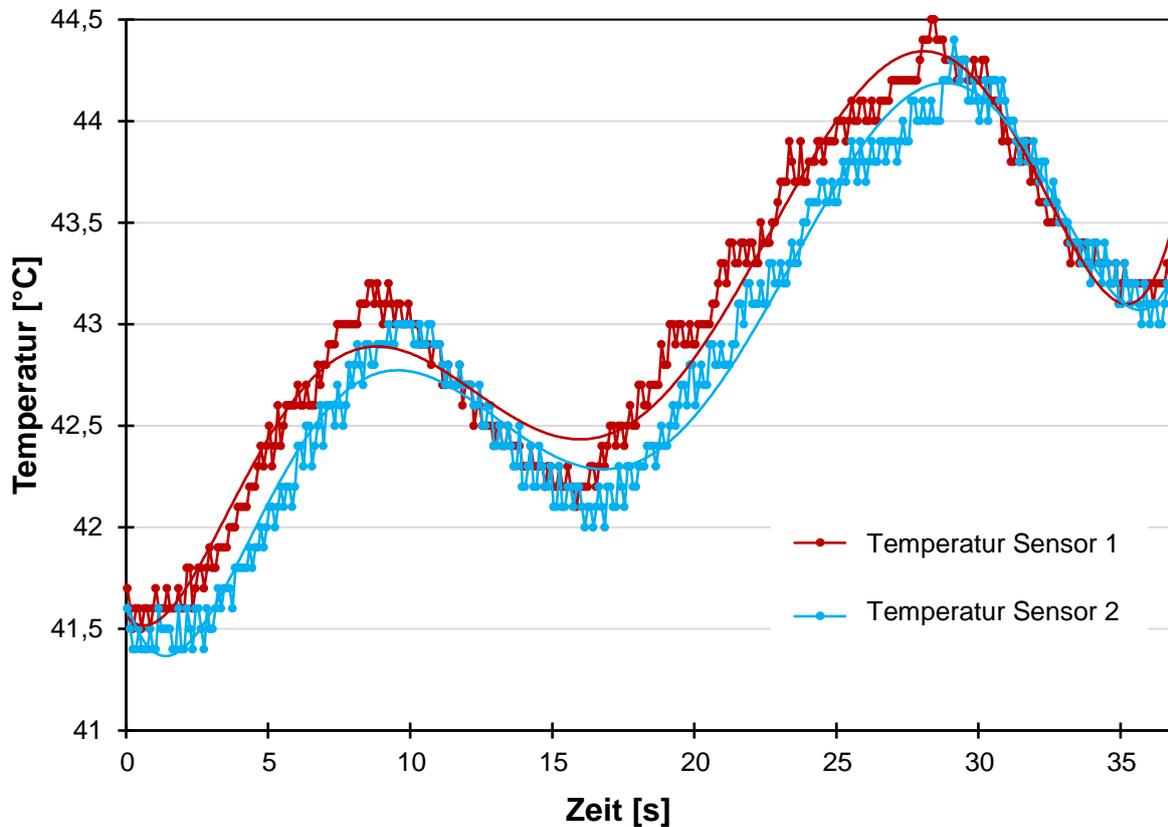


Abbildung 2-3: Messwerte mit Polynomfunktionen

Für die Bestimmung des Zeitunterschieds sollten die Indizes der Extrempunkte dieser Funktionen verwendet werden. Die Ergebnisse auf Basis der ermittelten Polynomfunktionen stellten sich jedoch als unbefriedigend dar. So gelang es nicht, die betrachteten Messwerte mithilfe der Funktionen ausreichend genau zu beschreiben. Dies resultierte in ungenauen Ergebnissen bei der Berechnung des Volumenstroms. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz ebenfalls nicht weiterverfolgt.

2.1.1.3 Mustervergleich

Synthetisch erzeugte Daten wurden genutzt, um den Volumenstrom auf Basis einer Mustererkennung zu bestimmen. Hierbei wurden die Temperaturwerte wiederum in Pakete mit jeweils der gleichen Anzahl an Datenpunkten unterteilt. Muster in den Temperaturwerten der einzelnen Datenpakete von Temperatursensor 1 sollten identifiziert und anschließend in den Datenpaketen von Temperatursensor 2 wiedererkannt werden. Auf Basis der Differenz der jeweiligen Indizes sollte dann der zeitliche Unterschied und anschließend der Volumenstrom bestimmt werden. Für die Erzeugung und Wiedererkennung der Muster wurde die Pearson Korrelation verwendet. Von einer Weiterverfolgung des Ansatzes wurde jedoch abgesehen, da aus den Temperaturwerten der einzelnen Datenpakete keine für einen Vergleich geeigneten Muster erzeugt werden konnten. Der Grund dafür war, dass bei Anwendung der Pearson Korrelation nur lineare Zusammenhänge berücksichtigt werden. Dies erwies sich, aufgrund der Unstetigkeit der Temperaturverläufe, für den hier vorliegenden Anwendungsfall als unzureichend.

2.1.1.4 Differenz der Temperaturen an den Temperatursensoren

Für diesen Ansatz wurde die Differenz der Temperaturen an Temperatursensor 1 und Temperatursensor 2 gebildet. Anschließend wurde für das entstandene Temperaturprofil die erste und die zweite Ableitung auf Basis numerischer Näherung ermittelt. Für die Auswertung wurden synthetisch erzeugte Daten verwendet. Abbildung 2-4 zeigt die genannten Temperaturen und deren Differenz.

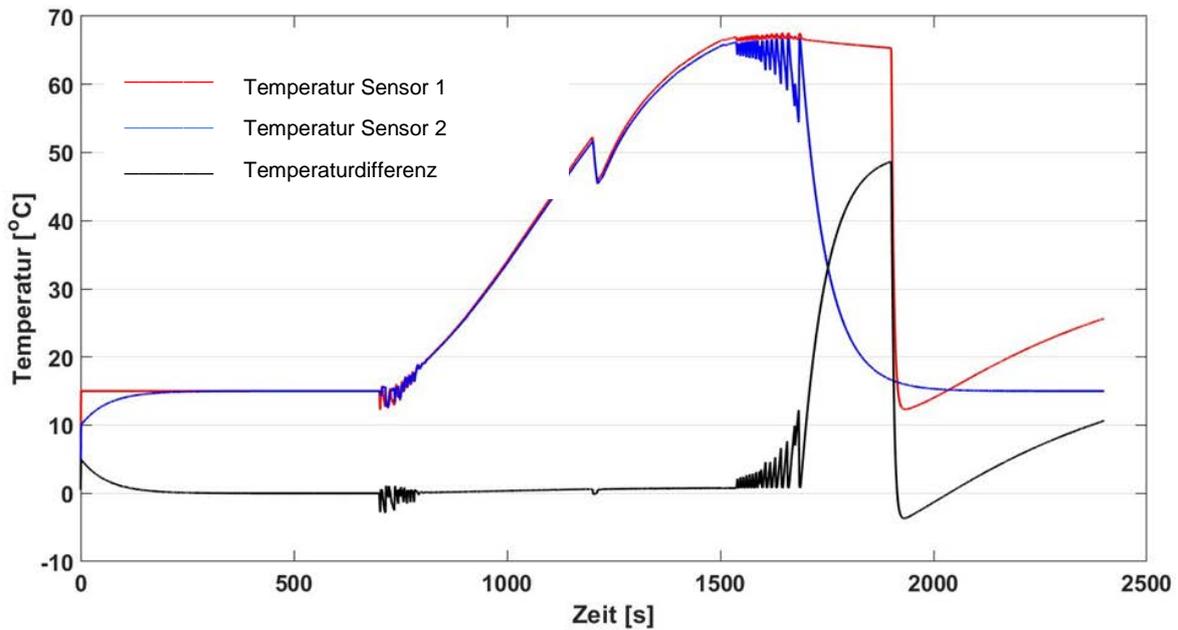


Abbildung 2-4: Temperaturen an den Temperatursensoren und deren Differenz

Es wurde der Versuch unternommen, die Laufzeit der Strömung zwischen den beiden Temperatursensoren anhand des Abstands der Extrempunkte der zweiten Ableitung zu bestimmen. Ein entsprechender Zusammenhang ließ sich allerdings nicht bestätigen, somit wurde dieser Ansatz ebenfalls nicht weiterverfolgt. Abbildung 2-5 stellt die beiden Ableitungen und deren Extrempunkte dar.

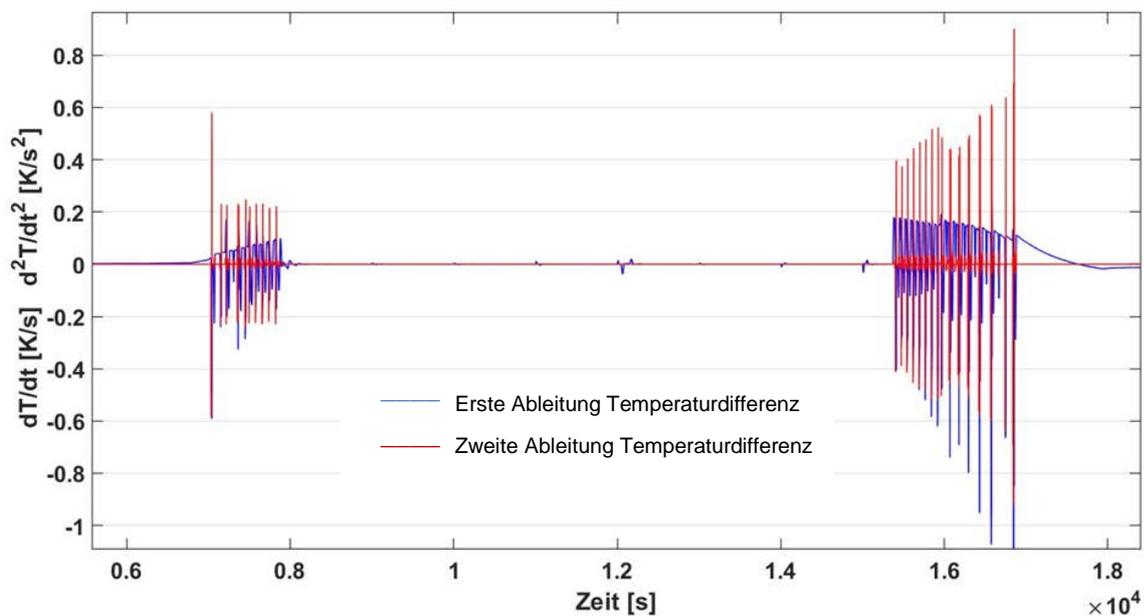


Abbildung 2-5: Erste und zweite Ableitung der Temperaturdifferenz

2.1.1.5 Vergleich benachbarter Temperaturen

Mit dem in diesem Abschnitt beschriebenen Ansatz konnten auf Basis synthetisch erzeugter Messwerte und auf Basis experimentell gemessener Messwerte gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Im Allgemeinen konnten Volumenströme im Bereich von 150 l/h bis 500 l/h mit einer Abweichung von $\pm 1-9\%$ gegenüber dem gemessenen Wert berechnet werden. In Ausnahmefällen betrug die Abweichung bis zu $\pm 12\%$. Diese Ausnahmefälle bestanden vor allem aus kurzfristig auftretenden, stark ausgeprägten Volumenstromänderungen.

Bei dem Ansatz wird zunächst ein willkürlicher Messwert an Temperatursensor 1 ausgewählt und der zugehörige zeitliche Index dieses Datenpunkts ermittelt. Anschließend werden an Temperatursensor 2 Temperaturwerte bestimmt, die möglichst nahe an dem Temperaturwert von Temperatursensor 1 liegen und zu einem späteren Zeitpunkt auftreten als der an Temperatursensor 1 gewählte Messwert. Um herauszufinden, welcher dieser potenziell in Frage kommenden Werte für eine Berechnung des Zeitunterschieds herangezogen werden sollte, werden die Temperaturen der benachbarten Datenpunkte abgefragt. Die Temperaturwerte der benachbarten Punkte aller in Frage kommenden Punkte an Temperatursensor 2 werden jeweils verglichen mit den Temperaturwerten der benachbarten Punkte des ursprünglich gewählten Punkts an Temperatursensor 1. Zur Berechnung des Volumenstroms wird nun jener Punkt von Temperatursensor 2 ausgewählt, dessen Nachbarn einen definierten Abstand zu den Nachbarn des Punkts von Temperatursensor 1 nicht überschreiten. Durch Subtraktion der Indizes der schließlich ermittelten Datenpunkte kann die Laufzeit der Strömung von Temperatursensor 1 bis zu Temperatursensor 2 berechnet werden. Abbildung 2-6 zeigt exemplarisch einzelne Messwerte der beiden Temperatursensoren und dient der Veranschaulichung der Logik des beschriebenen Algorithmus.

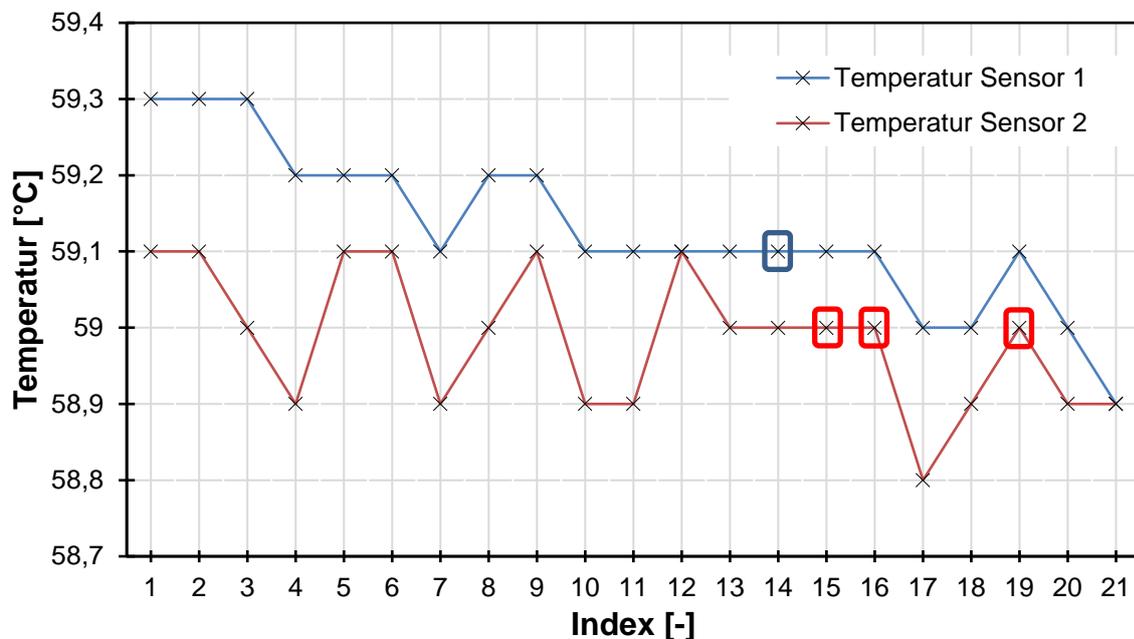


Abbildung 2-6: Einzelne Messwerte – Differenz aufeinanderfolgender Punkte

Wird an Temperatursensor 1 beispielsweise der in Abbildung 2-6 dargestellte Messwert Nr. 14 (blau umrahmt) ausgewählt und es wird eine Toleranz von 0,1 K eingestellt, dann kommen die

Messwerte Nr. 15, 16 und 19 (rot umrahmt) an Temperatursensor 2 in den Betrachtungshorizont. Im nächsten Schritt wird dann geprüft, ob die Abstände der benachbarten Punkte ebenfalls in der gewählten Toleranz liegen. Wird hierfür wiederum eine Toleranz von 0,1 K definiert, so würde der Algorithmus den Messwert Nr. 15 an Temperatursensor 2 dem Messwert Nr. 14 an Temperatursensor 1 zuordnen, da der Abstand von Messwert Nr. 13 (Temperatursensor 1) und Messwert Nr. 14 (Temperatursensor 2) innerhalb der festgelegten Toleranz liegt und dasselbe für den Abstand von Messwert Nr. 15 (Temperatursensor 1) und Messwert Nr. 16 (Temperatursensor 2) gilt. Für die beiden anderen Messwerte von Temperatursensor 2 (Nr. 16 und Nr. 19), die zunächst ebenfalls innerhalb des Betrachtungshorizonts waren, gilt dies nicht. Die Abstände der benachbarten Punkte dieser Messwerte, zu den benachbarten Punkten des an Temperatursensor 1 ausgewählten Messwerts Nr. 14, liegen in jeweils mindestens einem Fall außerhalb der festgelegten Toleranz.

Während der Datenauswertung stellte sich heraus, dass für eine präzise Berechnung des Volumenstroms auf Basis des in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahrens monoton ansteigende oder monoton abfallende Temperaturprofile besonders geeignet sind. Abbildung 2-7 zeigt beispielhaft ein solches Temperaturprofil.

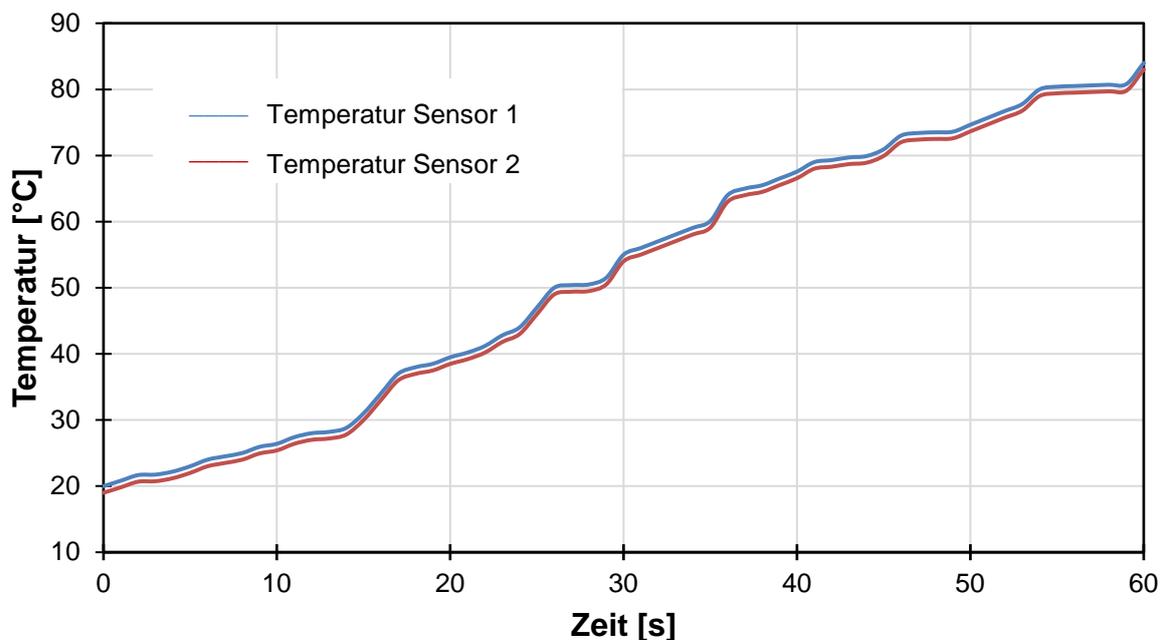


Abbildung 2-7: Näherungsweise monoton ansteigende Temperaturprofile

Ein solches Temperaturprofil lässt sich unter anderem im Solarkreislauf solarthermischer Anlagen beobachten. Er tritt vor allem unmittelbar nach dem Einschalten der Pumpe des Solarkreislaufs auf, wenn im betreffenden Zyklus erstmalig warme Solarflüssigkeit vom Solarkollektor zum Warmwasserspeicher transportiert wird. Durch diesen Umstand sind die beschriebenen Auswertelgorithmen für die Volumenstromberechnung im Solarkreislauf solarthermischer Anlagen besonders geeignet. Abbildung 2-8 zeigt ein entsprechendes gemessenes Temperaturprofil eines Solarkreislaufs. Zu erkennen sind neben den Temperaturen an den beiden Temperatursensoren der Messstrecke der gemessene Volumenstrom und der mittels der genannten Auswertelgorithmen berechnete Volumenstrom. Zwei Bereiche des Temperaturprofils sind für eine Volumenstromberechnung geeignet, da sie eine ausreichende Tempe-

raturdynamik aufweisen und die Temperaturen in diesen Bereichen zunächst monoton ansteigen und anschließend monoton abfallen. Dieser für eine Auswertung vorteilhafte Verlauf ermöglicht eine präzise Berechnung des vorhandenen Volumenstroms. Das betreffende Temperaturprofil wurde anhand realer Messwerte der in-situ vermessenen Feldtestanlage LoT erzeugt, die innerhalb dieses Projekts mit Messtechnik ausgestattet wurde (vgl. Abschnitt 4.1.3).

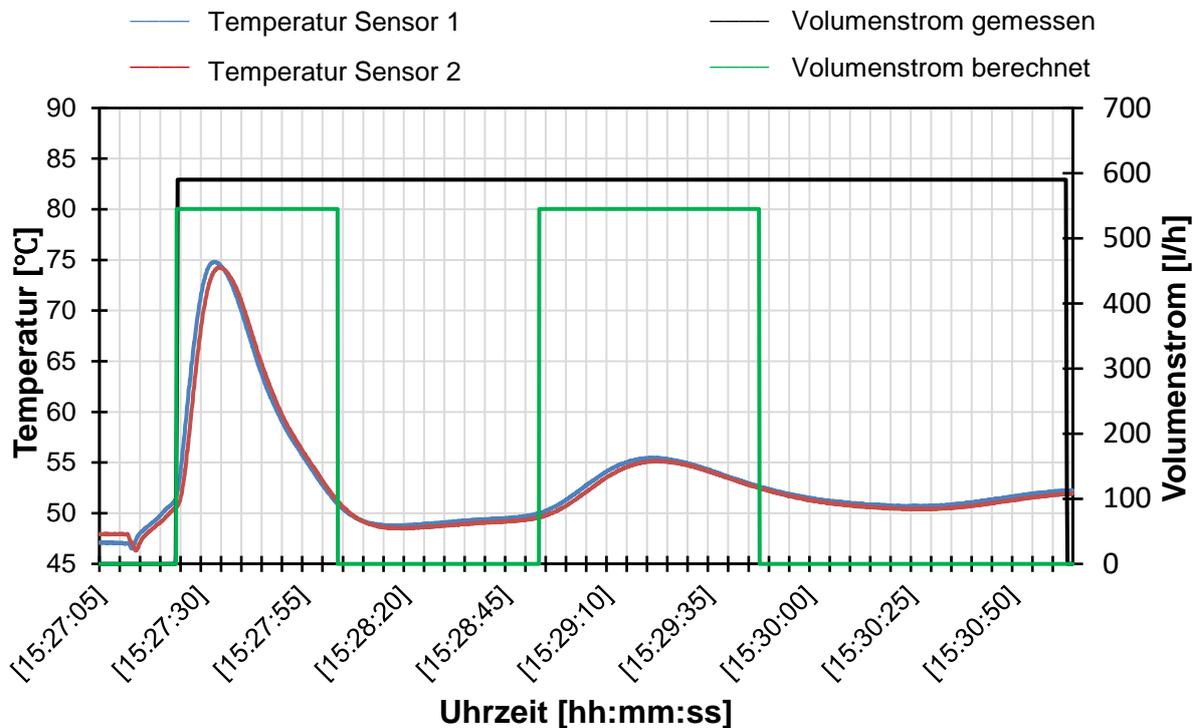


Abbildung 2-8: Exemplarisches Temperaturprofil Solarkreislauf Feldtestanlage LoT

Im Laufe der Datenauswertung zeigte sich allerdings, dass dieser Ansatz im Vergleich zu dem in Abschnitt 2.1.1.9 beschriebenen Ansatz, der auf der Kosinus-Ähnlichkeit basiert, einige Nachteile hat. So weisen die Ergebnisse des auf der Kosinus-Ähnlichkeit basierenden Ansatzes eine höhere Genauigkeit bei einer geringeren Streuung der berechneten Ergebnisse auf. Ein weiterer Vorteil des auf der Kosinus-Ähnlichkeit beruhenden Ansatzes liegt darin, dass bereits bei einer sehr geringen Temperaturdynamik von 0,15 K/s eine zuverlässige Berechnung des Volumenstroms möglich ist. Aus den genannten Gründen wurde entschieden, den in diesem Abschnitt beschriebenen, auf dem Vergleich benachbarter Temperaturen basierenden Ansatz nicht weiter zu verfolgen.

2.1.1.6 Differenz aufeinanderfolgender Punkte

Ein weiterer Ansatz zielte darauf ab, eine bestimmte Anzahl benachbarter Punkte von Temperatursensor 1 auszuwählen und den Temperaturunterschied der einzelnen Datenpunkte zu den Datenpunkten einer entsprechenden Anzahl benachbarter Punkte von Temperatursensor 2 jeweils paarweise zu berechnen. Die einzelnen Differenzen werden zu einer Gesamtabweichung aufaddiert. Anschließend wird der Index der benachbarten Punkte von Temperatursensor 2 um den Wert 1 erhöht und wiederum die zeitliche Gesamtabweichung zu den ursprünglich gewählten Punkten von Temperatursensor 1 bestimmt. Für die Berechnung der Laufzeit wird nun jene Gruppe an Datenpunkten von Temperatursensor 2 verwendet, bei der

die Gesamtabweichung minimal wird. Anschließend wird der Index der Gruppe von Temperatursensor 1 um den Wert 1 erhöht und wiederum die geringste Gesamtabweichung zu allen potenziellen Gruppen von Temperatursensor 2 bestimmt. In Abbildung 2-9 sind exemplarisch einzelne Messwerte dargestellt und die Gruppen an Datenpunkten von Temperatursensor 1 (blau umrahmt) und Temperatursensor 2 (rot umrahmt), die im ersten Berechnungsschritt miteinander verglichen werden.

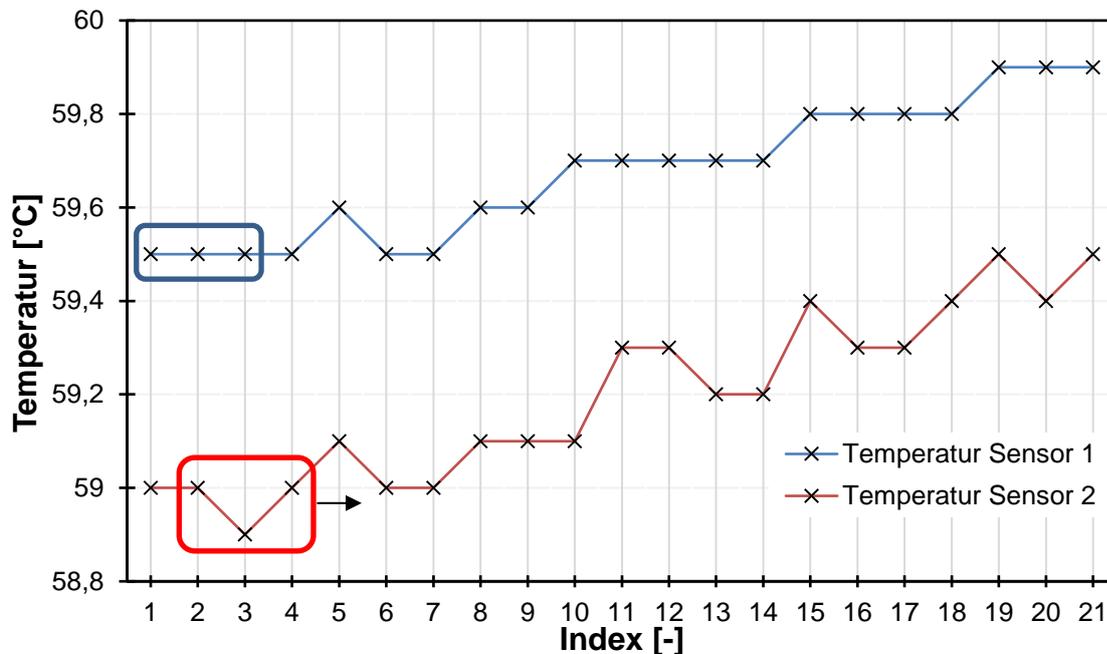


Abbildung 2-9: Einzelne Messwerte – Differenz aufeinanderfolgender Punkte

Im diesem ersten Berechnungsschritt wird die Differenz der Temperaturwerte von Messwert Nr.1 von Temperatursensor 1 und Messwert Nr. 2 von Temperatursensor 2 berechnet. Das Gleiche erfolgt für die Messwerte Nr. 2 von Temperatursensor 1 und Nr. 3 von Temperatursensor 2, sowie für die Messwerte Nr. 3 von Temperatursensor 1 und Nr. 4 von Temperatursensor 2. Anschließend werden die berechneten Differenzen aufsummiert. Im nächsten Schritt werden dann die Messwerte Nr. 3 bis Nr. 5 von Temperatursensor 2 mit der ursprünglich gewählten Gruppe an Messwerten von Temperatursensor 1 verglichen.

Im Verlauf der Datenauswertung zeigte sich, dass der berechnete Volumenstrom bei Verwendung der Algorithmen aus Abschnitt 2.1.1.9 eine höhere Genauigkeit aufweist als jener, der auf den Algorithmen des in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahrens basiert. Dies gilt sowohl für die Volumenstromberechnung auf Basis synthetisch erzeugter, als auch auf Basis experimentell erzeugter Messwerte. Aus diesem Grund wurde auf eine Weiterentwicklung der Auswertalgorithmen, die auf dem in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren basieren, verzichtet. Stattdessen wurde der Fokus u. a. auf eine Weiterentwicklung der im Abschnitt 2.1.1.9 beschriebenen Auswertalgorithmen gelegt.

2.1.1.7 Kreuzkorrelation

Auf Basis der Kreuzkorrelationsfunktion können zeitabhängige Signale auf Ähnlichkeit überprüft und die zeitliche Verschiebung berechnet werden. Eine Übertragbarkeit auf die temperaturflankenbasierte Volumenstrombestimmung erschien möglich und es erfolgte der Versuch einer Umsetzung auf Basis experimentell bestimmter Daten.

Bei der Kreuzkorrelationsfunktion werden die einzelnen Werte der beiden für die Berechnung herangezogenen benachbarten Temperatursequenzen, also jener Sequenz von Temperatursensor 1 und jener Sequenz von Temperatursensor 2, paarweise multipliziert und die Ergebnisse anschließend aufsummiert. Danach werden die miteinander verglichenen Sequenzen jeweils um einen Temperaturwert verschoben und dieselbe Berechnung wird erneut durchgeführt. Durch eine Normierung der errechneten Ergebnisse ergibt sich ein Wert zwischen -1 und +1. Hierbei steht ein Wert von +1 für eine Übereinstimmung der beiden Signale, ein Wert von 0 dafür, dass keine Korrelation zwischen den Signalen besteht und ein Wert von -1 für einen gegenphasigen Verlauf der Signale.

Im Rahmen der Auswertung synthetisch und experimentell ermittelter Daten zeigte sich, dass die Identifikation eines eindeutigen Maximums auf Basis des beschriebenen Verfahrens nur auf unbefriedigende Weise umzusetzen ist und eine exakte Berechnung des Volumenstroms daher nicht realisiert werden kann. Von einer weiteren Verfolgung dieses Ansatzes wurde daher zugunsten besser geeigneter Ansätze abgesehen.

2.1.1.8 Euklidische Distanz

Dieser Ansatz basiert auf der Arbeit von [1] in der ein Berechnungsverfahren entwickelt wurde, das es ermöglicht, die Zeitdifferenz zu berechnen, die eine Rohrströmung benötigt, um die Strecke zwischen zwei Temperatursensoren zurückzulegen. Zur Berechnung dieser Zeitdifferenz wird das Minimum der skalierten euklidischen Metrik κ berechnet. Diese lässt sich anhand der Werte der Temperaturkurven der beiden Temperatursensoren berechnen. Hierbei wird die Temperaturkurve von Temperatursensor Nr. 2 systematisch gegenüber der Temperaturkurve von Temperatursensor Nr. 1 verschoben. Für jeden Verschiebungsschritt wird κ gemäß Gleichung (2-1) berechnet. Die zeitliche Verschiebung, die dem minimalen Wert von κ zugeordnet ist, steht für die gesuchte Zeitdifferenz.

$$\kappa(t_{lag}) = \frac{1}{\sqrt{2d+1}} \sqrt{\sum_{i=-d}^{+d} ((T_i^{in}(t - t_{lag}) - T_i^{out}(t))^2)} \quad (2-1)$$

mit:

κ	skalierte euklidische Metrik [-]
t_{lag}	zeitliche Verschiebung [s]
t	Zeitschritt [s]
d	Anzahl berücksichtigter Messwerte [-]
T^{in}	Temperatur Sensor 1 [K]
T^{out}	Temperatur Sensor 2 [K]

Für die Anwendung des beschriebenen Verfahrens in diesem Projekt stellte es sich als hinderlich heraus, dass die gemessenen Temperaturkurven viele kleine Fluktuationen, d. h. ein sogenanntes Rauschen, aufweisen, das auf die verwendete Messtechnik zurückzuführen ist

(siehe z. B. Abbildung 2-1). Diese Fluktuationen sind in Bezug auf die tatsächlich vorliegenden Temperaturänderungen zwischen den einzelnen erfassten Temperaturwerten relativ hoch, was auf die Verwendung einer relativ kostengünstigen Messtechnik und auf eine benötigte hohe zeitliche Auflösung von zehn Messwerten je Sekunde zurückzuführen ist. Durch diesen Umstand wurde die Identifikation eines eindeutigen Minimums von α erschwert. Aus diesem Grund wurde das Verfahren an die spezifischen Gegebenheiten angepasst. Die Anpassung bestand unter anderem darin, dass nicht nur der minimale Wert von α für eine Berechnung der Zeitdifferenz verwendet wird, sondern stattdessen die beiden kleinsten Werte von α herangezogen werden. Aus den jeweils zugehörigen Zeitdifferenzen erfolgt die Berechnung eines Mittelwerts, der anschließend für die Berechnung des Volumenstroms verwendet wird.

Das entsprechend angepasste Verfahren erzielte sowohl auf Basis synthetisch als auch experimentell ermittelter Messwerte gute bis sehr gute Ergebnisse. Die Abweichungen der berechneten Volumenströme im Bereich von 150 l/h bis 500 l/h gegenüber den Referenzwerten lagen im Allgemeinen bei $\pm 2 - 8 \%$. In Ausnahmefällen, d. h. bei erheblichen Volumenstromänderungen, die innerhalb einer Sequenz auftraten, auf deren Basis die Berechnung des Volumenstroms erfolgte, betrug die Abweichung bis zu $\pm 11 \%$. Voraussetzung für eine präzise Berechnung stellte hierbei das Vorhandensein auszuwertender Temperaturprofile dar, die einen Verlauf aufweisen, der einer Sinusfunktion ähnelt. Solche Temperaturprofile können erzeugt werden, indem von außen gezielt Wärme in das betrachtete System, in diesem Fall also in das wasserdurchströmte Rohr, eingebracht wird. Hierfür kann ein in die Strömung eingebrachter elektrischer Heizstab verwendet werden, der wiederholt ein- und ausgeschaltet wird. Eine detailliertere Beschreibung dieses Vorgehens findet sich in Kapitel 3.

Abbildung 2-10 zeigt ein beispielhaftes Temperaturprofil, das einen für die Auswertung günstigen Verlauf aufweist. Die auf diesem Ansatz basierenden Auswertelgorithmen wurden im Verlauf der weiteren Projektbearbeitung für die Volumenstromberechnung verwendet und auf Basis der hierbei gewonnenen Erfahrungen kontinuierlich verbessert.

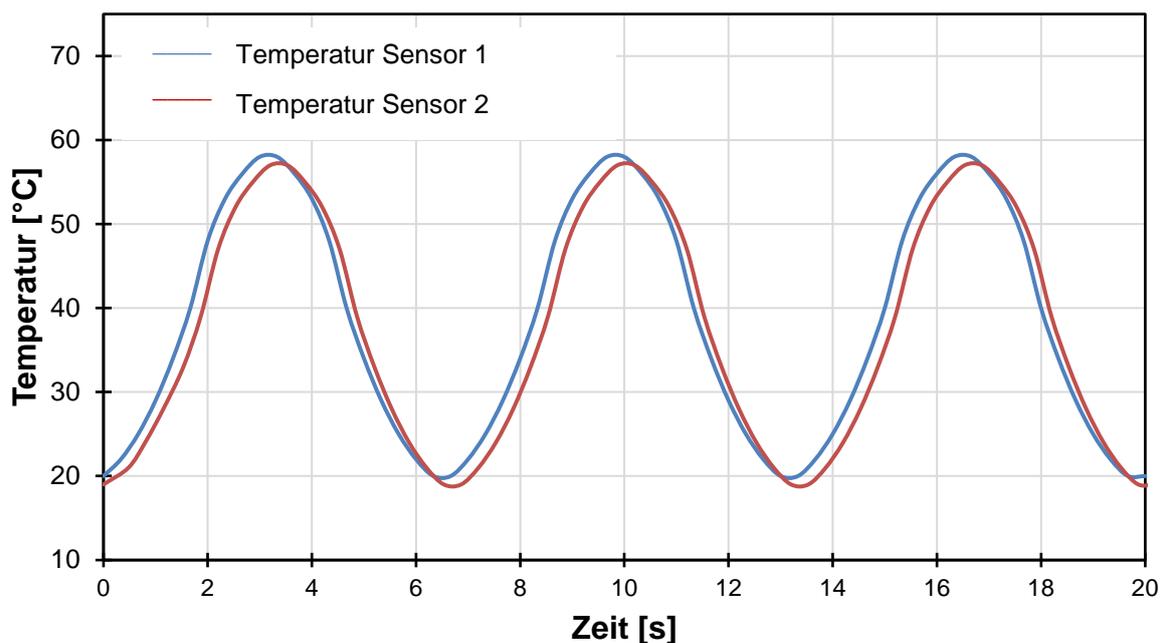


Abbildung 2-10: Näherungsweise sinusförmige Temperaturprofile

Im weiteren Projektverlauf wurde ein detaillierter Vergleich zwischen den Ansätzen, die auf der Kreuzkorrelation, der hier beschriebenen euklidischen Distanz und der im folgenden Abschnitt beschriebenen Kosinus-Ähnlichkeit basieren, durchgeführt; siehe hierzu Abschnitt 2.1.3. Es zeigte sich, dass der auf der Kosinus-Ähnlichkeit beruhende Ansatz den beiden anderen Ansätzen überlegen ist. Diese Überlegenheit zeigt sich vor allem darin, dass die berechneten Ergebnisse eine geringere Streuung und somit eine höhere Zuverlässigkeit aufweisen. Auf eine weitere Verfolgung der auf der euklidischen Distanz bzw. der Kreuzkorrelation basierenden Ansätze wurde daher im Folgenden verzichtet.

2.1.1.9 Kosinus-Ähnlichkeit

Ein weiterer im Verlauf der Projektbearbeitung verfolgter Ansatz beruht auf der Kosinus-Ähnlichkeit zweier Vektoren $a (x_a, y_a)$ und $b (x_b, y_b)$. Er lieferte auf Basis experimentell und synthetisch ermittelter Messwerte sehr gute Ergebnisse. So konnten Volumenströme zwischen 60 l/h und 950 l/h im Allgemeinen mit einer Abweichung von $\pm 1-6\%$ gegenüber dem Referenzwert berechnet werden. In Ausnahmefällen wie z. B. im Übergangsbereich von ausgeprägten Volumenstromänderungen, betrug die Abweichung bis zu $\pm 9\%$. Für die Bestimmung der Kosinus-Ähnlichkeit wird der Winkel ρ herangezogen, den die beiden Vektoren aufspannen. Die Kosinus-Ähnlichkeit berechnet sich gemäß Gleichung (2-2) zu:

$$\kappa = 1 - \frac{a \cdot b}{\|a\| \|b\|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i)^2}} \quad (2-2)$$

mit:

- a Vektor a [-]
- b Vektor b [-]
- n Dimension der Vektoren [-]

Die Kosinus-Ähnlichkeit nimmt hierbei Werte zwischen null und zwei an, wobei ein Wert von null für eine maximale Ähnlichkeit der beiden Vektoren steht. Die Berechnung der Kosinus-Ähnlichkeit lässt sich auf den Vergleich von Datenpunkten übertragen. Für die Anwendung des Verfahrens zur Volumenstromberechnung zeigte sich, dass wiederum Temperaturprofile besonders geeignet sind, die, wie in Abschnitt 2.1.1.8 geschildert, einen näherungsweise sinusförmigen, periodischen Verlauf aufweisen.

Die Kosinus-Ähnlichkeit stellte sich während des dritten Berichtszeitraums als das geeignetste der betrachteten Verfahren heraus. Ein detaillierter Vergleich der erzielbaren Genauigkeit bei der Volumenstromberechnung unter Verwendung der Kosinus-Ähnlichkeit, der Euklidischen Distanz und der Kreuzkorrelation findet sich in Abschnitt 2.1.3. In der Folge wurde daher im weiteren Verlauf des Projekts nur das auf der Kosinus-Ähnlichkeit beruhende Verfahren verwendet und parallel hierzu weiterentwickelt. Die übrigen Verfahren zur Distanzmessung wurden nicht weiterverfolgt, um die vorhandenen personellen Ressourcen möglichst effizient einzusetzen.

2.1.2 Verschiebung der zu vergleichenden Segmente

Neben der Bedeutung der Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Distanzmessung (siehe Abschnitt 2.1.1) und der Weiterentwicklung der auf diesem Verfahren basierenden Auswertelgorithmen stellte sich im Lauf der Verfahrensentwicklung heraus, dass auch das Vorgehen bei der Verschiebung der miteinander zu vergleichenden Segmente der Temperaturwerte von Temperatursensor 1 und Temperatursensor 2 einen großen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit bei der Volumenstromberechnung hat. Daher wurde für das Verschieben dieser Segmente ein spezielles Vorgehen entwickelt, das im Folgenden erläutert wird.

Zunächst wurde für die schrittweise Überprüfung der Ähnlichkeit einer Reihe von Temperaturwerten von Temperatursensor 1 und einer Reihe von Temperaturwerten von Temperatursensor 2 so vorgegangen, dass das ursprünglich von Temperatursensor 1 ausgewählte Segment im Verlauf der Auswertung nicht verschoben wurde. Nur das von Temperatursensor 2 ausgewählte Segment wurde Schritt für Schritt um jeweils einen Messwert entlang der Zeitachse verschoben und jeweils die Ähnlichkeit der Temperaturwerte von Temperatursensor 1 und der Temperaturwerte von Temperatursensor 2 gemäß dem jeweiligen Berechnungsverfahren bestimmt. Siehe hierzu Gleichungen (2-1) und (2-2). Das Ziel dieses Vorgehens besteht darin, einen Extrempunkt des Werts κ zu identifizieren, der die Ähnlichkeit der beiden miteinander verglichenen Segmente charakterisiert. Die Anzahl der erforderlichen Verschiebungsschritte des Segments von Temperatursensor 2, bis zum Erreichen des Extrempunkts von κ , repräsentiert hierbei die Zeit, die die Strömung benötigt, um die Strecke zwischen den beiden Temperatursensoren zurückzulegen. Bei Kenntnis der Rohrgeometrie kann anschließend der Volumenstrom der Rohrströmung berechnet werden. Die Bestimmung eines klar erkennbaren Extremwerts von κ gestaltete sich auf Basis dieses Vorgehens (im Folgenden V1 genannt) allerdings schwierig, da die Extremwerte nur geringfügig von benachbarten Werten abweichen; siehe hierzu auch den in Abbildung 2-12 in rot dargestellten Kurvenverlauf von „Kappa_V1“.

Aus diesem Grund wurde das Vorgehen abgewandelt. Bei dem abgewandelten Vorgehen, im Folgenden V2 genannt, wird zunächst die maximal zu erwartende Zeit, die die Strömung für das Zurücklegen der Strecke zwischen den beiden Temperatursensoren benötigt, rechnerisch abgeschätzt. Danach wird ein Segment der Temperaturwerte von Temperatursensor 1 ausgewählt, das sich in dem Zeitbereich befindet, in dem der Volumenstrom berechnet werden soll. Dann wird das Segment der Temperaturwerte von Temperatursensor 2 ermittelt, dessen Temperaturen zu denselben Zeitpunkten gemessen wurden wie die des zuvor für Temperatursensor 1 gewählten Segments. Anschließend wird die Ähnlichkeit der beiden Segmente ermittelt. Danach erfolgt die Verschiebung der Segmente. Hierbei wird das Segment von Temperatursensor 1 um eine Indexposition entgegen der Zeitachse verschoben und gleichzeitig das Segment von Temperatursensor 2 um eine Indexposition entlang der Zeitachse verschoben. Gleichzeitig verkürzt sich das Temperatursegment von Temperatursensor 1 um das letzte beinhaltete Element und das Temperatursegment von Temperatursensor 2 verkürzt sich um das erste beinhaltete Element. Es folgt eine erneute Ermittlung der Ähnlichkeit der sich ergebenden Segmente von Temperatursensor 1 und Temperatursensor 2 gefolgt von einer erneuten Verschiebung und Verkürzung. Abbildung 2-11 stellt den beschriebenen Prozess schematisch dar. Die Verschiebung der beiden Segmente wird solange fortgeführt, bis die anfangs abgeschätzte, maximale Zeit, die die Strömung für das Zurücklegen der Strecke zwischen den beiden Temperatursensoren benötigt, erreicht wird. Die ursprüngliche Länge der Segmente von Temperatursensor 1 und von Temperatursensor 2 wird in Abbildung 2-11 durch die Länge der

grauen, horizontalen Balken dargestellt und mit dem Buchstaben n bezeichnet. Die Bezeichnung t_k steht in Abbildung 2-11 für die angenommene, maximale Zeit, die die Strömung für das Zurücklegen der Strecke zwischen den zwei Temperatursensoren in der Messstrecke benötigt. Der Index k steht in diesem Zusammenhang für die zugehörige Anzahl der Verschiebungsschritte.

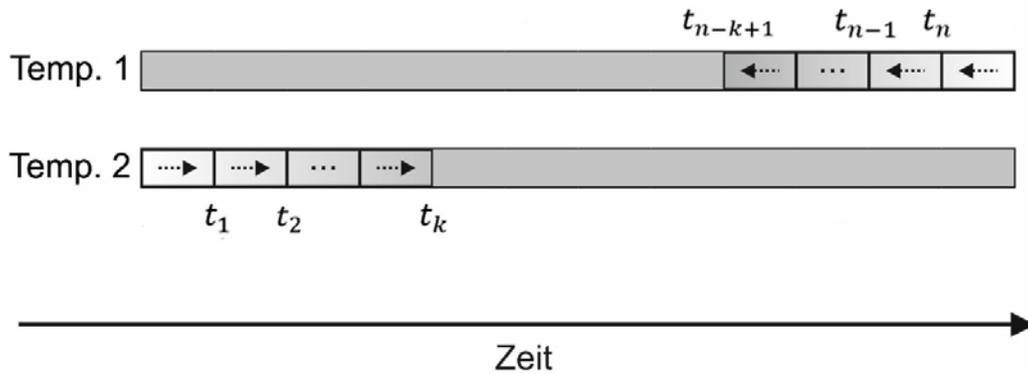


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung des Verschiebungsprozesses nach Vorgehen V2

Bei Verwendung des Distanzmessungsverfahrens der Kosinus-Ähnlichkeit steht ein Minimum von κ für eine maximale Ähnlichkeit zwischen den beiden miteinander verglichenen Temperatursegmenten. Es ist in Abbildung 2-12 zu erkennen, dass bei Verwendung von V2 ein eindeutiges Minimum bei Verschiebungsschritt 16 vorliegt. Ein eindeutiges Minimum bei Verwendung des Vorgehens V1 lässt sich dagegen weniger klar identifizieren. Bei einer Auswertung einer Vielzahl von Messdaten zeigte sich, dass generell Extremwerte von κ , bei der Verwendung des Vorgehens V2, deutlich besser identifiziert werden können, als bei Verwendung entsprechend Vorgehen V1.

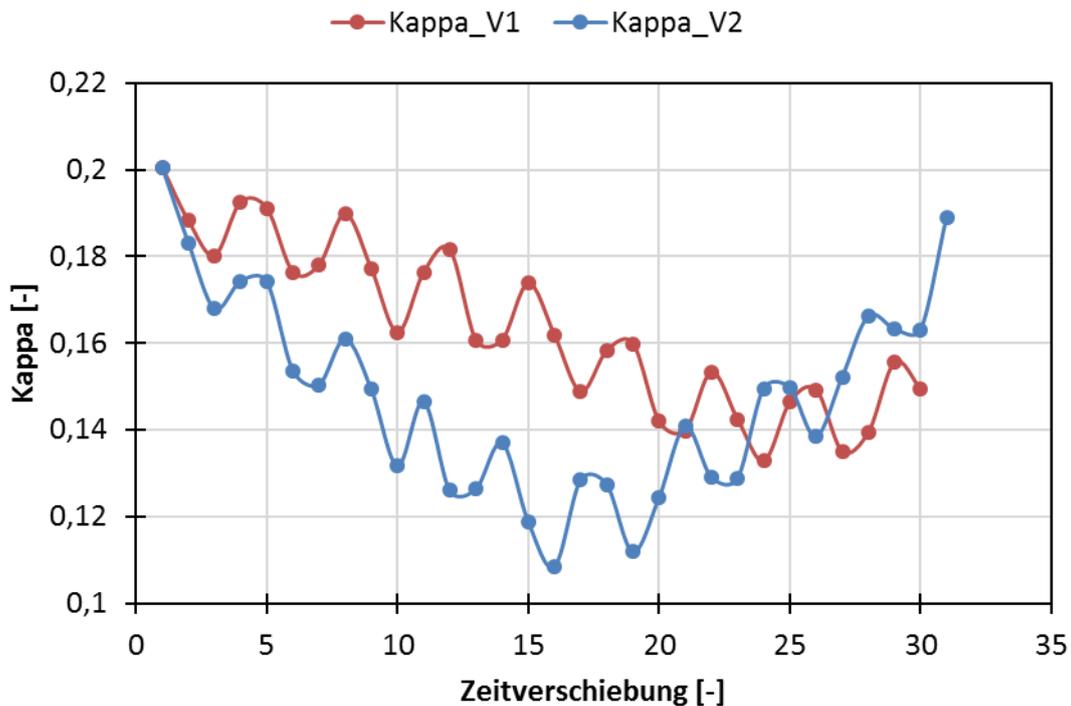


Abbildung 2-12: Ähnlichkeit zwischen zwei Temperatursegmenten bei Verwendung von Vorgehen V1 (rot) und V2 (blau)

2.1.3 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt ein Vergleich der Berechnungsergebnisse bei Verwendung der beiden im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Verschiebungsverfahren V1 und V2 in Kombination mit den Verfahren zur Distanzmessung auf Basis der Kreuzkorrelation, der Euklidischen Distanz und der Kosinus-Ähnlichkeit. Die Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die betrachteten Kombinationen.

Tabelle 2-1: Überblick der betrachteten kombinierten Auswerteverfahren

Kurzbezeichnung	Verschiebungsverfahren	Verfahren zur Distanzmessung
V1-kk	V1	Kreuzkorrelation
V1-eu	V1	Euklidische Distanz
V1-kä	V1	Kosinus-Ähnlichkeit
V2-kk	V2	Kreuzkorrelation
V2-eu	V2	Euklidische Distanz
V2-kä	V2	Kosinus-Ähnlichkeit

Die verwendeten Messwerte wurden mittels des Versuchsstands (siehe Abschnitt 3) generiert. Hierbei wurde ein elektrischer Heizstab mit einer Heizleistung von $P_{ei}=1,6$ kW verwendet, um thermische Energie in die Strömung einzubringen. Der elektrische Heizstab wurde für jeweils 1,5 Sekunden eingeschaltet und anschließend für 3,5 Sekunden ausgeschaltet. Die Abweichung zwischen dem gemessenen Volumenstrom und dem berechneten Volumenstrom wird in Abbildung 2-13 dargestellt. Bei den angegebenen Werten für den Volumenstrom handelt es sich jeweils um minütliche Durchschnittswerte. In Abbildung 2-13 wurde auf die Darstellung von V2-kk verzichtet, da diese Kombination mit Ausnahme einer Versuchsreihe sehr große Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Volumenströmen aufweist.

Die Verschiebungsverfahren V1-eu (orange) weist bei einigen Versuchsreihen sehr große und bei einigen Versuchsreihen sehr geringe Abweichungen auf. Es liegt demnach eine hohe Streuung der Ergebnisse vor. V1-kk (grün), V1-kä (hellblau), V2-eu (rot) und V2-kä (dunkelblau) zeigen über alle Versuchsreihen im Vergleich zueinander ähnlich geringe Abweichungen zwischen dem berechneten und dem gemessenen Volumenstrom. Die Genauigkeit der Ergebnisse bei Verwendung der Kombination V2-kä (dunkelblau) ist allerdings im Vergleich zu der Genauigkeit der alternativen Kombinationen in geringerem Maße Schwankungen unterworfen. Auch treten bei Verwendung von V2-kä, im Gegensatz zu den alternativen Kombinationen, bei einzelnen Ergebnissen keine Abweichungen von mehr als 20 % auf. Aufgrund dieser höheren Zuverlässigkeit wurde die Kombination V2-kä ausgewählt und deren Tauglichkeit für eine präzise und zuverlässige Volumenstromberechnung im Detail geprüft, siehe hierzu Abschnitt 2.1.3.1.

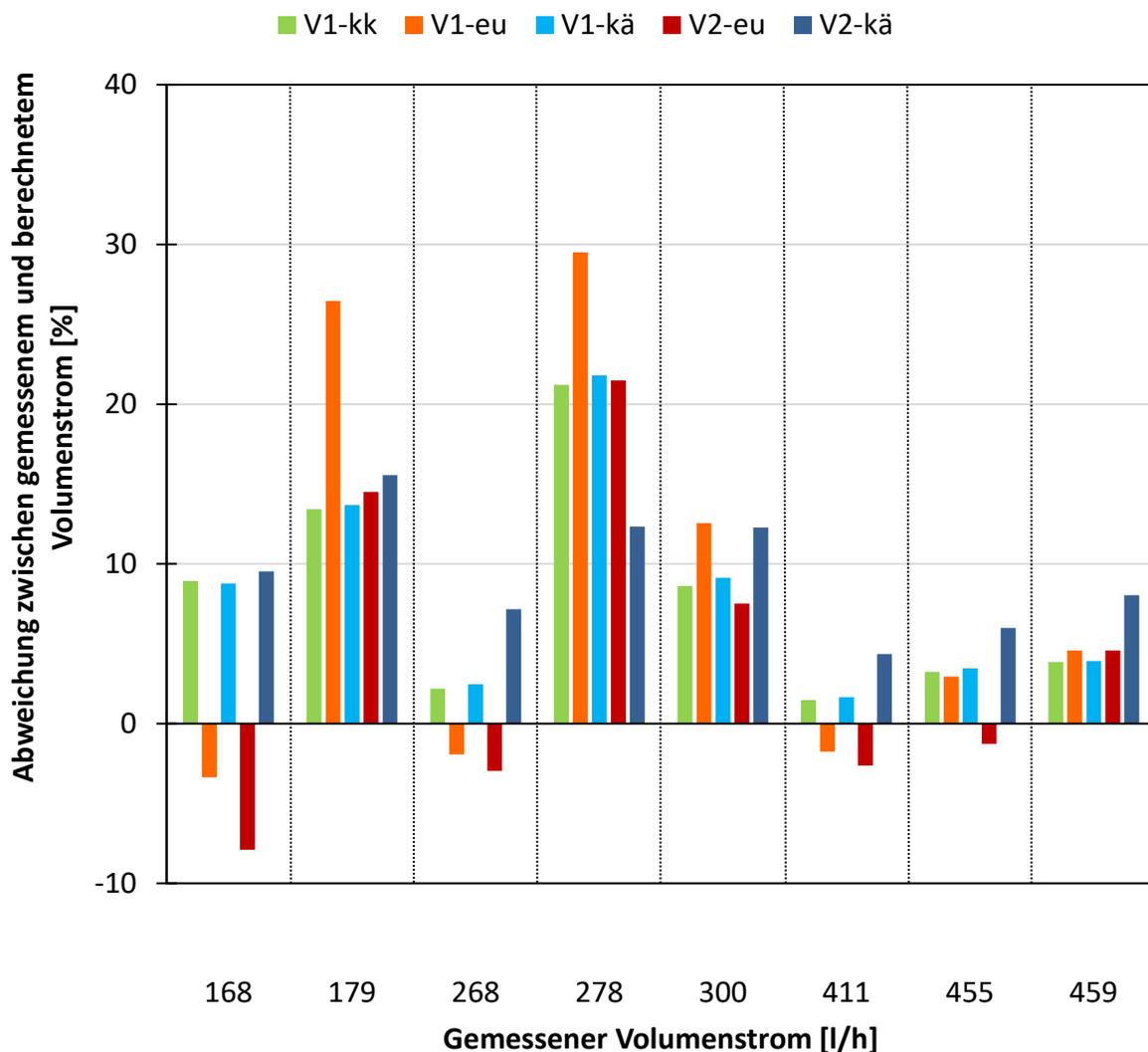


Abbildung 2-13: Präzision der Volumenstromberechnung auf Basis unterschiedlich kombinierter Auswerteverfahren bei Verwendung von Ergebnissen aus Einzelmessungen

2.1.3.1 Prüfung der Tauglichkeit der Verfahrenskombination V2-kä

Um die Tauglichkeit der Verfahrenskombination V2-kä detaillierter zu untersuchen, wurden Datensätze mit unterschiedlichen Randbedingungen erstellt. Das in Abbildung 2-14 dargestellte Temperaturprofil wurde erzeugt, indem gleichzeitig zwei elektrische Heizstäbe am Versuchsstand eingesetzt wurden. Der primäre elektrische Heizstab mit einer elektrischen Leistung von 2 kW wurde hierbei dauerhaft aktiviert, um das grundsätzlich ansteigende Temperaturprofil zu realisieren und einen möglichst großen Temperaturbereich abzudecken. Zusätzlich wurde der sekundäre elektrische Heizstab mit einer elektrischen Leistung von 1,6 kW periodisch aktiviert, wodurch die zu erkennenden Temperaturschwankungen entstanden sind. Der sekundäre elektrische Heizstab des Versuchsstands wurde hierbei für jeweils 4,5 Sekunden aktiviert und für 6,0 Sekunden deaktiviert. Die Schwankungen des gemessenen Volumenstroms resultierten aus einem Abfall der Versorgungsspannung der in den Versuchsstand installierten Pumpe. Dieser Spannungsabfall hatte eine Abnahme der Pumpendrehzahl zur Folge und wurde durch die Aktivierung des sekundären elektrischen Heizstabs verursacht. Der

betrachtete Temperaturbereich reicht von 30 °C bis 80 °C und entspricht somit im Wesentlichen dem Temperaturbereich, der auch im regulären Betrieb der Feldtestanlagen zu erwarten ist.

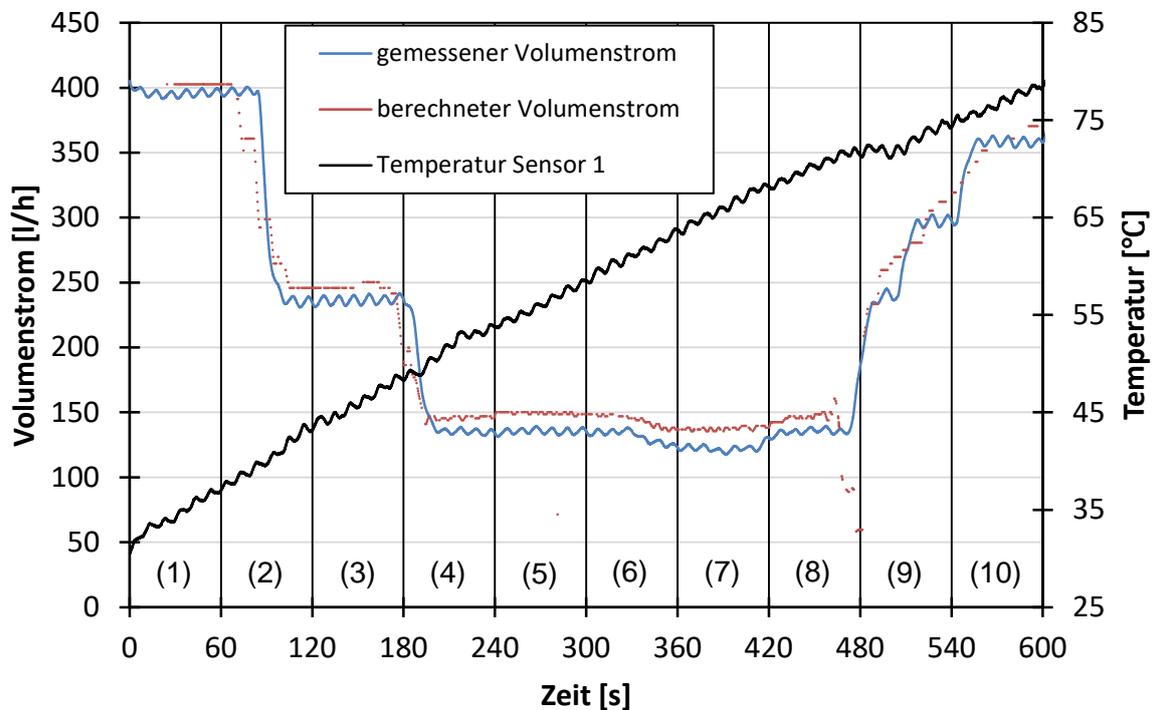


Abbildung 2-14: Gemessener und berechneter Volumenstrom innerhalb der Abschnitte (1) bis (10) von Datensatz 1

In Abbildung 2-14 ist für den Datensatz 1 die Temperatur der Strömung beim Eintritt in die Messstecke an Temperatursensor 1 dargestellt. Die Temperatur an Temperatursensor 2 ist nicht dargestellt, da diese beinahe identisch mit der Temperatur an Temperatursensor 1 ist. Zudem ist der mit der Verfahrenskombination V2-kä berechnete und der mithilfe eines magnetisch induktiven Durchflussmessers (MID) gemessene Volumenstrom aufgetragen. Der gemessene Volumenstrom liegt hierbei in einem Bereich zwischen 120 und 400 l/h.

Einzelne Ausreißer der Temperaturmessung für die Berechnung des Volumenstroms wurden entfernt. Die Identifikation der Ausreißer erfolgte hierbei auf Basis der Ausprägtheit der Ähnlichkeit zwischen den beiden miteinander verglichenen Temperatursegmenten von Temperatursensor 1 und Temperatursensor 2, siehe hierzu Abbildung 2-12. Lag der Abstand der Zeitindizes zwischen den beiden kleinsten Werten von Kappa bei weniger als 5 Zeitschritten bzw. 0,5 Sekunden, wurde der Mittelwert der beiden Zeitindizes für eine Berechnung des Volumenstroms verwendet. Andernfalls wurde der betreffende Wert als Ausreißer betrachtet und nicht für eine Berechnung des Volumenstroms herangezogen. Nach Entfernung der Ausreißer verbleiben für 47,24 % der Betriebszeit berechnete Werte für den Volumenstrom.

In Tabelle 2-2 wird für Datensatz 1 die Abweichung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Volumenstrom auf Basis minütlicher Durchschnittswerte aufgeführt.

Tabelle 2-2: Abweichung des berechneten gegenüber dem gemessenen Volumenstrom bei Verwendung minütlicher Durchschnittswerte – Datensatz 1

Abschnitt von Datensatz 1 (gemäß Abb. 2-14)	Berechneter Vo- lumenstrom [l/h]	Gemessener Vo- lumenstrom [l/h]	Abwei- chung [%]
1	393,44	396,24	-0,71
2	252,11	250,44	0,67
3	210,36	213,53	-1,49
4	147,62	135,16	9,22
5	147,92	135,31	9,32
6	139,13	126,55	9,94
7	140,63	127,21	10,55
8	175,93	176,89	-0,54
9	305,05	308,29	-1,05
10	358,91	371,49	-3,39

Aus Tabelle 2-2 ist ersichtlich, dass die Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Volumenstrom, bis auf Abschnitt 7, innerhalb von $\pm 10\%$ liegt.

Um die Tauglichkeit der Verfahrenskombination V2-kä auch in einem höheren Volumenstrombereich zu prüfen, wurde der Volumenstrom für die Erstellung von Datensatz 2 erhöht und lag in einem Bereich zwischen 400 und 910 l/h. Der gemessene und der berechnete Volumenstrom sowie die Temperatur der Strömung an Temperatursensor 1 sind in Abbildung 2-15 dargestellt.

Auch in Abbildung 2-15 sind Schwankungen in der gemessenen Temperatur und in dem gemessenen Volumenstrom zu erkennen. Diese Schwankungen resultieren, wie bereits in Zusammenhang mit Abbildung 2-14 erläutert, aus der periodischen Aktivierung des sekundären elektrischen Heizstabs. Nach Entfernung der Ausreißer verbleiben beim Datensatz 2 für 46,15 % der Betriebszeit Werte für den berechneten Volumenstrom. Es ist anhand von Abbildung 2-15 erkennbar, dass die berechneten und die gemessenen Werten des Volumenstroms gut übereinstimmen. In Tabelle 2-3 wird für Datensatz 2 die Abweichung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Volumenstrom auf Basis minütlicher Durchschnittswerte aufgeführt.

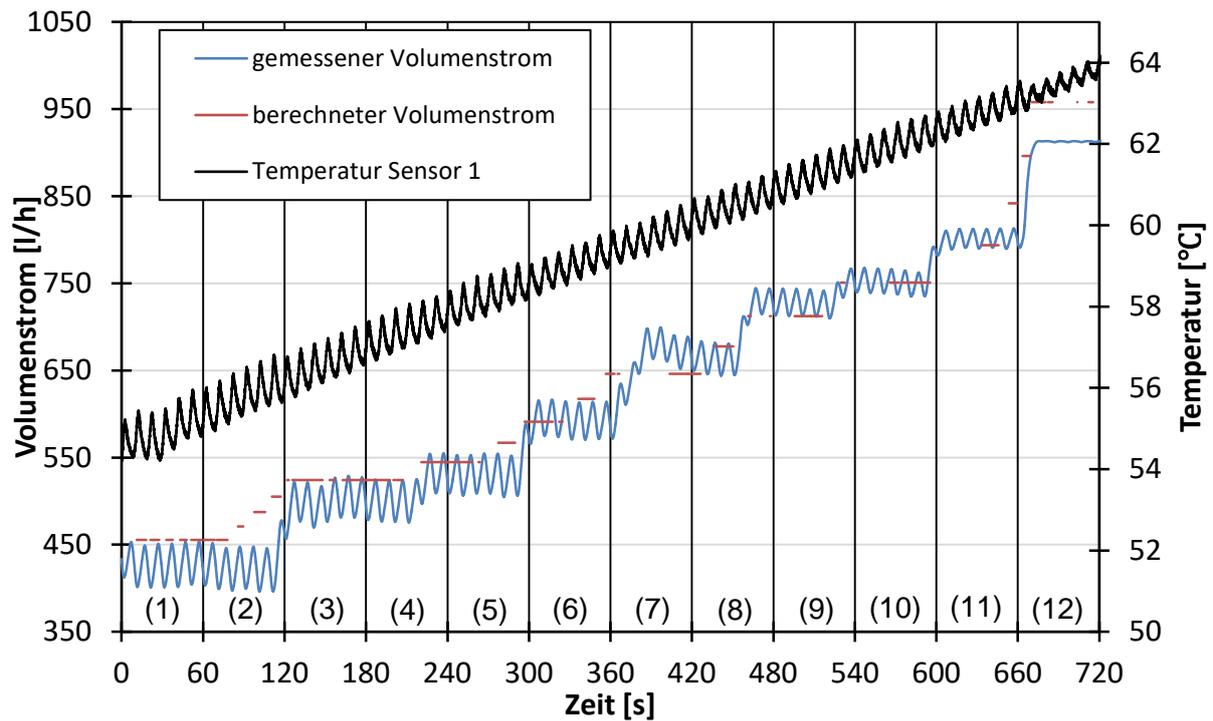


Abbildung 2-15: Gemessener und berechneter Volumenstrom innerhalb der Abschnitte (1) bis (12) von Datensatz 2

Tabelle 2-3: Abweichung des berechneten gegenüber dem gemessenen Volumenstrom bei Verwendung minütlicher Durchschnittswerte – Datensatz 2

Abschnitt von Datensatz 2 (gemäß Abb. 2-15)	Berechneter Vo- lumenstrom [l/h]	Gemessener Vo- lumenstrom [l/h]	Abwei- chung [%]
1	455,45	426,44	6,80
2	488,30	436,85	11,78
3	524,20	500,52	4,73
4	538,51	515,07	4,55
5	570,10	544,09	4,78
6	616,43	595,06	3,59
7	627,52	667,38	-5,97
8	683,59	698,23	-2,10
9	717,45	736,38	-2,57
10	750,87	761,48	-1,39
11	830,55	807,26	2,88
12	958,01	912,54	4,98

Aus Tabelle 2-3 ist ersichtlich, dass auch beim Datensatz 2, mit Ausnahme von Abschnitt 2, die Abweichung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Volumenstrom innerhalb von $\pm 10\%$ liegt. Für die Verfahrenskombination V2-kä konnte demnach auf Basis experimentell erzeugter Messwerte auch für die Berechnung großer Volumenströme die Tauglichkeit nachgewiesen werden.

Bei der Berechnung kleiner Volumenströme muss ein unterer Grenzwert für den berechenbaren Volumenstrom festgelegt werden, da andernfalls die Segmentlängen der miteinander zu vergleichenden Temperaturwerte von Temperatursensor 1 und Temperatursensor 2 sehr groß werden. Dies hätte einen inakzeptablen Rechenaufwand bei der Volumenstromberechnung zur Folge. Für die Auswertung von Datensatz 3 wurde der untere Grenzwert auf 58 l/h festgelegt. Bei der Erstellung von Datensatz 3 lag der gemessene Volumenstrom zwischen 35 und 65 l/h. In Abbildung 2-16 ist für Datensatz 3 der gemessene und der berechnete Volumenstrom sowie die Temperatur der Strömung an Temperatursensor 1 dargestellt.

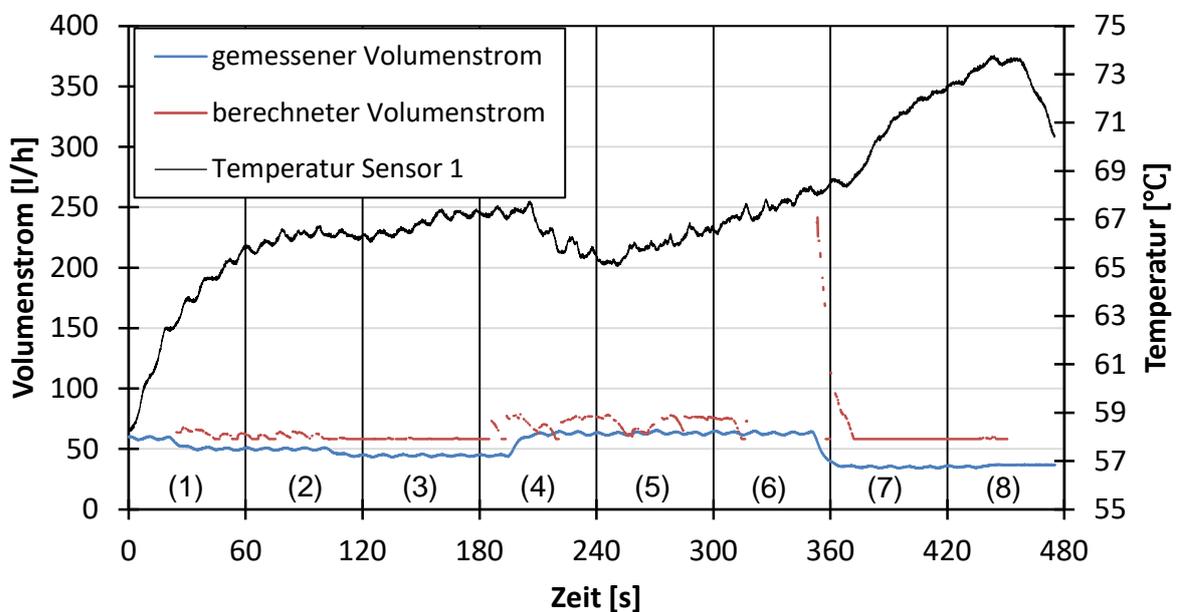


Abbildung 2-16: Gemessener und berechneter Volumenstrom innerhalb der Abschnitte (1) bis (8) von Datensatz 3

Die durch die periodische Aktivierung des sekundären elektrischen Heizstabs verursachten Schwankungen bei der gemessenen Temperatur und dem gemessenen Volumenstrom sind auch in Abbildung 2-16 festzustellen. Nach Entfernung der Ausreißer konnte bei der Auswertung von Datensatz 3 für 56,87 % der Betriebszeit ein Volumenstrom berechnet werden. In Tabelle 2-4 wird für Datensatz 3 die Abweichung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Volumenstrom auf Basis minütlicher Durchschnittswerte aufgeführt.

Tabelle 2-4: Abweichung des berechneten gegenüber dem gemessenen Volumenstrom bei Verwendung minütlicher Durchschnittswerte – Datensatz 3

Abschnitt von Datensatz 3 (gemäß Abb. 2-16)	Berechneter Vo- lumenstrom [l/h]	Gemessener Vo- lumenstrom [l/h]	Abwei- chung [%]
1	61,29	50,37	21,67
2	58,96	46,54	26,69
3	60,63	46,17	31,33
4	70,08	62,66	11,83
5	72,49	63,32	14,49
6	102,94	49,86	106,47
7	58,30	35,21	65,55
8	58,25	36,89	57,91

Anhand von Tabelle 2-4 ist erkennbar, dass die Werte für den berechneten Volumenstrom von den Werten des gemessenen Volumenstroms teilweise deutlich abweichen. Diese zum Teil signifikanten Abweichungen sind die Folge aus dem notwendigerweise festgelegten unteren Grenzwert. Der untere Grenzwert wurde bei der Datenauswertung von Datensatz 3, wie bereits erwähnt, auf 58 l/h festgelegt. Dies hatte zur Folge, dass keine Volumenströme mit weniger als 58 l/h bestimmt werden konnten. Da im Datensatz 3 auch einzelne gemessene Volumenströme vorhanden sind, die geringer als der genannte Grenzwert sind, wurden die minütlichen Durchschnittswerte zu groß berechnet, so dass daraus die teils deutlichen Abweichungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten Volumenstrom der einzelnen Abschnitte resultieren. Es gilt allerdings zu beachten, dass zwar die relative Abweichung beim Vergleich zwischen den minütlichen Werten hoch, die absolute Abweichung in den meisten Fällen jedoch verhältnismäßig gering ist, da die Volumenströme relativ klein sind. Wenn der untere Grenzwert auf einen niedrigeren Wert gesetzt wird, steigt zwar die Genauigkeit, mit der kleine Volumenströme berechnet werden können. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Genauigkeit abnimmt, mit der mittlere und große Volumenströme berechnet werden können. Zudem geht eine Verringerung des unteren Grenzwerts mit einem exponentiellen Anstieg des Rechenaufwands einher.

Die Auswirkung dieser zwar hohen relativen aber niedrigen absoluten Abweichung bei der Berechnung von Volumenströmen im niedrigen Volumenstrombereich ist bei der Durchführung von energetischen Bilanzierungen nicht signifikant. Entscheidend für eine erfolgreiche Durchführung energetischer Bilanzierungen ist es, dass eine Berechnung des Volumenstroms im mittleren und hohen Volumenstrombereich mit hoher Genauigkeit möglich ist. Den Nachweis für die Tauglichkeit zur Berechnung von Volumenströmen in diesen Bereichen hat die Verfahrenskombination V2-kä auf Basis experimentell erzeugter Daten erbracht.

2.1.4 Identifikation der Zeiträume auftretender Volumenströme

Neben der Berechnung der Höhe eines auftretenden Volumenstroms stellt die Identifikation der Zeiträume, in denen überhaupt ein Volumenstrom auftritt, eine wichtige Aufgabe dar. Ohne eine Kenntnis über diese Zeiträume ist nicht klar, wann überhaupt eine Höhe des Volumenstroms berechnet werden muss. Die Durchführung einer temperaturbasierten energetischen Bilanzierung wäre in diesem Fall nicht möglich. Daher wurde auch ein Algorithmus zur Identifikation von Zeiträumen in denen ein Volumenstrom vorhanden ist, entwickelt. Dieser Algorithmus beinhaltet drei Prozessschritte, die im Folgenden erläutert werden:

1. Berechnung der Varianz der Temperaturen des Vorlaufs (warme Seite) und des Rücklaufs (kalte Seite) des entsprechenden hydraulischen Kreislaufs
2. Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf
3. Abgleich der unter 1. berechneten Varianzen und der unter 2. berechneten Temperaturdifferenz mit jeweils einem Vergleichswert. Werden alle Vergleichswerte überschritten, so wird davon ausgegangen, dass ein Volumenstrom im betrachteten Kreislauf vorliegt

Für die Entwicklung der Auswertelgorithmen und deren Prüfung auf Tauglichkeit wurden Daten der mit Messtechnik ausgerüsteten Feldtestanlagen verwendet. Eine Beschreibung der Feldtestanlagen ist aus Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4. ersichtlich.

Abbildung 2-17 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Volumenstromdetektion des Kesselkreislaufs der Feldtestanlage LoK (siehe Kapitel 4.1.2) am 15.11.2021.

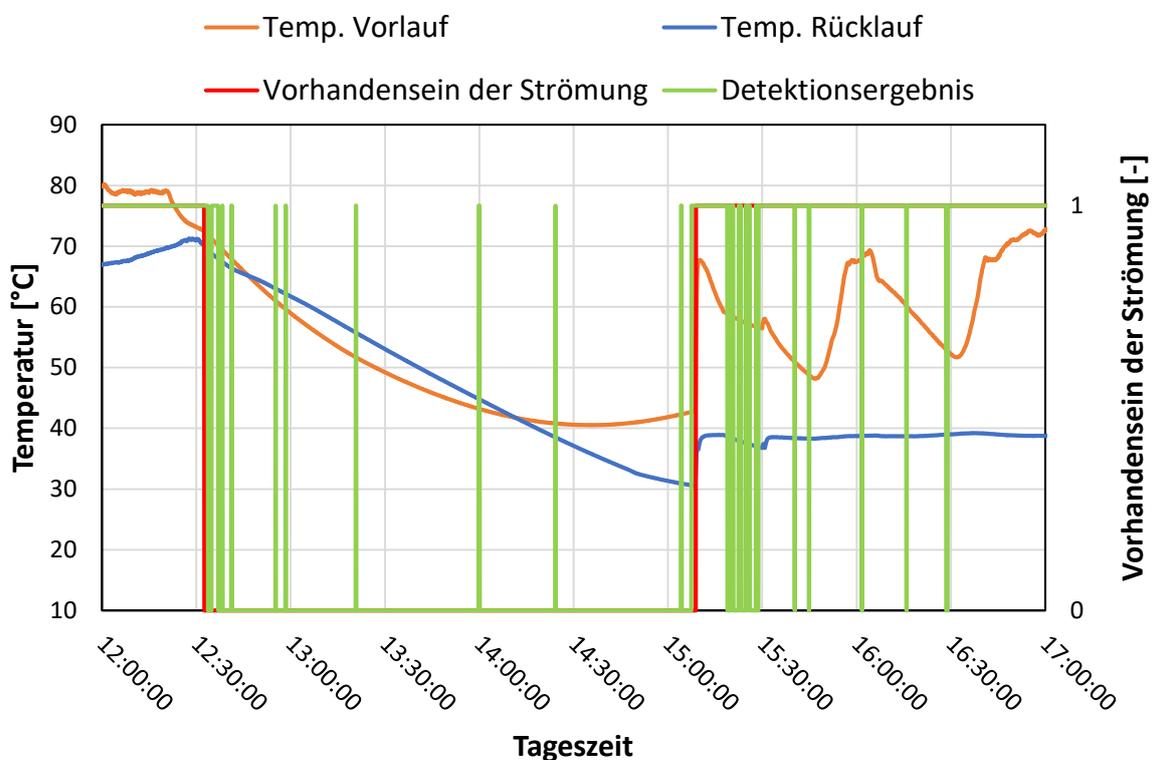


Abbildung 2-17: Exemplarische Darstellung der Volumenstromidentifikation auf Basis von Messwerten des Kesselkreislaufs der Feldtestanlage LoK am 15.11.2021

Wie exemplarisch in Abbildung 2-17 dargestellt, lassen sich die Zeiträume in denen Volumenströme in Kesselkreisläufen auftreten, relativ präzise ermitteln. Dasselbe gilt für die Identifikation auftretender Volumenströme in Heizungskreisläufen. Da die zeitlichen Temperaturprofile für Kesselkreisläufe und Heizungskreisläufe sich stark ähneln, wird auf eine entsprechende Darstellung der Identifikation der Zeiträume in denen Volumenströme in Heizungskreisläufen auftreten verzichtet.

Problematisch bei der Identifikation der Volumenströme in Solarkreisläufen ist das Auftreten einer sogenannten thermische Stagnation. In diesen Zeiträumen kommt es auch dann zu einem großen Temperaturanstieg im Vorlauf des Solarkreislaufs, wenn keine Volumenströme vorhanden sind. Dies erschwert eine präzise Identifikation auftretender Volumenströme. Abbildung 2-18 zeigt exemplarisch die Temperaturverläufe im Vor- und Rücklauf des Solarkreislaufs der Feldtestanlage LoT am 03.07.2021 und die Zeiträume, in denen ein Volumenstrom auftritt.

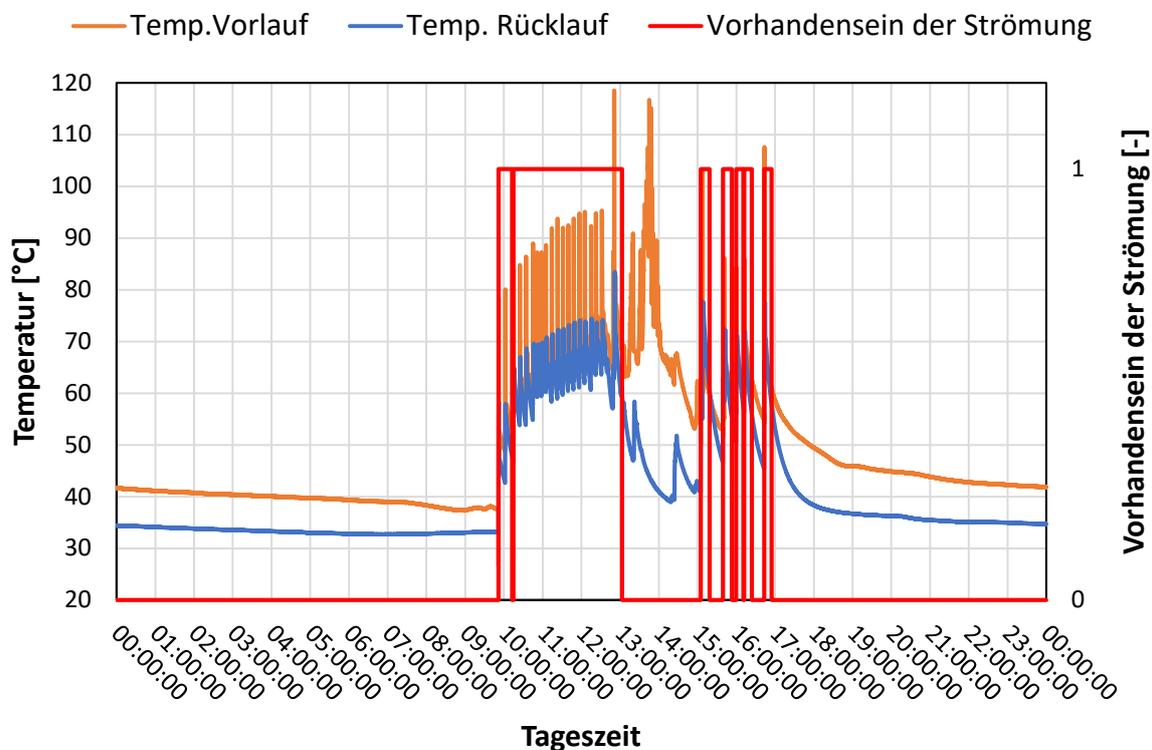


Abbildung 2-18: Exemplarische Darstellung der Temperaturverläufe des Vor- und Rücklaufs und gemessene Werte für das Vorhandensein einer Strömung im Solarkreislauf der Feldtestanlage LoT am 03.07.2021

Wie in Abbildung 2-18 zu erkennen ist, kommt es zwischen ca. 13 und 14 Uhr zu einem deutlichen Anstieg der Vorlauftemperatur, obwohl in diesem Zeitraum kein Volumenstrom auftritt. Die Genauigkeit, mit der auftretende Volumenströme auf Basis der entwickelten Auswertalgorithmen identifiziert werden können, ist aufgrund der beschriebenen Problematik etwas schwieriger als in Zusammenhang mit Kesselkreisläufen und Heizungskreisläufen. Durch entsprechende Anpassungen der Algorithmen ist es jedoch auch gelungen, die Identifikation auftretender Volumenströmen in Solarkreisläufen zuverlässig umzusetzen.

Noch anspruchsvoller als die Identifikation auftretender Volumenströme in Heizungs-, Kessel- und Solarkreisläufen gestaltete sich die Identifikation der Zeiträume, in denen Volumenströme

in Trinkwasserkreisläufen auftreten. Dies liegt daran, dass die zeitlichen Temperaturprofile sich stark von jenen im Kesselkreislauf, im Heizungskreislauf und im Solarkreislauf unterscheiden. Zudem treten Volumenströme in Trinkwasserkreisläufen häufig sehr kurzzeitig auf, was deren Identifikation zusätzlich erschwert. Für die Identifikation von Volumenströmen im Trinkwasserkreislauf wird vor allem auf die Rücklauf- bzw. Kaltwassereintrittstemperatur zurückgegriffen, da diese einen zuverlässigeren Rückschluss auf auftretende Volumenströme zulässt als es bei der Vorlauf- bzw. der Warmwasseraustrittstemperatur der Fall ist. Hierbei wird zwischen kurzfristig auftretenden Volumenströmen wie z. B. beim Händewaschen und längerfristig auftretenden Volumenströmen wie z. B. beim Duschen unterschieden. Kurzfristig auftretende Volumenströme können durch ein sprunghaftes Absinken der Rücklauf- bzw. Kaltwassereintrittstemperatur erkannt werden. Längerfristig auftretende Volumenströme können daran erkannt werden, dass die Rücklauf- bzw. Kaltwassereintrittstemperatur für einen längeren Zeitraum auf einem niedrigeren Niveau verbleibt. Die Abbildung 2-19 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf im Rücklauf des Trinkwasserkreislaufs der Feldtestanlage WaT (vgl. Kapitel 4.1.4) am 23.11.2021 und Zeiträume in denen ein Volumenstrom auftritt.

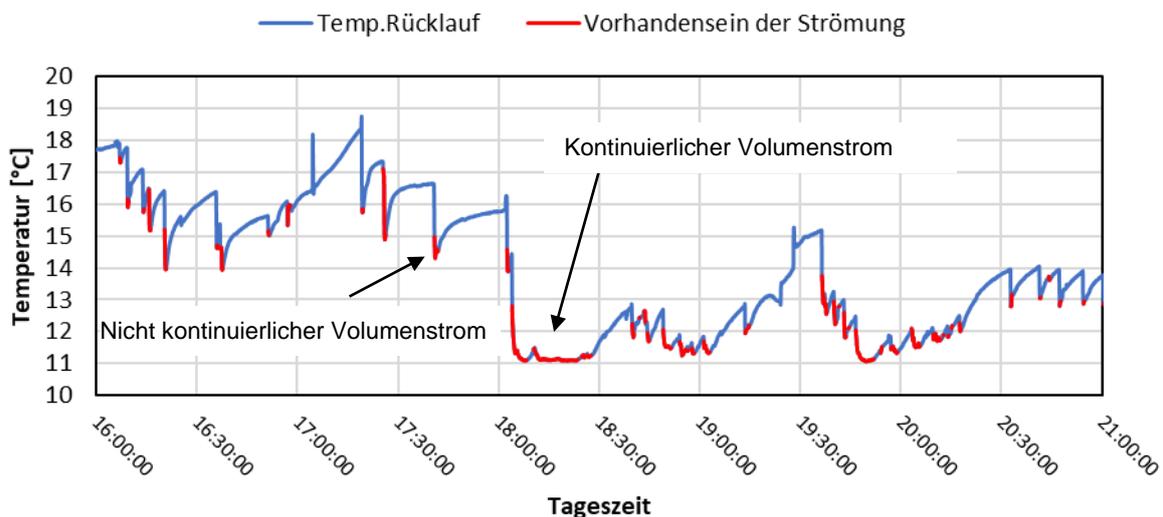


Abbildung 2-19: Exemplarische Darstellung des Temperaturverlaufs des Rücklaufs und des Vorhandenseins eines Volumenstroms im Trinkwasserkreislauf der Feldtestanlage WaT am 23.11.2021

Im Verlauf des Projekts ist es durch spezifische Anpassungen bei den zur Volumenstromdetektion dienenden Algorithmen gelungen, auch auftretende Volumenströme in Trinkwasserkreisläufen zuverlässig zu identifizieren.

2.2 Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung der Änderung der inneren Energie eines Warmwasserspeichers

Für eine vollständige energetische Bilanzierung der untersuchten Feldtestanlagen (siehe Abschnitt 4) müssen zum einen die Wärmeströme erfasst werden, die dem zentralen Warmwasserspeicher durch die angeschlossenen hydraulischen Kreisläufe zu- bzw. abgeführt werden. Zum anderen muss die Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers selbst erfasst werden. Zu diesem Zweck wurden Anlegethermoelemente verwendet, die in unterschiedlichen Höhen direkt auf die Außenseite der Metallbehälter der Warmwasserspeicher angebracht wurden. Wie in Abbildung 2-20 dargestellt, wurde jedem Anlegethermoelement ein bestimmter vertikaler Speicherbereich bzw. Teilzylinder und damit eine entsprechende thermische Kapazität zugeordnet.

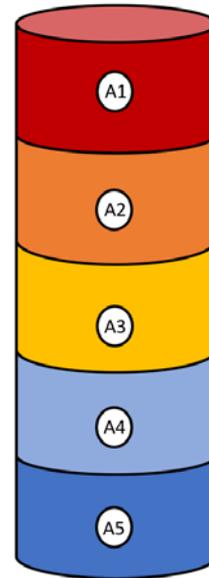


Abbildung 2-20: Warmwasserspeicher mit Teilzylindern und Anlegethermoelementen A1 bis A5

Auf Basis der so ermittelten Werte werden die Temperaturen im Inneren der Speicher abgeschätzt. Gemäß Gleichung (2-3) wird anschließend für die gedanklich erzeugten Teilzylinder die Änderung der inneren Energie in Bezug auf den jeweils vorhergehenden Zeitpunkt berechnet. Für die Berechnung der Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers, beispielsweise innerhalb eines Tags, werden die auf diese Weise berechneten Einzelwerte anschließend aufsummiert.

$$\Delta U = m_W \cdot c_{p,W} \cdot \Delta \vartheta \quad (2-3)$$

mit:

- ΔU Änderung innere Energie [kJ]
- m_w Masse Wasser [kg]
- $c_{p,w}$ spezifische Wärmekapazität Wasser [kJ/(kg*K)]
- $\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz zu vorherigem Zeitpunkt [K]

Um die in diesem Abschnitt beschriebenen Berechnungsschritte für die in Abschnitt 4 beschriebenen energetischen Bilanzierungen der untersuchten Feldtestanlagen möglichst effizient umsetzen zu können, wurde hierfür ein teilautomatisiertes Vorgehen entwickelt. Die notwendigen Berechnungen werden hierbei mittels eigens zu diesem Zweck erstellten Vorlagen für das Tabellenkalkulationsprogramm Excel umgesetzt. Zudem wurde ein Programm auf Basis der Programmiersprache Python entwickelt, welches die, für die jeweilige Berechnung auszuwertenden Temperaturmesswerte, automatisch in die jeweilige Excel-Vorlage einfügt.

2.3 Entwicklung und Anwendung von Kriterien hinsichtlich der Auswertbarkeit von Temperaturprofilen

Im Verlauf des Projekts wurde zunächst ein Kriterienkatalog erstellt, anhand dessen Temperaturprofile charakterisiert werden können. Dieser Kriterienkatalog sollte dazu dienen, ein Temperaturprofil hinsichtlich seiner Eignung zur Berechnung des vorhandenen Volumensstroms beurteilen zu können. Als Temperatursequenz wird hierbei der Verlauf, der von den beiden Sensoren gemessenen Temperaturen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls bezeichnet.

Die einzelnen Kriterien des erstellten Kriterienkatalogs werden nachfolgend aufgeführt.

- Die Temperaturdynamik der auszuwertenden Temperatursequenz. Diese wird berechnet als die Differenz der maximalen und der minimalen Temperatur der Temperatursequenz im Verhältnis zur Dauer der Temperatursequenz.
- Der Betrag der gesamten Temperaturänderung der jeweiligen Temperatursequenz im Verhältnis zur Dauer der gesamten Temperatursequenz.
- Die Vorzeichen der Temperaturänderungen zwischen den einzelnen Temperaturwerten.
- Eine Einordnung, ob es sich insgesamt um ein ansteigendes oder abfallendes Temperaturprofil handelt.
- Die grundsätzliche Charakteristik des Temperaturprofils wie z. B. lineare Temperaturzunahme bzw. -abnahme, sinusförmiger Verlauf, gleichbleibende Temperatur.

Im weiteren Verlauf des Projekts zeigte sich im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der erstellten Auswertalgorithmen und der Auswertung von sowohl experimentell erzeugten Messwerten als auch von Messwerten aus Feldtestanlagen, dass ein Kriterienkatalog mit vielen verschiedenen Kriterien zur Beurteilung der Auswertbarkeit von Temperatursequenzen nicht zielführend ist. Vielmehr stellte sich heraus, dass es vorteilhaft ist, nur ein einzelnes Kriterium für die Beurteilung der Auswertbarkeit heranzuziehen. Es handelt sich hierbei um die Temperaturdynamik der auszuwertenden Temperatursequenz als zentrales Kriterium mit der größten Aussagekraft. Die Verwendung weiterer Kriterien lieferte hinsichtlich einer Beurteilung der Auswertbarkeit von Temperatursequenzen keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn und führte nur zu einer unnötigen Komplexität und einer damit einhergehenden Zunahme des Rechenaufwands der Auswertalgorithmen.

2.4 Entwicklung von Methoden zur Extrapolation des Volumenstroms

Für die Handhabung von Zeiträumen, in denen aufgrund einer zu geringen Temperaturdynamik keine temperaturbasierte Volumenstrombestimmung möglich ist, wurden unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt. Diese Lösungsansätze werden nachfolgend aufgeführt.

- Direkte Extrapolation des Volumenstroms. D. h. Verwendung des vor dem Auftreten des entsprechenden Zeitraums bestimmten Volumenstroms.
- Lineare Extrapolation des Volumenstroms. In diesem Fall erfolgt eine Bestimmung des Volumenstroms während des Zeitraums mit unzureichender Temperaturdynamik durch eine lineare Interpolation zwischen den Werten des Volumenstroms, die unmittelbar vor und unmittelbar nach dem Auftreten des entsprechenden Zeitraums bestimmt wurden.
- Vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten (vgl. Abschnitt 3).

Auf Basis der Auswertung von experimentell gemessenen Temperaturwerten und der Auswertung von Messwerten der untersuchten Feldtestanlagen stellte sich heraus, dass eine Extrapolation des Volumenstroms im Rahmen der Durchführung energetischer Bilanzierungen nicht zielführend ist. Sofern aus dem regulären Betrieb der Anlagen eine Berechnung des auftretenden Volumenstroms aufgrund einer zu geringen Temperaturdynamik nicht möglich ist, muss der zu diesem Zweck in der Messstrecke installierte elektrische Heizstab aktiviert werden. Allerdings zeigte sich bei der Auswertung der Messwerte aus Feldtestanlagen, dass auch ohne den Einsatz der installierten elektrischen Heizstäbe eine energetische Bilanzierung der Feldtestanlagen mit hoher Genauigkeit umgesetzt werden kann; siehe hierfür Abschnitt 4.

3. Vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten (AP2)

Für eine präzise Berechnung des Volumenstroms in einem flüssigkeitsdurchströmten Rohr ist bei Einsatz des TeBwA-Verfahrens eine ausreichende Temperaturdynamik erforderlich. Hierfür wurde empirisch ein Wert von 0,15 K/s als Grenzwert ermittelt. Wird dieser Grenzwert erreicht bzw. überschritten, so sind die entwickelten Auswertalgorithmen in der Lage, einen auftretenden Volumenstrom mit hoher Genauigkeit zu berechnen. Eine hohe Genauigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Abweichung gegenüber den mit einem konventionellen Volumenstrommesser ermittelten Werte maximal $\pm 10\%$ beträgt.

Im regulären Betrieb wärmetechnischer Anlagen kommt es in den betrachteten hydraulischen Kreisläufen regelmäßig zu Temperaturänderungen. Diese Temperaturänderungen können für eine Berechnung des im jeweiligen Zeitraum der Temperaturänderung auftretenden Volumenstroms genutzt werden. Sofern eine präzise Berechnung des Volumenstroms unter ausschließlicher Verwendung dieser im regulären Betrieb der Anlagen auftretenden Temperaturänderungen für einen längeren Zeitraum aufgrund einer zu geringen Temperaturdynamik nicht möglich ist, kann gezielt Wärme in die Rohrströmung eingebracht werden. Auf diese Weise kann kurzzeitig die Temperaturdynamik erhöht und dadurch eine präzise Volumenstromberechnung umgesetzt werden. Um die Einbringung von Wärme realisieren zu können, wurde in jeden der hydraulischen Kreisläufe der untersuchten Feldtestanlagen jeweils ein elektrischer Heizstab vor den Temperaturmessstrecken installiert.

3.1 Aufbau des Versuchsstands

Um im Vorfeld der energetischen Bilanzierung der untersuchten Feldtestanlagen (siehe Abschnitt 4) Erfahrung mit der Erzeugung von Temperaturprofilen zu sammeln, die für eine Volumenstromberechnung geeignet sind, wurde ein Versuchsstand zur vorsätzlichen Generierung von Temperaturgradienten entwickelt und aufgebaut. Die mittels des Versuchsstands experimentell ermittelten Daten wurden zudem für die Weiterentwicklung und Erprobung der für die Anwendung des TeBwA-Verfahrens benötigten Auswertalgorithmen (siehe Abschnitt 2) eingesetzt. Die Abbildung 3-1 stellt den beschriebenen Versuchsstand dar. Um die auftretenden Wärmeverluste möglichst gering zu halten, wurde die Messstrecke im Anschluss an die Erstellung der Fotografie sorgfältig wärmegeklämt.

Erkennbar sind in Abbildung 3-1 unter anderem die Messstrecke (1) samt der beiden in die Messstrecke installierten Temperatursensoren (2) und (3). Vor, d.h. entgegen der Strömungsrichtung der beiden Temperatursensoren ist jeweils ein sogenannter Verwirbler ins Rohr eingebaut, durch den eine homogene Temperaturverteilung über den Strömungsquerschnitt sichergestellt wird. Da sich die Verwirbler im Inneren der Messstrecke befinden, sind diese in der Abbildung nicht zu erkennen; sie sind jedoch in Abbildung 1-1 dargestellt. Eine Pumpe (4) lässt das Wasser in der Hydraulik zirkulieren. Zudem sind in Abbildung 3-1 zwei ebenfalls vor der Messstrecke eingebaute elektrische Heizstäbe (5) und (6) zu erkennen. Diese werden aktiviert, um durch die gezielte Einbringung von Wärme eine Temperaturerhöhung des strömenden Fluids zu erzielen. Hierdurch wird die für eine präzise Berechnung des Volumenstroms notwendige Temperaturdynamik erzeugt. Außerdem sind in Abbildung 3-1 ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) (6) und ein Wärmezähler (7) erkennbar. Die von diesen Geräten aufgezeichneten Messwerte werden als Referenz- bzw. Vergleichswerte für eine

Beurteilung der durch das TeBwA-Verfahren erzielbaren Genauigkeit bei der Berechnung auftretender Volumenströme bzw. übertragener Wärmemengen verwendet.



Abbildung 3-1: Hydraulischer Aufbau des Versuchsstands zur vorsätzlichen Generierung von Temperaturgradienten
Hinweis: Aufgrund der besseren Anschaulichkeit ohne Wärmedämmung dargestellt

Auf der Rückseite des Versuchsstands befindet sich ein elektrischer Schaltschrank in dem die zur Steuerung und Messdatenerfassung notwendigen elektrischen Bauteile installiert sind. Abbildung 3-2 zeigt die Komponenten im Inneren dieses Schaltschranks.

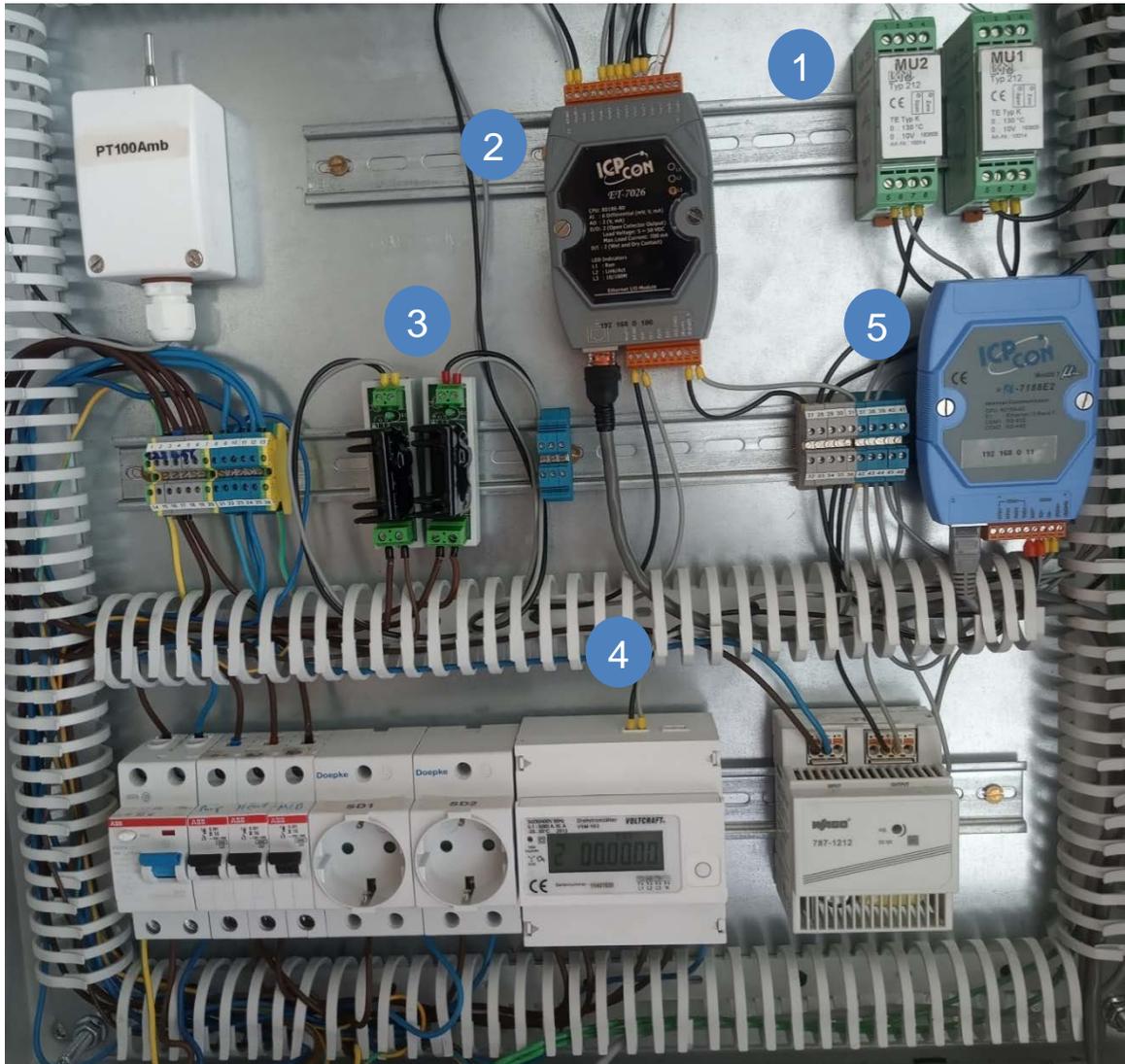


Abbildung 3-2: Komponenten im Inneren des elektrischen Schaltschanks

In Abbildung 3-2 erkennbar sind unter anderem zwei Messumformer (1), welche die von den beiden in die Messstrecke installierten Temperatursensoren erzeugten Spannungen im Bereich einiger Millivolt in Spannungen zwischen 0 und 10 V umwandeln. Zudem ist ein kombiniertes Input/Output-Modul (2) zu erkennen, das die analogen Spannungen in digitale Daten wandelt und per Ethernet-Verbindung an den angeschlossenen Messrechner sendet. Dort werden die Messwerte gespeichert und anschließend ausgewertet. Das Input/Output-Modul wird zudem verwendet, um mittels der ebenfalls in Abbildung 3-2 erkennbaren Halbleiterrelais (3) die Pumpe und einen der beiden elektrischen Heizstäbe gezielt aktivieren zu können. Außerdem ist ein Stromzähler (4) erkennbar, der für die Erfassung der elektrischen Leistung und Energie verwendet wird, die den elektrischen Heizstäben während deren Aktivierung zugeführt wird. Das ebenfalls erkennbare zweite Input/Output-Modul (5) wird eingesetzt, um die durch den Stromzähler erfassten Werte per Ethernet-Verbindung an den Messrechner zu übertragen.

Der Versuchsstand wurde während der Verfahrensentwicklung benötigt, um eine große Anzahl an experimentell gemessenen Temperaturwerten zu generieren. Diese wurden in der Folge

eingesetzt, um die entwickelten Auswertalgorithmen zu testen und auf Basis der hierbei gesammelten Erkenntnisse zu optimieren. Ein Auszug der durchgeführten Auswertungen ist im Abschnitt 2.1 beschrieben.

3.2 Strategie für die Aktivierung des elektrischen Heizstabs

Um den elektrischen Heizstab in Zeiträumen mit einer geringen Temperaturdynamik systematisch aktivieren zu können, wurde zu diesem Zweck eine spezielle Aktivierungsstrategie entwickelt. Deren Anwendung dient einerseits der Sicherstellung einer ausreichend großen Temperaturdynamik für eine präzise Berechenbarkeit auftretender Volumenströme. Andererseits soll gewährleistet werden, dass die elektrische Energie für die Aktivierung der elektrischen Heizstäbe möglichst gering ist. Zusätzlich soll durch die Aktivierungsstrategie sichergestellt werden, dass das strömende Fluid aus Sicherheitsgründen nicht über einen maximalen Temperaturwert hinaus erhitzt wird.

Für die Entwicklung der Aktivierungsstrategie wurde festgelegt, dass eine Sequenz, in der der elektrische Heizstab angesprochen wird, einen Zeitraum von 60 s umfasst. Nach diesen 60 s wiederholt sich die entsprechende Sequenz periodisch, sofern die Temperaturdynamik der Strömung weiterhin zu niedrig für eine präzise Berechnung des Volumenstroms ist. Innerhalb einer Sequenz wird der elektrische Heizstab wiederholt aktiviert und deaktiviert, um wiederkehrende Temperaturprofile zu erzeugen, die eine anschließende Volumenstromberechnung ermöglichen. Für die Anwendung der Aktivierungsstrategie werden die erfassten Temperaturwerte in Zeitabschnitte mit je 15 s unterteilt. Als unterer Grenzwert der Temperaturdynamik eines Zeitabschnitts wurde ein Wert von 0,15 K/s festgelegt. Die Temperaturdynamik berechnet sich gemäß Gleichung (3-1).

$$dyn_{seq} = \frac{T_{max,seq} - T_{min,seq}}{t_{seq}} \quad (3-1)$$

mit:

dyn_{seq}	Temperaturdynamik des betrachteten Zeitabschnitts [K/s]
$T_{max,seq}$	Größter Temperaturwert des betrachteten Zeitabschnitts [K]
$T_{min,seq}$	Kleinster Temperaturwert des betrachteten Zeitabschnitts [K]
t_{seq}	Länge des Zeitabschnitts [s]

Wird der untere Grenzwert der Temperaturdynamik in vier aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten unterschritten, so wird der elektrische Heizstab innerhalb eines Zeitraums von 60 s, wie in den nachfolgenden Tabellen dargestellt, zeitweise aktiviert. Voraussetzung für die Aktivierung des elektrischen Heizstabs ist, dass der erste Temperaturwert des zuletzt ausgewerteten, 15-sekündigen Zeitabschnitts nicht größer als 85 °C ist. Auf diese Weise soll eine Überhitzung des Fluids vermieden werden.

Für die Anwendung der Aktivierungsstrategie wurde auf Basis der Programmiersprache Python ein Programm erstellt, das die erarbeitete Aktivierungsstrategie des Heizstabs in den untersuchten flüssigkeitsdurchströmten Rohren umsetzt.

Die entwickelte Aktivierungsstrategie wurde zunächst anhand synthetisch erzeugter Messwerte geprüft. Die hierbei verwendeten Messwerte wurden mit dem Programm TRNSYS erzeugt. Als Auswertealgorithmen wurden die in Abschnitt 2.1.3.1 beschriebenen Verfahrenskombination V2-kä verwendet.

Tabelle 3-1 zeigt die zunächst geprüften drei Ansätze sowie den Anteil der berechneten Volumenströme, die innerhalb der Toleranz von $\pm 10\%$ gegenüber dem Vergleichswert lagen. Der Volumenstrom wurde bei dieser Untersuchung auf 200 l/h und die Temperatur der Strömung auf 20 °C eingestellt.

Tabelle 3-1: Ansätze für die Heizstabaktivierung – synthetisch generierte Daten (Teil 1 von 2)

Ansatz	Sequenzdauer [s]	Zeitpunkte Aktivierung [s]		Dauer Aktivierungen [s]		Ergebnisse innerhalb der Toleranz [%]
1	60	0	-	1	-	62,1
2	60	0	30	1	1	0,0
3	60	0	20	1	2	100,0

Die Auswertung der Messwerte ergab, dass es unvorteilhaft ist, wenn innerhalb einer Sequenz der elektrische Heizstab nur einmal aktiviert wird. Zudem stellte sich heraus, dass es unvorteilhaft ist, wenn einerseits die Zeiträume zwischen den einzelnen Startzeitpunkten der Aktivierungszeiträume aufeinanderfolgender Sequenzen und andererseits innerhalb einer Sequenz die Zeiträume, in denen der elektrische Heizstab aktiviert wird, gleich sind. Dies lässt sich auch anhand von Tabelle 3-1 erkennen. So betragen die Zeiträume zwischen den Aktivierungszeitpunkten bei Ansatz 2 jeweils 29 s. Die Aktivierungsdauer beträgt jeweils 1 s. Dies hat zur Folge, dass die Auswertealgorithmen nicht zwischen den einzelnen durch die Heizstabaktivierung hervorgerufenen Temperaturerhöhungen unterscheiden können. Die Zeiträume zwischen den einzelnen Aktivierungen des Heizstabs und die Aktivierungsdauer der einzelnen Aktivierungen innerhalb einer Sequenz sollten demnach unterschiedlich lang sein. Insbesondere Ansatz 3 zeigt vor diesem Hintergrund sehr gute Ergebnisse.

Auf Basis von Ansatz 3 wurden daher weitere Möglichkeiten der Heizstabaktivierung untersucht. Insbesondere wurde geprüft, ob eine Reduzierung der Aktivierungsdauer des Heizstabs erfolgen kann, ohne dass die Qualität der Ergebnisse signifikant abnimmt. Die Resultate dieser Untersuchungen sind in Tabelle 3-2 dargestellt. Der eingestellte Volumenstrom betrug hierbei wiederum 200 l/h und die Temperatur der Strömung 20 °C. Als Toleranz- bzw. Akzeptanzkriterium wurde erneut ein Bereich von $\pm 10\%$ gegenüber dem Vergleichswert festgelegt.

Anhand von Tabelle 3-2 kann festgestellt werden, dass auch bei einer Reduzierung der Aktivierungsdauer des elektrischen Heizstabs im Vergleich zu Ansatz 3 die untersuchten Ansätze sehr gute Ergebnisse liefern, sofern darauf geachtet wird, dass die Zeiträume zwischen den Aktivierungszeitpunkten und die Zeiträume der einzelnen Aktivierungen innerhalb einer Sequenz voneinander abweichen. Dies gilt auch bei den nachfolgend aufgeführten, unterschiedlichen Betriebsbedingungen. So wurden die Untersuchungen für einen Temperaturbereich von 20 bis 80 °C und für einen Volumenstrombereich von 200 bis 1100 l/h durchgeführt.

Tabelle 3-2: Ansätze für die Heizstabaktivierung – synthetisch generierte Daten (Teil 2 von 2)

Ansatz	Sequenzdauer [s]	Zeitpunkte Aktivierung [s]			Dauer Aktivierungen [s]			Ergebnisse innerhalb der Toleranz [%]
		0	20	38	0,2	0,3	0,2	
4	60	0	20		0,2	0,3		100,0
5	60	0	20		0,2	0,4		100,0
6	60	0	16	38	0,2	0,3	0,2	98,2

Die Ergebnisse für die berechneten Volumenströme, die innerhalb des prozentualen Anteil der vorgegebenen Toleranzgrenzen liegen, weichen hierbei nur unwesentlich von den in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 aufgeführten Werten ab und werden deshalb nicht separat dargestellt. Hierbei handelte es sich allerdings um Ergebnisse auf Basis synthetisch, d. h. mit dem Simulationsprogramm TRNSYS, erzeugter Daten.

In der Folge wurde daher die Entwicklung der Aktivierungsstrategie an dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Versuchsstand weitergeführt, um den Einfluss real auftretender Wärmeverluste und der Messungenauigkeit der verwendeten Temperatursensoren zu berücksichtigen.

Als Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen wurde der in Tabelle 3-2 aufgeführte Ansatz 4 verwendet. Dieser wurde in den durchgeführten Untersuchungen variiert und es wurde für jede Variante die Anzahl der Ergebnisse der berechneten Volumenströme ermittelt, die sich innerhalb der Toleranz befinden. Hierbei wurde jede Variante von Ansatz 4 bei zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus untersucht. Die Sequenzdauer beträgt weiterhin jeweils 60 s. Der eingestellte Volumenstrom betrug bei allen Untersuchungen konstant 680 l/h. Als Toleranz wurde wiederum ein Bereich von $\pm 10\%$ gegenüber dem direkt messtechnisch ermittelten Volumenstrom festgelegt.

Tabelle 3-3 zeigt die Ergebnisse der zunächst durchgeführten Untersuchungen.

Tabelle 3-3: Variationen von Ansatz 4 – experimentell generierte Daten (Teil 1 von 3)

Ansatz	Zeitpunkte Aktivierung [s]		Dauer Aktivierungen [s]		Temperaturbereich 20 bis 35 °C	Temperaturbereich 35 bis 50 °C
	0	20	0,2	0,3	Ergebnisse innerhalb der Toleranz [%]	Ergebnisse innerhalb der Toleranz [%]
4.1	0	20	0,2	0,3	69,61	35,18
4.2	0	20	0,5	0,6	27,14	5,96
4.3	0	20	0,8	0,9	69,99	41,61
4.4	0	20	1,1	1,2	85,08	74,82

Die Ergebnisse von Tabelle 3-3 lassen keine eindeutige Interpretation zu. Grundsätzlich nimmt die Genauigkeit der Ergebnisse mit zunehmenden Aktivierungsdauern des elektrischen Heizstabs allerdings zu. Ein weiterer Faktor, der einen maßgeblichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit hat, scheint die relative Differenz zwischen den beiden Aktivierungszeiträumen innerhalb einer Sequenz zu sein, was sich mit den Erfahrungen der Auswertung synthetisch generierter Daten deckt. Um den Einfluss dieser relativen Differenz zu überprüfen, wurden weitere Auswertungen auf Basis von Messwerten durchgeführt, die mittels des Versuchsstands erzeugt wurden. Die hierbei ermittelten Ergebnisse werden in Tabelle 3-4 dargestellt. Die Sequenzdauer beträgt weiterhin jeweils 60 s.

Tabelle 3-4: Variationen von Ansatz 4 – experimentell generierte Daten (Teil 2 von 3)

Ansatz	Zeitpunkte		Dauer		Temperaturbereich 20 bis 35°C	Temperaturbereich 35 bis 50°C
	Aktivierung [s]		Aktivierungen [s]		Ergebnisse innerhalb der Toleranz [%]	Ergebnisse innerhalb der Toleranz [%]
4,3	0	20	0,8	0,9	69,99	41,61
4,5	0	20	0,8	1,3	90,83	87,37
4,6	0	20	0,8	1,7	97,29	90,25

Aus Tabelle 3-4 lässt sich ableiten, dass die erzielbare Genauigkeit zum einen durch eine Verlängerung der Zeit, in der der elektrische Heizstab aktiviert wird, verbessert werden kann. Zum anderen nimmt die erzielbare Genauigkeit mit zunehmender relativer Differenz zwischen den beiden Aktivierungszeiträumen innerhalb einer Sequenz zu. Um diesen Einfluss systematisch zu prüfen, sind allerdings weitere Untersuchungen erforderlich. Diese Untersuchungen sind so zu gestalten, dass die Summe der beiden Aktivierungszeiträume der verschiedenen durchzuführenden Sequenzen identisch bleibt, während die relative zeitliche Differenz zwischen den Aktivierungszeiträumen variiert wird.

Um die erzielbare Genauigkeit bei unterschiedlichen Volumenströmen zu ermitteln, wurden für zwei der in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 aufgeführten Varianten von Ansatz 4 weitere Auswertungen auf Basis von Messungen mit dem Versuchsstand durchgeführt. Die ausgewählten Varianten stellen einen Kompromiss aus der erzielbaren Genauigkeit und der hierfür erforderlichen Aktivierungsdauer der elektrischen Heizstäbe dar. Der Grund hierfür ist, dass mit zunehmender Aktivierungsdauer des elektrischen Heizstabs selbstverständlich auch die für dessen Betrieb benötigte elektrische Energie zunimmt. Der Temperaturbereich des strömenden Wassers lag bei den durchgeführten Untersuchungen in einem Bereich von 35 bis 50 °C. Die ermittelten Ergebnisse werden in Tabelle 3-5 dargestellt. Die Sequenzdauer beträgt wie bisher jeweils 60 s.

Tabelle 3-5: Variationen von Ansatz 4 – experimentell generierte Daten (Teil 3 von 3)

Ansatz	Zeitpunkte		Dauer Akti-		Volumen-	Volumen-	Volumen-
	Aktivie-		vierungen		strom 220 l/h	strom 450 l/h	strom 680 l/h
	rung [s]		[s]		Ergebnisse	Ergebnisse	Ergebnisse
					innerhalb der	innerhalb der	innerhalb der
					Toleranz [%]	Toleranz [%]	Toleranz [%]
4.4	0	20	1,1	1,2	88,91	91,70	74,82
4.5	0	20	0,8	1,3	81,62	93,87	87,37

Auch wenn die in Tabelle 3-5 dargestellten Ergebnisse keine eindeutige Interpretation zulassen, scheint die erzielbare Genauigkeit mit zunehmendem Volumenstrom abzunehmen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Temperaturdynamik bei identischer Aktivierungsdauer mit zunehmendem Volumenstrom sinkt.

Um die Tauglichkeit zweier Varianten von Ansatz 4 unter realen Bedingungen zu prüfen, wurden diese auf einen der hydraulischen Kreisläufe einer im Zuge des Projekts mit der hierfür erforderlichen Messtechnik und elektrischen Heizstäben ausgestatteten Feldtestanlage angewandt. Die hierbei erzeugten Messwerte wurden anschließend ausgewertet. Bei dem untersuchten hydraulischen Kreislauf handelt es sich um den Heizungskreislauf der Feldtestanlage mit dem Akronym „LoK“. Eine detaillierte Beschreibung dieser Feldtestanlage incl. der installierten Messtechnik befindet sich im Abschnitt 4.1.2.

In Tabelle 3-6 ist die Genauigkeit dargestellt, mit der aufgetretene Volumenströme im Heizungskreislauf der Feldtestanlage LoK bei Anwendung der beschriebenen Aktivierungsstrategie des elektrischen Heizstabs berechnet werden konnten. Zudem wird die elektrische Energie aufgeführt, die für eine 60-sekündige Sequenz bei Verwendung eines elektrischen Heizstabs mit einer elektrischen Leistung von 1,6 kW benötigt wird. Zur Anwendung kamen bei den durchgeführten Untersuchungen erneut Variationen von Ansatz 4. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf Zeitabschnitte mit einer Dauer von 20 Minuten und wurden auf Basis von Messwerten erzielt, die am 20. Januar 2022 aufgezeichnet wurden. Die hierbei aufgetretenen Volumenströme variierten in einem Bereich von 370 bis 780 l/h. Die Temperatur auf der warmen Seite des Heizungskreislaufs lag zwischen 40 und 60 °C. Die Sequenzdauer betrug jeweils 60 s.

Die in Tabelle 3-6 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei allen angewandten Variationen von Ansatz 4 mehr als 90 % der Ergebnisse innerhalb der vorgegebenen Toleranz von ± 10 % liegen. Zudem ist erkennbar, dass die Genauigkeit der Ergebnisse umso größer ist, je länger die Aktivierungsdauer des elektrischen Heizstabs innerhalb einer Sequenz ist. Weiter ist erkennbar, dass es im Hinblick auf die erzielbare Genauigkeit vorteilhaft ist, wenn die relative Differenz zwischen den beiden Aktivierungszeiträumen innerhalb einer Sequenz möglichst groß ist. Das bedeutet, dass bei zunehmender relativer Differenz zwischen den beiden Aktivierungszeiträumen weniger elektrische Energie benötigt wird, um eine bestimmte Genauigkeit erzielen zu können.

Tabelle 3-6: Variationen von Ansatz 4 – Daten von Feldtestanlage LoK (Teil 1 von 2)

Ansatz	Zeitpunkte Aktivierung [s]		Dauer Aktivierungen [s]		Ergebnisse innerhalb Toleranz [%]	Mittlere Abweichung [%]	El. Energie je Sequenz [Wh]	Anzahl Aktivierungssequenzen [-]
	0	20	0,4	0,9				
4.7	0	20	0,4	0,9	97,10	-6,10	0,61	15
4.8	0	20	0,6	1,1	100,00	-3,69	0,79	13
4.5	0	20	0,8	1,3	99,17	-2,65	1,01	13
4.9	0	20	0,7	0,8	90,03	-7,10	0,70	17
4.10	0	20	0,9	1,0	96,27	-5,23	0,92	17
4.4	0	20	1,1	1,2	93,76	-3,43	1,11	17

Um die Erhöhung der erzielbaren Genauigkeit bei der Berechnung auftretender Volumenströme im Heizungskreislauf der Anlage LoK durch den Einsatz des installierten elektrischen Heizstabs ermitteln zu können, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden jeweils die innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden auftretenden Volumenströme berechnet und anschließend die erzielte Genauigkeit ermittelt. Hierbei wurden Daten von zwei verschiedenen Tagen ausgewertet. Bei den erfassten Messwerten des 19. Januar 2022 wurde der installierte elektrische Heizstab nicht eingesetzt. Für die Volumenstromberechnung wurde demnach nur die im regulären Betrieb der Feldtestanlage aufgetretene Temperaturdynamik genutzt. Bei den erfassten Messwerten des 28. Januar 2022 wurde der elektrische Heizstab hingegen gemäß der Aktivierungsstrategie unter Verwendung von Ansatz 4.5 verwendet. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7: Variationen von Ansatz 4 – Daten von Feldtestanlage LoK (Teil 2 von 2)

Datum	Ansatz	Zeitpunkte Aktivierung [s]		Dauer Aktivierungen [s]		Ergebnisse innerhalb Toleranz [%]	Mittlere Abweichung [%]
19.01.22	-	-	-	-	-	79,21	-6,18
28.01.22	4.5	0	20	0,8	1,3	94,66	-5,84

Aus Tabelle 3-7 ist ersichtlich, dass bei einem Einsatz des elektrischen Heizstabs gemäß der Aktivierungsstrategie bei Verwendung von Ansatz 4.5 die mittlere Abweichung der Ergebnisse nur geringfügig ändert, während die Anzahl der Ergebnisse innerhalb der Toleranz deutlich zunimmt.

In Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 sind die für den 19. Januar 2022 und für den 28. Januar 2022 erzielten Ergebnisse der Volumenstromberechnung graphisch dargestellt.

Anhand von Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 ist erkennbar, dass die Anzahl an Ausreißern bei der Berechnung der auftretenden Volumenströme im Heizungskreislauf der Feldtestanlage LoK bei Verwendung des elektrischen Heizstabs deutlich reduziert werden kann.

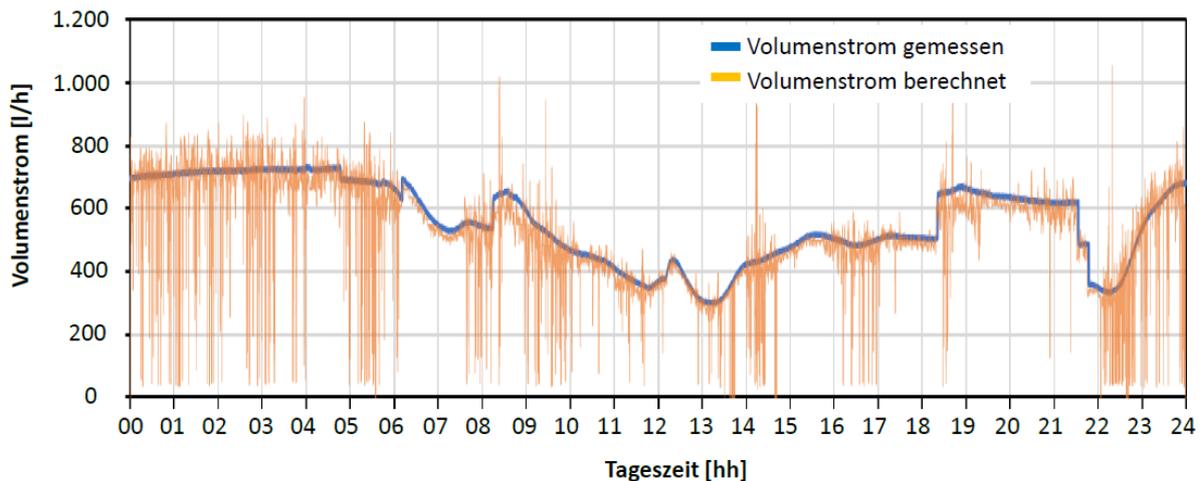


Abbildung 3-3: Gemessener (blau) und berechneter (orange) Volumenstrom Heizungskreislauf Anlage „LoK“ am 19. Januar 2022 - keine Aktivierung des elektrischen Heizstabs

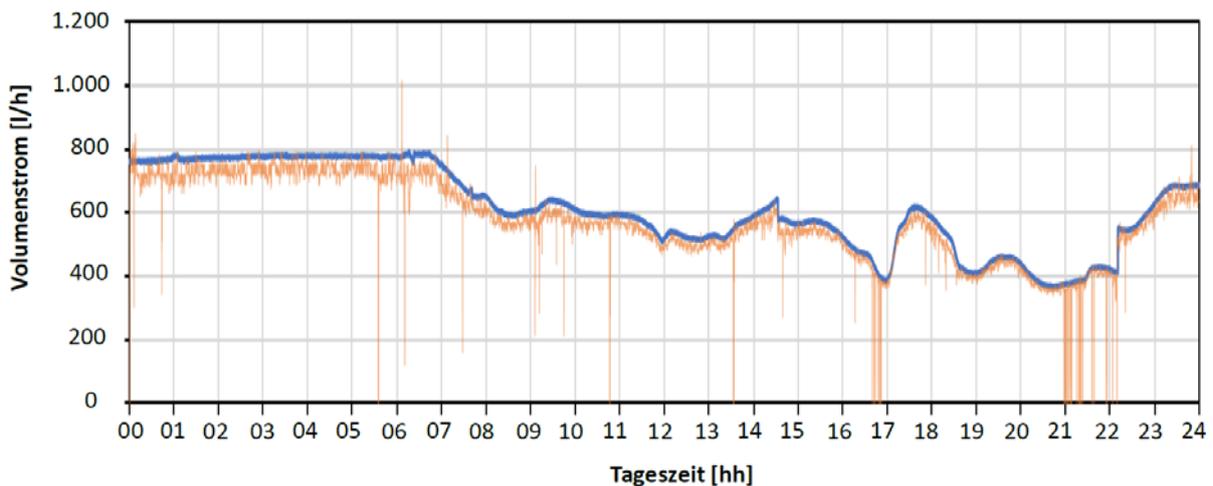


Abbildung 3-4: Gemessener (blau) und berechneter (orange) Volumenstrom Heizungskreislauf Anlage „LoK“ am 28. Januar 2022 - elektrischer Heizstab systematisch aktiviert

Hinsichtlich der Aktivierung des elektrischen Heizstabs lässt sich auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassen, dass sowohl die Gestaltung der gesamten Aktivierungsdauer des elektrischen Heizstabs innerhalb einer Sequenz als auch die relative Differenz zwischen den einzelnen Aktivierungszeiträumen einer Sequenz von entscheidender Relevanz ist. Als vorteilhaft für eine präzise Berechnung auftretender Volumenströme erwies sich hierbei eine möglichst große relative Differenz zwischen den Aktivierungszeiträumen einer Sequenz. Zudem erwies es sich als vorteilhaft, wenn die Zeiträume zwischen den Startzeitpunkten der einzelnen Aktivierungszeiträumen aufeinanderfolgender Sequenzen nicht identisch sind.

Mit zunehmender gesamter Aktivierungsdauer des elektrischen Heizstabs innerhalb einer Sequenz nimmt einerseits die erzielbare Genauigkeit der Volumenstromberechnung zu. Andererseits nimmt auch die für die Aktivierung des elektrischen Heizstabs erforderliche elektrische Energie zu. Daher sollte unter Berücksichtigung dieser beiden Aspekte eine individuelle, d. h. auf den jeweiligen Anwendungsfall bezogene Optimierung erfolgen.

4. Energetische Bilanzierung (AP3)

Während der Projektlaufzeit wurden für vier Feldtestanlagen konventionelle energetische Bilanzierungen auf Basis der installierten Wärmezähler durchgeführt und es wurde das jeweilige Betriebsverhalten der Feldtestanlagen anhand charakteristischer Kennwerte beurteilt; siehe hierzu Abschnitt 4.1.

Zudem erfolgte für alle mit einer „TeBwA-Messstrecke“ ausgerüsteten hydraulischen Kreisläufe der Feldtestanlagen zusätzlich eine energetische Bilanzierung mit dem im Projekt entwickelten „TeBwA-Verfahren“. Auf Basis der Ergebnisse dieser Bilanzierungen wurde die Genauigkeit ermittelt, mit der eine temperaturbasierte energetische Bilanzierung durchgeführt werden kann. Die entsprechenden Ergebnisse sind im Abschnitt 4.2 beschrieben.

4.1 Konventionelle energetische Bilanzierung und Bestimmung der generellen Funktionsfähigkeit der Anlagen anhand charakteristischer Kennwerte

Im Folgenden werden die Kennwerte definiert, die für eine Beurteilung des Anlagenverhaltens herangezogen werden.

Der **solarthermische Deckungsanteil** $f_{Sol,th}$ gibt den Anteil der solarthermisch erzeugten Nutzwärme an der Summe aus Wärmeverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung und dem Wärmeverbrauch für die Raumheizung an und wird gemäß Gleichung (4-1) berechnet.

$$f_{Sol,th} = \frac{Q_{Sol,nutz}}{Q_{RH} + Q_{TWW}} \quad (4-1)$$

mit:

$Q_{Sol,nutz}$ Durch solarthermischen Erzeuger gelieferte Nutzwärme [kWh]

Q_{RH} Wärmeverbrauch für Raumheizung [kWh]

Q_{TWW} Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasserbereitung [kWh]

Für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung berechnet sich der **solarthermische Deckungsanteil** $f_{Sol,th}$ abweichend zu Gleichung (4-1) gemäß Gleichung (4-2).

$$f_{Sol,th} = \frac{Q_{Sol,nutz}}{Q_{TWW}} \quad (4-2)$$

mit:

$Q_{Sol,nutz}$ Durch solarthermischen Erzeuger gelieferte Nutzwärme [kWh]

Q_{TWW} Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasserbereitung [kWh]

Eine alternative Berechnung des solarthermischen Deckungsanteils ermöglicht die Verwendung von Gleichung (4-3)

$$f_{Sol,th,alt} = \frac{(Q_{RH} + Q_{TWW}) - Q_{Zusatz,nutz}}{Q_{RH} + Q_{TW}} \quad (4-3)$$

mit:

Q_{RH}	Wärmeverbrauch für Raumheizung [kWh]
Q_{TWW}	Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasserbereitung [kWh]
$Q_{Zusatz,nutz}$	Durch Zusatzwärmeerzeuger gelieferte Nutzwärme [kWh]

Abweichungen zwischen dem mit Gleichung (4-1) und dem mit Gleichung (4-3) berechneten solarthermischen Deckungsanteil ergeben sich aufgrund der Wärmeverluste des Warmwasserspeichers. Im Folgenden wird ausschließlich Gleichung (4-1) genutzt. Hierbei werden die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers anteilmäßig dem solarthermischen Erzeuger und dem Zusatzwärmeerzeuger zugeordnet. Ebenso wird mit einer Temperaturerhöhung bzw. einer Temperaturabsenkung des Warmwasserspeichers verfahren. Demnach gilt gemäß Gleichung (4-4)

$$Q_{Sol,nutz} = Q_{Sol} - Q_V \cdot \frac{Q_{Sol}}{Q_{Sol} + Q_{Zusatz}} - Q_{\Delta Sp} \cdot \frac{Q_{Sol}}{Q_{Sol} + Q_{Zusatz}} \quad (4-4)$$

mit:

$Q_{Sol,nutz}$	Durch solarthermischen Erzeuger gelieferte Nutzwärme [kWh]
Q_{Sol}	Durch solarthermischen Erzeuger in den Warmwasserspeicher eingebrachte Wärme [kWh]
Q_{Zusatz}	Durch Zusatzwärmeerzeuger in den Warmwasserspeicher eingebrachte Wärme [kWh]
Q_V	Wärmeverluste des Warmwasserspeichers [kWh]
$Q_{\Delta Sp}$	Änderung der im Warmwasserspeicher gespeicherten thermischen Energie [kWh]

Durch den **solarthermischen Nutzungsgrad** $\eta_{Sol,th}$ wird das Verhältnis der solarthermisch erzeugten Nutzwärme zu der zur Verfügung stehenden Strahlungsenergie charakterisiert. Der solarthermische Nutzungsgrad berechnet sich gemäß Gleichung (4-5).

$$\eta_{Sol,th} = \frac{Q_{Sol,nutz}}{H_{Sol} \cdot A_{Koll}} \quad (4-5)$$

mit:

$Q_{Sol,nutz}$	Durch solarthermischen Erzeuger gelieferte Nutzwärme [kWh]
H_{Sol}	Zur Verfügung stehende Strahlungsenergie in der Ebene des Sonnenkollektors [kWh/m ²]
A_{Koll}	Bruttokollektorfläche [m ²]

Die Ermittlung der in der Ebene des Sonnenkollektors zur Verfügung stehenden Strahlungsenergie H_{Sol} erfolgte hierbei auf Basis von Rasterdaten der Monatssummen für die Globalstrahlung, die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen wurden. Diese Daten wurden rechnerisch an die Ausrichtung und an die Neigung des Sonnenkollektors der jeweiligen Feldtestanlage angepasst.

Als weiterer Kennwert wurde die **eingesparte Menge an CO₂-Äquivalenten** $m_{CO_2,sav}$ durch die Verwendung des solarthermischen Wärmeerzeugers berechnet. Als Referenz wurde hier die Menge an CO₂-Äquivalenten herangezogen, die bei Verwendung eines Gas-Brennwert-Kessels für die Erzeugung derselben Wärmemenge wie diejenige, die der solarthermische Wärmeerzeuger in den Speicher liefert, frei wird. Die eingesparte Menge an CO₂-Äquivalenten berechnet sich gemäß Gleichung (4-6).

$$m_{CO_2,sav} = \frac{Q_{Sol}}{\eta_{Gas,bw}} \cdot EW_{Erdgas} \quad (4-6)$$

mit:

Q_{Sol} Durch solarthermischen Erzeuger in den Warmwasserspeicher eingebrachte Wärme [kWh]

$\eta_{Gas,bw}$ Nutzungsgrad Gasbrennwertkessel [-]

EW_{Erdgas} spezifischer Emissionswert Erdgas [kg_{CO2}/kWh]

Um eine sinnvolle Vergleichbarkeit der eingesparten Mengen an CO₂-Äquivalenten bei den betrachteten Anlagen zu gewährleisten, wurde als Zusatzwärmeerzeuger grundsätzlich, d. h. unabhängig von dem tatsächlich installierten Zusatzwärmeerzeuger, ein Gasbrennwertkessel angenommen. Der für diesen angenommene Nutzungsgrad beträgt 0,85. Für Erdgas wurde für die spezifischen CO₂-Äquivalentemissionen mit einem Wert von 0,24 kg CO₂-Äq/kWh gerechnet.

4.1.1 Feldtestanlage EdK

Die Feldtestanlage EdK² beinhaltet einen zentralen Warmwasserspeicher bzw. Kombispeicher mit einem Gesamtvolumen von 600 l. An den zentralen Warmwasserspeicher der Anlage EdK sind vier hydraulische Kreisläufe angeschlossen:

- Solarkreislauf
- Trinkwasserkreislauf
- Kesselkreislauf
- Heizungskreislauf

Bei der thermischen Solaranlage handelt es sich um eine solare Kombianlage, die zur kombinierten Erzeugung von Wärme für die Trinkwassererwärmung und zur Gebäudebeheizung dient. Ein vereinfachtes Schema der Feldtestanlage EdK ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung befindet sich im Abschnitt 7, in Abbildung 7-1.

Auf dem Dach des Gebäudes befinden sich fünf Flachkollektoren mit jeweils einer Bruttofläche von 2,59 m², die Richtung Südsüdwest (Azimut +22,5°) ausgerichtet sind. Insgesamt ergibt sich somit eine Bruttokollektorfläche von 12,95 m². Die Dachneigung beträgt ca. 28°. Abbildung 4-2 zeigt die auf dem Dach des Gebäudes angebrachten Flachkollektoren.

Die mithilfe der Flachkollektoren gewonnene solare Wärme wird mittels eines Wasser-Glykol-Gemischs zum Kombispeicher transportiert. Bei diesem handelt es sich um einen sogenannten Tank-im-Tank Speicher. Dort wird die Wärme über einen Wärmeübertrager an das Heizungswasser übertragen. Das solar erwärmte Heizungswasser im Kombispeicher wird ggf. über den zweiten Wärmeerzeuger auf das notwendige Temperaturniveau erwärmt. Die Anlage arbeitet hierbei nach dem Prinzip der Rücklaufanhebung. Da der Trinkwasserbehälter im Inneren des im Warmwasserspeicher befindlichen Heizungswassers platziert ist, wird ein Teil der solar gewonnenen Wärme auch an den Trinkwasserkreislauf übertragen.

² Das Akronym „EdK“ charakterisiert eine am Standort Leinfelden-Echterdingen befindliche Kombianlage

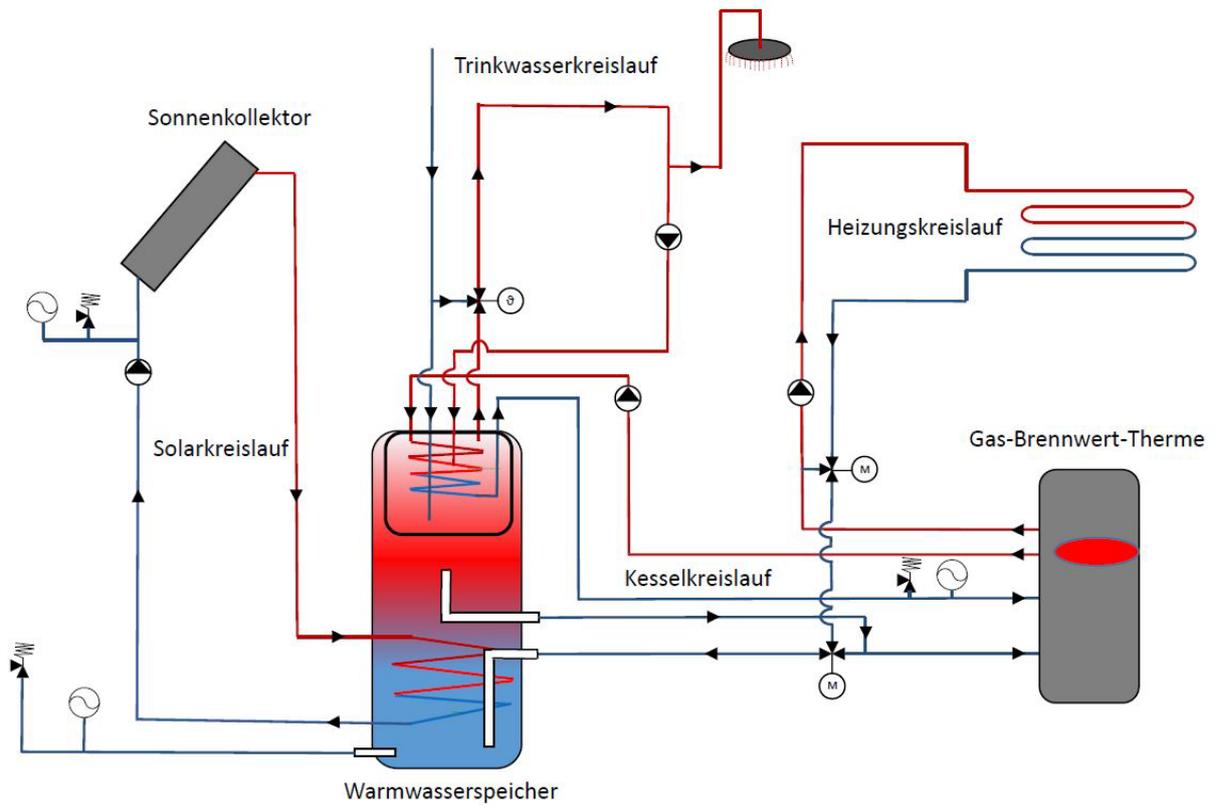


Abbildung 4-1: Vereinfachtes Schema der Feldtestanlage EdK

Abbildung 4-2: Sonnenkollektoren der Feldtestanlage EdK

Als zweiter Wärmeerzeuger ist in der Feldtestanlage EdK eine Gas-Brennwerttherme mit einer Nennwärmeleistung von 19,4 kW installiert. Im Anschluss an die Erwärmung des Heizungswassers durch die Gas-Brennwerttherme durchströmt das Heizungswasser den Heizungskreislauf und gibt hierbei einen Großteil der Wärme an die in der Wohnung befindlichen Heizkörper ab. Anschließend strömt das abgekühlte Heizungswasser entweder in den Kombispeicher oder in die Gas-Brennwerttherme zur erneuten Erwärmung. Die Temperatur des Wassers im Heizungsrücklauf wird hierbei mit der Temperatur des im Kombispeicher bereitstehenden Heizungswassers verglichen. Weist das Wasser im Heizungsrücklauf die höhere Temperatur auf, so strömt es direkt in die Gas-Brennwerttherme. Weist hingegen das im Kombispeicher bereitstehende Heizungswasser die höhere Temperatur auf, so strömt der Heizungsrücklauf in den Speicher und anschließend ggf. zur weiteren Erwärmung in die Gas-Brennwerttherme. Neben der Erwärmung des Heizungswassers auf Vorlauftemperatur wird die Gas-Brennwerttherme auch verwendet, um das solar vorgewärmte Trinkwasser im Inneren des Warmwasserspeichers auf die gewünschte Temperatur zu erwärmen. Das erwärmte Trinkwasser wird anschließend entweder an den Entnahmestellen entnommen oder strömt über die Zirkulationsleitung wieder zurück in den Trinkwasserbehälter des Kombispeichers. Tabelle 4-1 fasst die wichtigsten Merkmale und Kenndaten der einzelnen Systemkomponenten zusammen.

Tabelle 4-1: Merkmale und Kenndaten einzelner Systemkomponenten der Anlage EdK

Warmwasserspeicher	
Ausführung	Tank-im-Tank Kombispeicher
Gesamtvolumen	600 l
Davon Trinkwasser	200 l
Davon Heizungswasser	400 l
Zirkulation Trinkwasser	Ja
Sonnenkollektoren	
Ausführung	Flachkollektoren
Anzahl	5
Bruttofläche je Modul	2,59 m ²
Bruttofläche gesamt	12,95 m ²
Azimut	+22,5°
Neigung zur Horizontalen	28°
Zusatzwärmeerzeuger	
Ausführung	Gas-Brennwerttherme
Nennwärmeleistung	19,4 kW

4.1.1.1. Konventionelle energetische Bilanzierung der Feldtestanlage EdK

Für die energetische Bilanzierung wird die monatlich übertragene thermische Energie der einzelnen hydraulischen Kreisläufe herangezogen. Zudem wird die Änderung der inneren Energie des Kombispeichers berücksichtigt, die mittels der an den Kombispeicher angebrachten Anlegethermoelemente ermittelt wird. Auf Basis dieser Werte wurden die in diesem Abschnitt aufgeführten charakteristischen Kennwerte der Feldtestanlage berechnet.

In Tabelle 4-2 ist die monatlich übertragene thermische Energie der verschiedenen hydraulischen Kreisläufe der Anlage aufgeführt. Zudem ist die monatliche Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers sowie die monatlichen Wärmeverluste des Kombispeichers dargestellt. Diese Wärmeverluste wurden berechnet als Differenz zwischen der monatlich dem Kombispeicher zugeführten und der monatlich aus dem Kombispeicher abgeführten thermischen Energie. Die Änderung der inneren Energie des Kombispeichers, in Form einer Temperaturerhöhung bzw. Temperaturabnahme des beinhaltenen Wassers, wurde für die Berechnung der Wärmeverluste ebenfalls berücksichtigt.

Positive Werte in Tabelle 4-2 stehen für eine Wärmeaufnahme bzw. Temperaturerhöhung, des Kombispeichers und negative Werte stehen für eine Wärmeabgabe bzw. eine Temperaturabnahme.

Bei der Betrachtung der in Tabelle 4-2 dargestellten Wärmemengen des Solarkreislaufs ist auffällig, dass diese teils sehr niedrige Werte aufweisen. Dies liegt daran, dass der Solarkreislauf der Feldtestanlage in den betreffenden Monaten nicht ordnungsgemäß funktionierte. Ursächlich hierfür waren Lufteinträge im Solarkreislauf, die ein Zirkulieren der Solarflüssigkeit verhinderten.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen war dieser Aspekt jedoch von untergeordneter Relevanz, da sich diese auf den Vergleich einer konventionellen energetischen Bilanzierung mit der im Projekt TeBwA entwickelten temperaturbasierte energetische Bilanzierung beschränkten.

Tabelle 4-2: Monatliche Wärmemengen Anlage EdK

Monat	Solarkreis- lauf [kWh]	Trinkwas- serkreislauf [kWh]	Kesselkreis- lauf [kWh]	Heizungs- kreislauf ³ [kWh]	Innere Ener- gie Speicher [kWh]	Wärmever- luste [kWh]
Mai 2021	240	-391	384	-1.056	12	-219
Jun 2021	265	-255	171	-130	-28	-191
Jul 2021	175	-323	290	-171	6	-124
Aug 2021	80	-281	322	-260	-8	-129
Sep 2021	9	-287	384	-311	-2	-109
Okt 2021	0	-334	467	-1.398	7	-126
Nov 2021	16	-447	570	-2.940	-8	-147
Dez 2021	33	-442	572	-3.271	5	-158
Jan 2022	22	-445	750	-3.516	6	-333
Feb 2022	3	-422	608	-2.485	0	-190
Mär 2022	4	-443	656	-2.404	7	-210
Apr 2022	3	-362	470	-1.125	-6	-116
Mai 2022	0	-243	357	-254	5	-109
Jun 2022	350	-269	116	-56	15	-182
Jul 2022	429	-230	14	-12	-4	-217
Aug 2022	151	-191	175	0	-10	-145
Sep 2022	8	-230	327	-248	1	-105
Okt 2022	75	-192	244	-327	3	-123
Nov 2022	102	-348	411	-1.642	-11	-176

Die berechneten Monatswerte für die definierten charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

³ Wird direkt durch die Gas-Brennwert-Therme bedient und ist nur über die Rücklaufanhebung mit dem Kombispeicher verbunden.

Tabelle 4-3: Charakteristische Kennwerte – Monatswerte Feldtestanlage EdK

Monat	solarthermischer Deckungsanteil [%]	solarthermischer Nutzungsgrad [%]	eingesparte Menge an CO ₂ -Äquivalenten [kg]
Mai 2021	10,4	8,1	67,7
Jun 2021	40,3	5,1	74,9
Jul 2021	24,6	6,1	49,5
Aug 2021	10,3	3,0	22,6
Sep 2021	1,1	0,3	2,6
Okt 2021	0,0	0,0	0
Nov 2021	0,4	2,1	4,4
Dez 2021	0,7	5,3	9,4
Jan 2022	0,3	1,9	6,2
Feb 2022	0,0	0,2	0,9
Mär 2022	0,0	0,1	1,0
Apr 2022	0,1	0,0	0,7
Mai 2022	0,0	0,0	0,1
Jun 2022	62,2	9,0	98,9
Jul 2022	92,0	7,8	121,0
Aug 2022	46,3	3,3	42,6
Sep 2022	12,1	0,4	2,4
Okt 2022	8,7	3,8	21,0
Nov 2022	3,5	9,2	28,9

4.1.2 Feldtestanlage LoK

Die Feldtestanlage LoK⁴ beinhaltet einen zentralen Warmwasserspeicher bzw. Kombispeicher mit einem Gesamtvolumen von 1000 l. An den zentralen Warmwasserspeicher der Feldtestanlage LoK sind vier hydraulische Kreisläufe angeschlossen:

- Solarkreislauf
- Trinkwasserkreislauf
- Kesselkreislauf
- Heizungskreislauf

Bei der thermischen Solaranlage handelt es sich um eine solare Kombianlage, die zur kombinierten Erzeugung von Wärme für die Trinkwassererwärmung und zur Gebäudebeheizung dient. Ein vereinfachtes Schema der Feldtestanlage LoK ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung befindet sich im Abschnitt 7, in Abbildung 7-2.

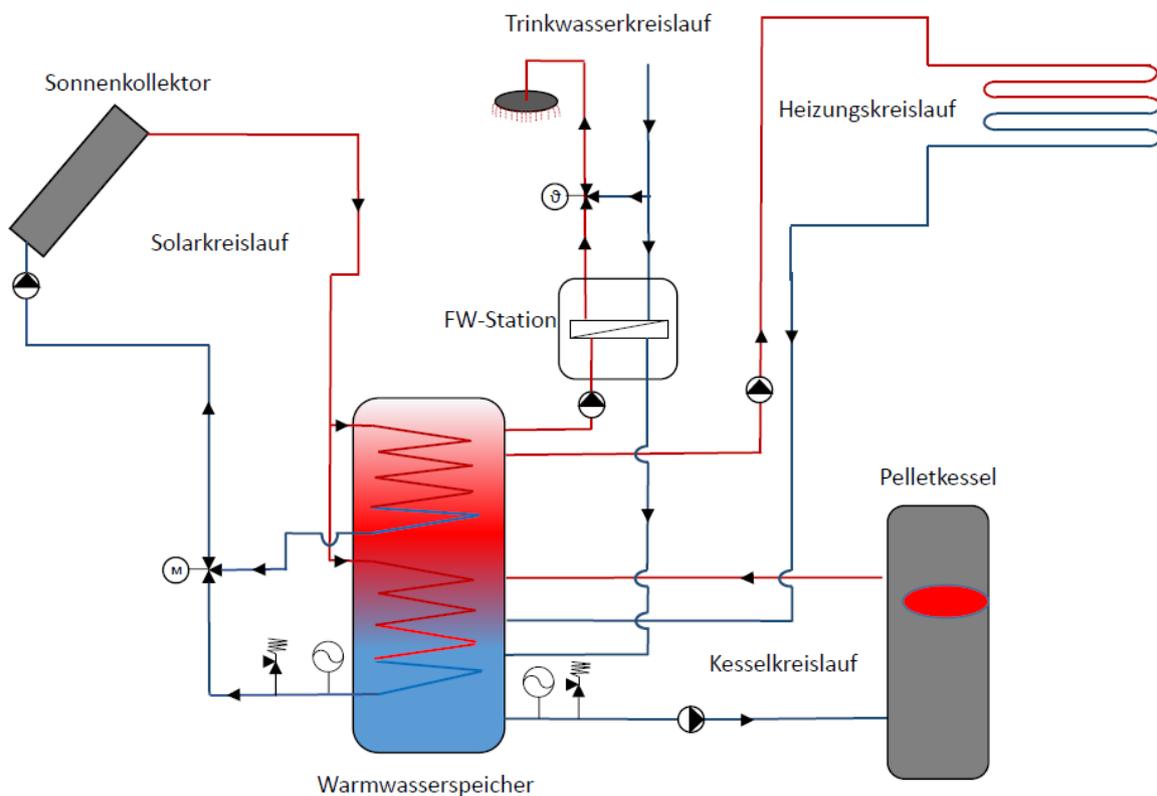


Abbildung 4-3: Vereinfachtes Schema der Feldtestanlage LoK

Auf dem Dach des Gebäudes befinden sich sechs Flachkollektoren mit jeweils einer Bruttofläche von 2,51 m², die Richtung Südwest (Azimut +45°) ausgerichtet sind. Insgesamt ergibt sich somit eine Bruttokollektorfläche von 15,06 m². Die Dachneigung beträgt ca. 30°. Abbildung 4-4 zeigt die auf dem Dach des Gebäudes angebrachten Flachkollektoren.

⁴ Das Akronym „LoK“ charakterisiert eine am Standort Leonberg befindliche Kombianlage



Abbildung 4-4: Sonnenkollektoren der Feldtestanlage LoK

Die mithilfe der Flachkollektoren gewonnene solare Wärme wird mittels eines Wasser-Glykol-Gemischs zum Kombispeicher transportiert. Dort wird die Wärme über einen Wärmeübertrager an das Heizungswasser übertragen. Das solar erwärmte Heizungswasser im Kombispeicher wird ggf. über den zweiten Wärmeerzeuger auf das notwendige Temperaturniveau erwärmt. Die Erwärmung des Trinkwassers erfolgt mittels einer Frischwasserstation, so dass der Warmwasserspeicher vollständig mit Heizungswasser befüllt ist.

Als zweiter Wärmeerzeuger ist in der Feldtestanlage LoK ein Pelletkessel mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW installiert.

Tabelle 4-4 fasst die wichtigsten Merkmale und Kenndaten der einzelnen Systemkomponenten zusammen.

Tabelle 4-4: Merkmale und Kenndaten einzelner Systemkomponenten der Anlage LoK

Warmwasserspeicher	
Ausführung	Pufferspeicher mit Frischwasserstation
Gesamtvolumen	1000 l
Davon Trinkwasser	0 l (da Frischwasserstation)
Davon Heizungswasser	1000 l
Zirkulation Trinkwasser	Nein
Sonnenkollektoren	
Ausführung	Flachkollektoren
Anzahl	6
Bruttofläche je Modul	2,51 m ²
Bruttofläche gesamt	15,06 m ²
Azimut	+45°
Neigung zur horizontalen	30°
Zusatzwärmeerzeuger	
Ausführung	Pelletkessel
Nennwärmeleistung	30,0 kW

4.1.2.1. Konventionelle energetische Bilanzierung der Feldtestanlage LoK

Die energetische Bilanzierung der Feldtestanlage LoK wird gemäß demselben Vorgehen durchgeführt, das bereits in Abschnitt 4.1.1.1 erläutert wurde.

In Tabelle 4-5 ist die monatlich übertragene thermische Energie der verschiedenen hydraulischen Kreisläufe der Anlage aufgeführt. Zudem ist die monatliche Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers sowie die monatlichen Wärmeverluste des Warmwasserspeichers dargestellt. Diese Wärmeverluste wurden berechnet als Differenz aus der monatlich dem Warmwasserspeicher zugeführten und der monatlich aus dem Puffer- bzw. Kombispeicher abgeführten thermischen Energie. Die Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers, in Form einer Temperaturerhöhung bzw. Temperaturabnahme des beinhaltenen Wassers, wurde für die Berechnung der Wärmeverluste ebenfalls berücksichtigt.

Positive Werte in Tabelle 4-5 stehen für eine Wärmeaufnahme bzw. Temperaturerhöhung des Warmwasserspeichers und negative Werte stehen für eine Wärmeabgabe bzw. eine Temperaturabnahme.

Tabelle 4-5: Monatliche Wärmemengen Anlage LoK

Monat	Solarkreis- lauf [kWh]	Trinkwas- serkreislauf [kWh]	Kesselkreis- lauf [kWh]	Heizungs- kreislauf [kWh]	Innere Ener- gie Speicher [kWh]	Wärmever- luste [kWh]
Mär 2021	251	-198	5.424	-4.936	15	-526
Apr 2021	476	-177	4.532	-4.340	-1	-492
Mai 2021	426	-190	2.774	-2.547	10	-452
Jun 2021	577	-170	310	-232	-13	-498
Jul 2021	517	-179	79	0	8	-409
Aug 2021	349	-85	75	-1	-14	-353
Sep 2021	412	-129	495	-367	15	-396
Okt 2021	198	-153	2.928	-2.562	0	-410
Nov 2021	13	-168	6.345	-5.740	-21	-472
Dez 2021	2	-179	7.077	-6.373	16	-510
Jan 2022	13	-268	7.569	-6.797	-10	-527
Feb 2022	81	-266	5.743	-5.110	24	-423
Mär 2022	365	-210	4.740	-4.425	-14	-484
Apr 2022	391	-211	3.504	-3.175	14	-495
Mai 2022	581	-210	801	-715	-10	-466
Jun 2022	608	-122	283	-292	6	-471
Jul 2022	733	-152	136	-231	-11	-497
Aug 2022	621	-86	68	-141	10	-452
Sep 2022	227	-118	996	-722	2	-381
Okt 2022	81	-149	1.131	-639	1	-423
Nov 2022	0	-131	3.263	-2.768	-23	-387

Die berechneten Monatswerte für die charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Charakteristische Kennwerte – Monatswerte Anlage LoK

Monat	solarthermischer Deckungsanteil [%]	solarthermischer Nutzungsgrad [%]	eingesparte Menge an CO ₂ -Äquivalenten [kg]
Mär 2021	4,4	13,5	70,8
Apr 2021	9,5	19,4	134,5
Mai 2021	13,3	16,1	120,2
Jun 2021	65,0	9,4	162,8
Jul 2021	86,7	7,0	145,9
Aug 2021	82,3	2,3	98,7
Sep 2021	45,4	11,1	116,4
Okt 2021	6,3	12,0	55,9
Nov 2021	0,2	2,2	3,8
Dez 2021	0,0	0,3	0,5
Jan 2022	0,2	1,8	3,7
Feb 2022	1,4	6,8	22,8
Mär 2022	7,1	16,4	102,9
Apr 2022	10,0	16,0	110,5
Mai 2022	42,0	13,9	164,0
Jun 2022	68,2	10,3	171,6
Jul 2022	84,4	9,6	207,0
Aug 2022	90,1	8,0	175,3
Sep 2022	18,5	9,0	63,9
Okt 2022	6,7	4,1	22,8
Nov 2022	0,0	0,0	0,0

4.1.3 Feldtestanlage LoT

Die Feldtestanlage LoT⁵ dient zur Trinkwassererwärmung in einem Einfamilienhaus und beinhaltet einen Warmwasserspeicher zur Erwärmung und Vorhaltung von Trinkwarmwasser. Dieser Warmwasserspeicher weist ein Volumen von 300 l auf. An den Warmwasserspeicher der Feldtestanlage LoT sind drei hydraulische Kreisläufe angeschlossen:

- Solarkreislauf
- Trinkwasserkreislauf
- Kesselkreislauf

Bei der thermischen Solaranlage handelt es sich um eine Solaranlage zur Trinkwassererwärmung. Ein vereinfachtes Schema der Feldtestanlage LoT ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung befindet sich im Abschnitt 7, in Abbildung 7-3.

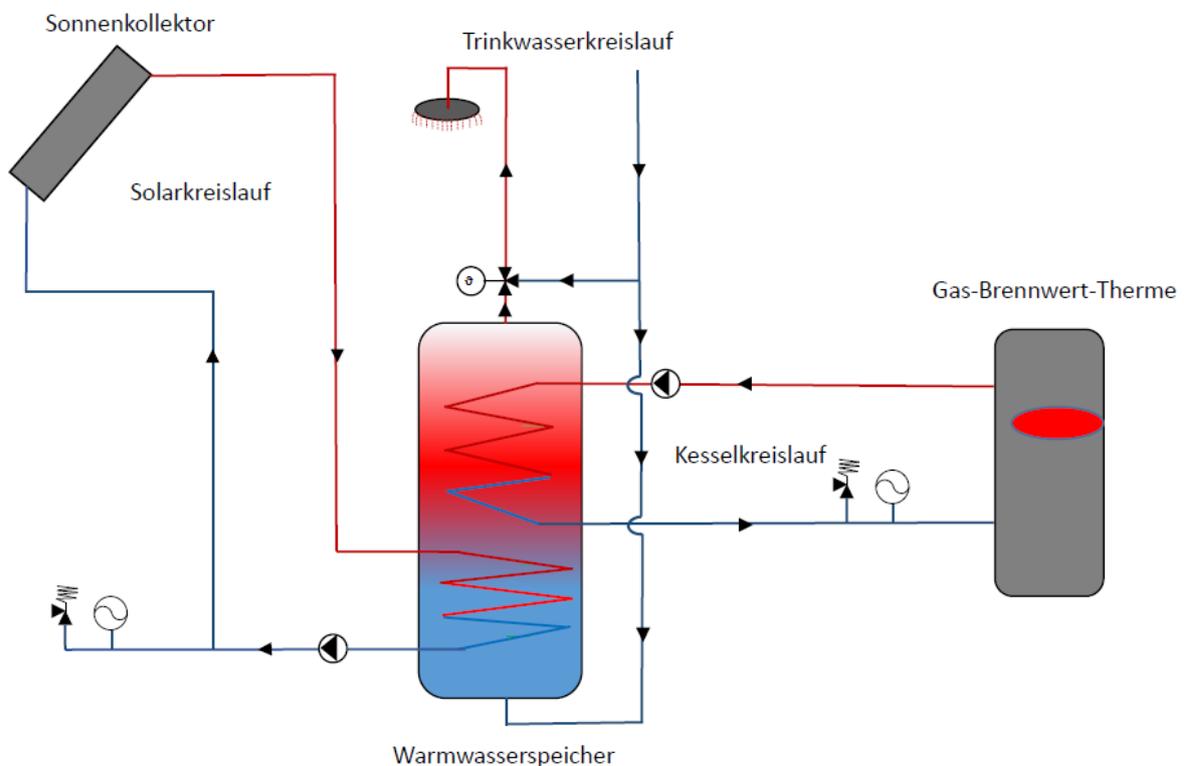


Abbildung 4-5: Vereinfachtes Schema der Feldtestanlage LoT

Auf dem Dach des Gebäudes befinden sich zwei Flachkollektoren mit jeweils einer Bruttofläche von 2,11 m², die Richtung Süden (Azimut 0°) ausgerichtet sind. Insgesamt ergibt sich somit eine Bruttokollektorfläche von 4,22 m². Die Dachneigung beträgt ca. 45°. Abbildung 4-6 zeigt die auf dem Dach des Gebäudes angebrachten Flachkollektoren.

Die mithilfe der Flachkollektoren gewonnene solare Wärme wird mittels eines Wasser-Glykol-Gemischs zum Trinkwasserspeicher transportiert. Dort wird die Wärme über einen Wärmeübertragers an das Trinkwasser übertragen. Das solar erwärmte Trinkwasser wird ggf. über den zweiten Wärmeerzeuger auf das notwendige Temperaturniveau erwärmt.

⁵ Das Akronym „LoT“ charakterisiert eine am Standort Leonberg befindliche Trinkwasseranlage

Als zweiter Wärmeerzeuger ist in der Feldtestanlage LoT eine Gas-Brennwerttherme mit einer Nennwärmeleistung von 23,6 kW installiert.

Tabelle 4-7 fasst die wichtigsten Merkmale und Kenndaten der einzelnen Systemkomponenten zusammen.



Abbildung 4-6: Sonnenkollektoren der Feldtestanlage LoT

Tabelle 4-7: Merkmale und Kenndaten einzelner Systemkomponenten der Anlage LoT

Warmwasserspeicher	
Ausführung	Solar-Trinkwasserspeicher
Gesamtvolumen	300 l
Davon Trinkwasser	300 l
Davon Heizungswasser	0 l
Zirkulation Trinkwasser	Nein
Sonnenkollektoren	
Ausführung	Flachkollektoren
Anzahl	2
Bruttofläche je Modul	2,11 m ²
Bruttofläche gesamt	4,22 m ²
Azimut	0°
Neigung zur horizontalen	45°
Zusatzwärmeerzeuger	
Ausführung	Gas-Brennwerttherme
Nennwärmeleistung	23,6 kW

4.1.3.1. Konventionelle energetische Bilanzierung der Feldtestanlage LoT

In Tabelle 4-8 ist die monatlich übertragene thermische Energie der verschiedenen hydraulischen Kreisläufe der Anlage aufgeführt. Zudem ist die monatliche Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers sowie die monatlichen Wärmeverluste des Warmwasserspeichers dargestellt. Diese Wärmeverluste wurden berechnet als Differenz aus der monatlich dem Warmwasserspeicher zugeführten und der monatlich aus dem Warmwasserspeicher abgeführten thermischen Energie. Die Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers, in Form einer Temperaturerhöhung bzw. Temperaturabnahme des beinhaltenen Wassers, wurde für die Berechnung der Wärmeverluste ebenfalls berücksichtigt.

Positive Werte in Tabelle 4-8 stehen für eine Wärmeaufnahme bzw. Temperaturerhöhung des Warmwasserspeichers und negative Werte stehen für eine Wärmeabgabe bzw. eine Temperaturabnahme.

Tabelle 4-8: Monatliche Wärmemengen Anlage LoT

Monat	Solarkreislauf [kWh]	Trinkwasser- kreislauf [kWh]	Kesselkreis- lauf [kWh]	Innere Energie Speicher [kWh]	Wärmeverluste [kWh]
Sep 2020	186	-129	38	-1	-95
Okt 2020	80	-199	177	1	-57
Nov 2020	90	-217	183	2	-58
Dez 2020	23	-262	270	-2	-33
Jan 2021	13	-139	146	0	-20
Feb 2021	120	-318	254	3	-53
Mär 2021	273	-218	147	5	-197
Apr 2021	180	-167	110	-8	-131
Mai 2021	130	-138	123	9	-106
Jun 2021	197	-142	20	-4	-79
Jul 2021	174	-98	2	3	-75
Aug 2021	153	-108	12	-9	-66
Sep 2021	196	-105	31	5	-117
Okt 2021	104	-57	97	0	-144
Nov 2021	35	-142	158	-4	-55
Dez 2021	24	-155	185	-1	-55
Jan 2022	41	-121	123	2	-41
Feb 2022	82	-126	85	4	-37
Mär 2022	196	-155	47	-6	-94
Apr 2022	152	-107	42	5	-82
Mai 2022	183	-79	2	3	-103
Jun 2022	175	-82	0	2	-91
Jul 2022	212	-117	0	-3	-98
Aug 2022	175	-75	0	-1	-101
Sep 2022	124	-63	15	0	-76
Okt 2022	106	-52	37	-3	-94
Nov 2022	44	-85	114	-2	-75

Die berechneten Monatswerte für die charakteristischen Kennwerte werden in Tabelle 4-9 zusammengefasst.

Tabelle 4-9: Charakteristische Kennwerte – Monatswerte Feldtestanlage LoT

Monat	solarthermischer Deckungsanteil [%]	solarthermischer Nutzungsgrad [%]	eingesparte Menge an CO ₂ -Äquivalenten [kg]
Sep 2020	83,0	16,6	52,5
Okt 2020	31,1	18,0	22,6
Nov 2020	33,0	22,6	25,4
Dez 2020	7,8	14,4	6,5
Jan 2021	8,2	7,6	3,7
Feb 2021	32,1	28,9	33,9
Mär 2021	65,0	28,1	77,1
Apr 2021	62,1	14,6	50,8
Mai 2021	51,4	12,9	36,7
Jun 2021	90,8	17,4	55,6
Jul 2021	98,9	15,8	49,1
Aug 2021	92,7	14,5	43,2
Sep 2021	86,3	14,9	55,3
Okt 2021	51,7	6,1	29,4
Nov 2021	18,1	12,4	9,9
Dez 2021	11,5	10,2	6,8
Jan 2022	25,0	13,3	11,6
Feb 2022	49,1	17,7	23,2
Mär 2022	80,7	18,4	55,3
Apr 2022	78,4	14,6	42,9
Mai 2022	98,9	11,1	51,7
Jun 2022	100,0	11,2	49,4
Jul 2022	100,0	12,8	59,9
Aug 2022	100,0	9,4	49,4
Sep 2022	89,2	10,5	35,0
Okt 2022	74,1	7,9	29,9
Nov 2022	27,8	8,8	12,4

4.1.4 Feldtestanlage WaT

Die Feldtestanlage WaT⁶ dient zur Trinkwassererwärmung in einem Mehrfamilienhaus und beinhaltet einen Warmwasserspeicher zur Erwärmung und Vorhaltung von Trinkwarmwasser. Dieser Warmwasserspeicher weist ein Volumen von 758 l auf. An den Warmwasserspeicher der Feldtestanlage WaT sind drei hydraulische Kreisläufe angeschlossen:

- Solarkreislauf
- Trinkwasserkreislauf
- Kesselkreislauf

Bei der thermischen Solaranlage handelt es sich um eine Solaranlage zur Trinkwassererwärmung. Ein vereinfachtes Schema der Feldtestanlage WaT ist in Abbildung 4-7 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung befindet sich im Abschnitt 7, in Abbildung 7-4.

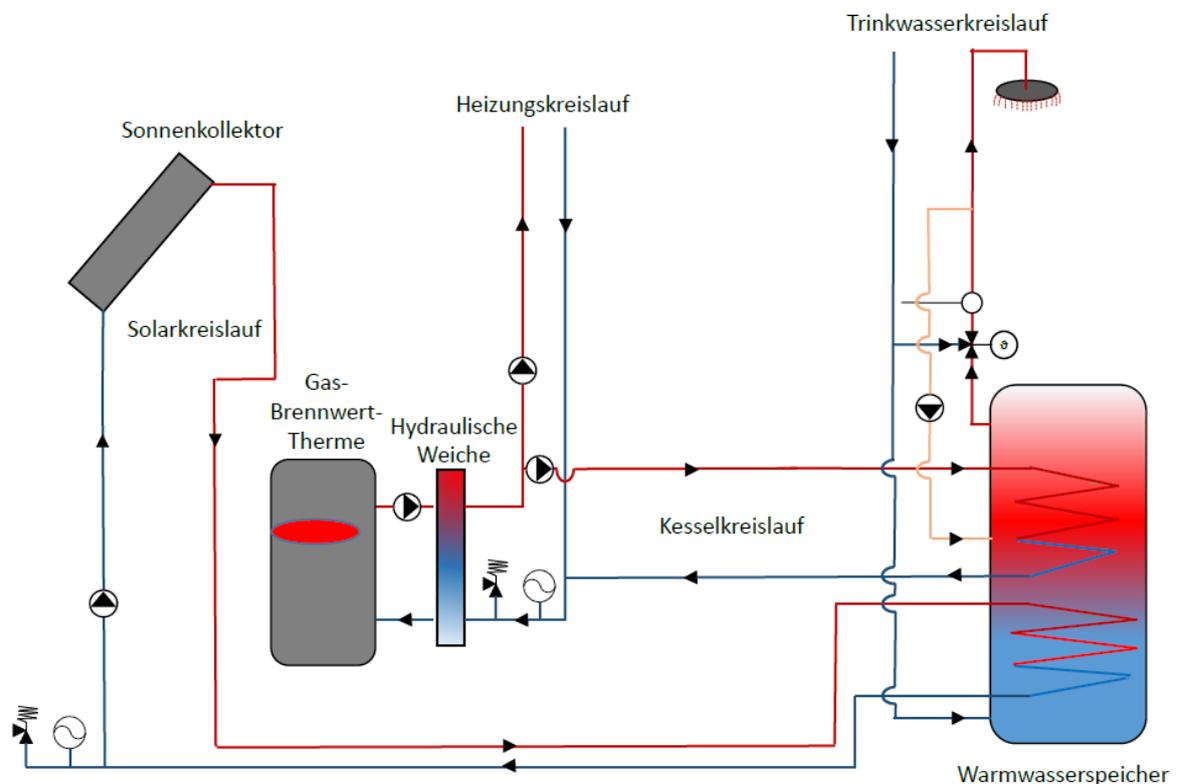


Abbildung 4-7: Vereinfachtes Schema der Feldtestanlage WaT

Auf dem Dach des Gebäudes befinden sich zwei Vakuumröhrenkollektoren mit jeweils einer Bruttofläche von 2,5 m², die Richtung Südsüdwest (Azimut +22,5°) ausgerichtet sind. Insgesamt ergibt sich somit eine Bruttokollektorfläche von 5,0 m². Die Dachneigung beträgt ca. 45°. Die mithilfe der Vakuumröhrenkollektoren gewonnene solare Wärme wird mittels eines Wasser-Glykol-Gemischs zum Warmwasserspeicher transportiert. Dort wird die Wärme über einen Wärmeübertrager an das Trinkwasser übertragen. Das solar erwärmte Trinkwasser wird ggf. über den zweiten Wärmeerzeuger auf das notwendige Temperaturniveau erwärmt. Während der im Rahmen des Projekts durchgeführten in-situ Messungen lag ein Defekt der auf dem

⁶ Das Akronym „WaT“ charakterisiert eine am Standort **Wa**iblingen befindliche **Tr**inkwasseranlage

Dach installierten Vakuumröhrenkollektoren vor. Daher war der Solarkreislauf der Feldtestanlage WaT während der durchgeführten in-situ Messungen außer Betrieb.

Als zweiter Wärmeerzeuger ist in der Feldtestanlage WaT eine Gas-Brennwerttherme mit einer Nennwärmeleistung von 32 kW installiert.

Tabelle 4-10 fasst die wichtigsten Merkmale und Kenndaten der einzelnen Systemkomponenten zusammen.

Tabelle 4-10: Merkmale und Kenndaten einzelner Systemkomponenten der Feldtestanlage WaT

Warmwasserspeicher	
Ausführung	Solar-Trinkwasserspeicher
Gesamtvolumen	758 l
Davon Trinkwasser	758 l
Davon Heizungswasser	0 l
Zirkulation Trinkwasser	Ja
Sonnenkollektoren	
Ausführung	Vakuumröhrenkollektoren
Anzahl	2
Bruttofläche je Modul	2,5 m ²
Bruttofläche gesamt	5,0 m ²
Azimut	+22,5°
Neigung zur horizontalen	45°
Zusatzwärmeerzeuger	
Ausführung	Gas-Brennwerttherme
Nennwärmeleistung	32 kW

4.1.4.1. Konventionelle energetische Bilanzierung der Feldtestanlage WaT

In Tabelle 4-11 ist die monatlich übertragene thermische Energie der verschiedenen hydraulischen Kreisläufe der Anlage aufgeführt. Zudem ist die monatliche Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers sowie die monatlichen Wärmeverluste des Warmwasserspeichers dargestellt. Diese Wärmeverluste wurden berechnet als Differenz aus der monatlich dem Warmwasserspeicher zugeführten und der monatlich aus dem Warmwasserspeicher abgeführten thermischen Energie. Die Änderung der inneren Energie des Warmwasserspeichers, in Form einer Temperaturerhöhung bzw. Temperaturabnahme des beinhaltenen Wassers, wurde für die Berechnung der Wärmeverluste ebenfalls berücksichtigt.

Positive Werte in Tabelle 4-11 stehen für eine Wärmeaufnahme bzw. Temperaturerhöhung des Warmwasserspeichers und negative Werte stehen für eine Wärmeabgabe bzw. eine Temperaturabnahme.

Tabelle 4-11: Monatliche Wärmemengen Feldtestanlage WaT

Monat	Solarkreislauf [kWh]	Trinkwasser- kreislauf [kWh]	Kesselkreis- lauf [kWh]	Innere Energie Speicher [kWh]	Wärmeverluste [kWh]
Nov 2020	0	-698	1.152	-5	-459
Dez 2020	0	-828	1.320	1	-491
Jan 2021	0	-850	1.349	-2	-501
Feb 2021	0	-770	1.221	1	-450
Mär 2021	0	-874	1.360	3	-483
Apr 2021	0	-745	1.195	-2	-452
Mai 2021	0	-693	1.174	2	-479
Jun 2021	0	-505	902	2	-395
Jul 2021	0	-598	1.089	3	-488
Aug 2021	0	-441	908	-1	-468
Sep 2021	0	-525	983	-1	-459
Okt 2021	0	-713	1.204	-2	-493
Nov 2021	0	-748	1.251	-3	-506
Dez 2021	0	-863	1.397	0	-534
Jan 2022	0	-775	1.324	-3	-552
Feb 2022	0	-745	1.229	2	-482
Mär 2022	0	-813	1.338	1	-524
Apr 2022	0	-746	1.222	-2	-478
Mai 2022	0	-633	1.103	4	-466
Jun 2022	0	-488	917	1	-428
Jul 2022	0	-404	828	3	-421
Aug 2022	0	-251	677	0	-426
Sep 2022	0	-415	834	-2	-421
Okt 2022	0	-518	929	-4	-415
Nov 2022	0	-552	977	0	-425

Wie bereits erwähnt, lag während der Messperiode ein Defekt im Solarkreislauf der Feldtestanlage WaT vor. Entsprechend wurden keine solaren Erträge generiert, weshalb in Tabelle 4-11 für die monatlichen Wärmemengen des Solarkreises stets ein Wert von 0 kWh aufgeführt ist.

Auf eine Berechnung des solarthermischen Deckungsanteils, des solarthermischen Nutzungsgrads und der eingesparten Menge an CO₂-Äquivalenten wurde daher verzichtet.

4.2 Genauigkeit der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung

Bei den durchgeführten temperaturbasierten energetischen Bilanzierungen der Feldtestanlagen wurden die im regulären Betrieb auftretenden Temperaturänderung für eine Berechnung des jeweiligen Volumenstroms genutzt. Die einzige Ausnahme hiervon stellt die am Ende von Abschnitt 3.2 für die Anlage LoK beschriebene Untersuchung dar, mit der ermittelt wurde welche Verbesserungen sich bei der Bestimmung des Volumenstroms im realen Anlagenbetrieb durch die vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten mittels einer Aktivierung des elektrischen Heizstabs erzielen lassen.

Eine Aktivierung der installierten elektrischen Heizstäbe vergrößerte zwar die Dynamik der Temperaturänderungen und verbesserte dadurch auch die Genauigkeit der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung – verbraucht aber auch zusätzliche elektrische Energie. Da aber die regulär auftretenden Temperaturänderungen für eine Berechnung des jeweiligen Volumenstroms mit hoher bis sehr hoher Genauigkeit ausreichen, kann auf eine Aktivierung des Heizstabs im Allgemeinen verzichtet werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden deshalb hier nur Daten herangezogen, die auf Basis der im regulären Betrieb auftretenden Temperaturdynamiken erzeugt wurden. Bei der im Folgenden diskutierten Genauigkeit sollte daher der Umstand beachtet werden, dass eine Erhöhung der Genauigkeit durch den Einsatz elektrischer Heizstäbe möglich ist.

Während des Projektbearbeitungszeitraums wurde die monatlich übertragene thermische Energie einiger der hydraulischen Kreisläufe der vier untersuchten Feldtestanlagen auf Basis des im Projekt entwickelten „TeBwA-Verfahrens“ zur temperaturbasierten energetischen Bilanzierung berechnet. Diese Ergebnisse wurden mit den entsprechenden Ergebnissen verglichen, die auf Basis einer energetischen Bilanzierung unter Verwendung konventioneller Wärmemähler ermittelt wurden. Die ermittelten Ergebnisse und die Abweichungen zwischen den Ergebnissen einer temperaturbasierten energetischen Bilanzierung und den Ergebnissen einer konventionellen energetischen Bilanzierung sind in Tabelle 4-12 bis Tabelle 4-15 aufgeführt.

Tabelle 4-12: Konventionelle und temperaturbasierte energetische Bilanzierung für Feldtestanlage EdK

Monat	Hydraulischer Kreislauf	Konventionelle Bilanzierung [kWh]	Temperaturbasierte Bilanzierung [kWh]	Abweichung [%]
Okt 2021	Kessel	467	504	7,92
Okt 2021	Heizung	1.398	1.304	-6,72
Jun 2022	Solar	350	325	-7,14

Tabelle 4-13: Konventionelle und temperaturbasierte energetische Bilanzierung für Feldtestanlage LoK

Monat	Hydraulischer Kreislauf	Konventionelle Bilanzierung [kWh]	Temperaturbasierte Bilanzierung [kWh]	Abweichung [%]
Jun 2021	Solar	499	444	-11,02
Jul 2021	Solar	517	444	-14,12
Aug 2021	Solar	349	324	-7,16
Okt 2021	Heizung	1.939	1.946	0,36
Okt 2021	Kessel	2.254	2.284	1,33
Okt 2021	Solar	145	159	9,66
Nov 2021	Heizung	5.739	5.544	-3,40
Nov 2021	Kessel	6.345	6.371	0,41
Nov 2021	Solar	13	13	0,00
Jan 2022	Trinkwasser	268	285	6,34
Feb 2022	Trinkwasser	266	274	3,01
Jun 2022	Solar	542	483	-10,89
Jun 2022	Trinkwasser	110	120	9,09

Tabelle 4-14: Konventionelle und temperaturbasierte energetische Bilanzierung für Feldtestanlage LoT

Monat	Hydraulischer Kreislauf	Konventionelle Bilanzierung [kWh]	Temperaturbasierte Bilanzierung [kWh]	Abweichung [%]
Jun 2021	Solar	197	206	4,57
Jun 2021	Trinkwasser	142	110	-22,54
Jul 2021	Solar	174	178	2,30
Jul 2021	Trinkwasser	98	90	-8,16
Aug 2021	Kessel	12	21	75,00
Aug 2021	Solar	153	156	1,96
Aug 2021	Trinkwasser	108	92	-14,81
Sep 2021	Kessel	31	39	25,81
Sep 2021	Solar	196	219	11,73
Sep 2021	Trinkwasser	105	101	-3,81
Okt 2021	Kessel	97	107	10,31
Okt 2021	Solar	106	113	6,60
Okt 2021	Trinkwasser	57	58	1,75
Nov 2021	Kessel	158	162	2,53
Nov 2021	Solar	35	33	-5,71
Nov 2021	Trinkwasser	142	133	-6,34
Jun 2022	Solar	175	190	8,57
Jun 2022	Trinkwasser	79	82	3,80

Tabelle 4-15: Konventionelle und temperaturbasierte energetische Bilanzierung für Feldtestanlage WaT

Monat	Hydraulischer Kreislauf	Konventionelle Bilanzierung [kWh]	Temperaturbasierte Bilanzierung [kWh]	Abweichung [%]
Jun 2021	Trinkwasser	501	515	2,79
Jul 2021	Trinkwasser	419	390	-6,92
Aug 2021	Trinkwasser	441	433	-1,81
Okt 2021	Kessel	872	944	8,26
Okt 2021	Trinkwasser	574	589	2,61
Nov 2021	Trinkwasser	756	743	-1,72
Dez 2021	Trinkwasser	863	837	-3,01
Jun 2022	Kessel	917	929	1,31
Jun 2022	Trinkwasser	488	464	-4,92
Jul 2022	Kessel	828	716	-13,53
Jul 2022	Trinkwasser	322	331	2,80
Aug 2022	Kessel	677	776	14,62
Aug 2022	Trinkwasser	251	313	24,7
Sep 2022	Kessel	834	856	2,64
Sep 2022	Trinkwasser	415	417	0,48

An einzelnen Tagen traten Probleme bei der Aufzeichnung der Messwerte auf. In diesen Fällen wurde der entsprechende Tag sowohl bei der konventionellen als auch bei der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung nicht berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit der monatlichen Ergebnisse zu gewährleisten. Abweichungen zwischen den in Abschnitt 4.1 und den in Tabelle 4-12 bis Tabelle 4-15 aufgeführten Werten für die übertragene Wärme der einzelnen hydraulischen Kreisläufe sind diesem Vorgehen geschuldet.

Aus Tabelle 4-12 bis Tabelle 4-15 ist ersichtlich, dass eine energetische Bilanzierung unter Verwendung ausschließlich kostengünstiger Temperatursensoren mit einer Abweichung von $\pm 10\%$ gegenüber einer konventionellen energetischen Bilanzierung auf Basis von Wärmemählern grundsätzlich möglich ist. Für einige wenige Monate treten jedoch auch Abweichungen im Bereich zwischen $\pm 10\%$ und $\pm 20\%$ auf; die entsprechenden Werte sind gelb hinterlegt. Einzelne Monate weisen sogar Abweichungen größer als $\pm 20\%$; hier sind die entsprechenden Werte rot eingefärbt. Insbesondere bei der Bewertung dieser relativ großen Abweichungen ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese primär in Kombination mit kleinen absoluten Wärmemengen auftreten – insbesondere bei der Anlage LoT (vgl. Tabelle 4-14).

Bei der Bewertung der in Tabelle 4-12 bis Tabelle 4-15 dargestellten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass der Vergleich auf Basis von Monatswerten erfolgt und bei einzelnen Tagen auch Abweichungen auftreten können, die teilweise deutlich größer als $\pm 10\%$ sind.

Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit kann, wie bereits oben erwähnt, durch den Einsatz elektrischer Heizstäbe erreicht werden.

4.3 Erzeugung selbstlernender, adaptiver Auswertealgorithmen

Im Bearbeitungszeitraum des Projekts wurde auch geprüft, ob sich durch die Verwendung selbstlernender, adaptiver Auswertealgorithmen allgemeingültige Korrekturfaktoren bestimmen lassen können, die im Zusammenhang mit der Summation der relevanten Wärmemengen genutzt werden können. Diese Korrekturfaktoren sollten für die unterschiedlichen, an den zentralen Warmwasserspeicher angeschlossenen, hydraulischen Kreisläufe sowie für den Warmwasserspeicher selbst ermittelt werden. Entsprechende Untersuchungen wurden für die vier mit Messtechnik ausgerüsteten Feldtestanlagen durchgeführt. Hierbei konnten individuelle, für die jeweiligen hydraulischen Kreisläufe und Warmwasserspeicher gültige, Korrekturfaktoren ermittelt werden, durch deren Verwendung die Genauigkeit der berechneten, übertragenen Wärmemengen gesteigert werden konnte. Eine Bestimmung allgemeingültiger Korrekturfaktoren, die anlagenübergreifend für die unterschiedlichen Arten hydraulischer Kreisläufe und Warmwasserspeicher verwendet werden können, war hingegen nicht möglich. Um einen individuellen Korrekturfaktor bestimmen zu können, ist jedoch das Vorhandensein eines Referenzwerts erforderlich, der mit einem konventionellen Wärmehemometer ermittelt werden muss. Da bei der Umsetzung des TeBwA-Verfahrens zukünftig keine konventionellen Wärmehemometer in entsprechenden wärmetechnischen Anlagen zum Einsatz kommen sollen, steht demzufolge auch kein Referenzwert für die Bestimmung eines Korrekturfaktors zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde von einer weiteren Ermittlung entsprechender Korrekturfaktoren auf Basis selbstlernender, adaptiver Auswertealgorithmen abgesehen.

4.4 Ökonomischer und ökologischer Vergleich energetische Bilanzierung

In diesem Abschnitt wird das neu entwickelte „TeBwA-Verfahren“ unter finanziellen Aspekten und ökologischen Aspekten mit einer konventionellen energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen mittels Wärmehemometern verglichen und bewertet.

Für den ökonomischen Vergleich werden im Folgenden die notwendigen Komponenten inklusive einer Kostenschätzung aufgelistet, die zur Realisierung der energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen mit dem TeBwA-Verfahren erforderlich sind.

Aufgrund von Skalierungseffekten sowie einer Serienproduktion wird erwartet, dass gegenüber den hier angegebenen Kosten noch ein signifikantes Kostensenkungspotenzial besteht.

Tabelle 4-16 fasst die Investitionskosten zusammen, die für die Bilanzierung einer Anlage mit dem TeBwA-Verfahren anfallen, die entweder aus drei (solarthermische Anlage zur Trinkwassererwärmung) oder aus vier (solarthermische Kombianlage) hydraulischen Kreisläufen besteht. Für jeden der hydraulischen Kreisläufe werden zur Ermittlung des Volumenstroms jeweils zwei Temperatursensoren benötigt. Diese werden in die warmwasserführende Seite des jeweiligen Kreislaufs integriert. Zusätzlich wird ein weiterer

Temperatursensor, jeweils auf der kaltwasserführenden Seite des jeweiligen Kreislaufs benötigt, um die eigentliche energetische Bilanzierung, d. h. die Ermittlung der übertragenen Wärme der Anlage, durchführen zu können. Somit ergibt sich eine Anzahl von neun bzw. zwölf erforderlichen Temperatursensoren.

Für die Messwerterfassung ist als Zwischenschritt ein Arduino-basierter Mikrocontroller⁷ vorgesehen. In jeden der hydraulischen Kreisläufe wird zudem ein elektrisches Heizelement eingebracht. Dieses wird benötigt, um gezielt thermische Energie in den Kreislauf einbringen und so vorsätzlich Temperaturgradienten generieren zu können, wenn die Temperaturdynamik aus dem regulären Betrieb der Anlage zu gering für eine zuverlässige temperaturbasierte Volumenstromberechnung ist. Des Weiteren werden die Kosten für die Fertigung der Messstrecken berücksichtigt. Der hierfür angesetzte Betrag beinhaltet sowohl die anfallenden Materialkosten als auch die Lohnkosten.

Tabelle 4-16: Kosten TeBwA-Volumenstrommessung

Komponente	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis
Temperatursensor	9 – 12	10 €	90 – 120 €
Messwerterfassung	1	20 €	20 €
Elektrisches Heizelement	3 – 4	15 €	45 – 60 €
Messstrecke	3 – 4	20 €	60 – 80 €

In Tabelle 4-17 sind die Investitionskosten aufgeführt, die für eine entsprechende konventionelle energetische Bilanzierung mittels Wärmezählern anfallen. Hierbei wird für jeden hydraulischen Kreislauf ein Wärmezähler benötigt. Zusätzlich ist auch in diesem Fall eine zentrale Datenerfassung erforderlich. Da jedoch im Allgemeinen bereits ein Regler für die solarthermische Anlage und für die Nachheizung vorhanden ist, wird hierfür nur ein Kostenaufschlag für eine entsprechende Erweiterung der Regelung angesetzt.

Tabelle 4-17: Kosten konventionelle Bilanzierung

Komponente	Anzahl	Einzelpreis	Gesamtpreis
Wärmezähler	3 – 4	150 €	450 – 600 €
Aufpreis für Erweiterung Regelung	1	150 €	150 €

Die Tabelle 4-18 dient der Gegenüberstellung der Investitionskosten für eine konventionelle energetische Bilanzierung gegenüber jenen für eine temperaturbasierte energetische Bilanzierung („TeBwA“ Bilanzierung).

⁷ <https://www.mikrocontroller.net/articles/Arduino>

Tabelle 4-18: Gegenüberstellung Investitionskosten

	Kombianlage	TW-Anlage
Konventionelle Bilanzierung	750 €	600 €
„TeBwA“ Bilanzierung	280 €	215 €

Werden die **Investitionskosten** der beiden Bilanzierungsarten ins Verhältnis gesetzt, dann zeigt sich, dass die Investitionskosten für eine temperaturbasierte energetische Bilanzierung mittels des „TeBwA“-Verfahrens gegenüber jenen für eine konventionelle energetische Bilanzierung um ein Vielfaches geringer sind. Sie liegen im Fall einer solarthermischen Anlage zur Trinkwassererwärmung (TW-Anlage) bei ca. 36 % und im Fall einer solarthermischen Kombianlage bei ca. 37 % der Kosten für eine konventionelle energetische Bilanzierung.

Wird weiterhin zusätzlich berücksichtigt, dass bei einer Betrachtung über den typischen Nutzungszeitraum einer thermischen Solaranlage von rund 25 Jahren die Wärmezähler ca. 4 bis 5 Mal aufgrund der begrenzten Nutzungsdauer der in ihnen integrierten Batterie ausgetauscht werden müssen, dann betragen die Kosten des „TeBwA“-Verfahrens nur rund 10 % der Kosten einer konventionellen energetischen Bilanzierung mittels Wärmezählern.

Im Gegensatz zu den Investitionskosten gestaltet sich ein Vergleich der **Betriebskosten** des TeBwA-Verfahrens deutlich schwieriger, da diese maßgeblich davon abhängen, wie oft bzw. wie lange das elektrische Heizelement zur Generierung von Temperaturgradienten betrieben wird. Wie aus Abschnitt 3.2 ersichtlich ist, bewegt sich die Zeitdauer für die Aktivierung des elektrischen Heizelements im Bereich einer Sekunde. Mit einer Kilowattstunde elektrischer Energie können bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1,5 kW daher ca. 2.000 bis 3.000 Aktivierungen des elektrischen Heizelements durchgeführt werden. Da die Notwendigkeit für die vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten vom jeweiligen hydraulischen Kreislauf der Anlage sowie den darin herrschenden Betriebsbedingungen abhängt, ist eine allgemeingültige Aussage zu dem daraus resultierenden Stromverbrauch sowie den damit verbundenen Kosten nicht möglich. Zusammenfassend lässt sich aber feststellen, dass der Verbrauch von elektrischer Energie für die vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten beim Einsatz des TeBwA-Verfahrens für die energetische Bilanzierung typischer Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und typischer solarer Kombianlagen vermutlich im Bereich einiger weniger Kilowattstunden pro Jahr liegen wird. Die hieraus resultierenden Stromkosten sind mit einigen wenigen EURO pro Jahr vernachlässigbar.

Unter **primärenergetischen Aspekten** weist das TeBwA-Verfahren im Vergleich zu einer konventionellen energetischen Bilanzierung mittels Wärmezählern deutliche Vorteile auf, da der Primärenergieaufwand für die Herstellung der Wärmezähler deutlich höher ist, als der Primärenergieaufwand für die zum Betrieb der elektrischen Heizelemente beim TeBwA-Verfahren benötigte elektrische Energie. Konventionelle Wärmezähler weisen im Allgemeinen eine Nutzungsdauer von 5 bis 7 Jahren auf, da die in ihnen integrierte Batterie nach dieser Zeit entladen ist. Da die Batterie meist nicht separat ausgewechselt werden kann, ist nach dieser Zeit ein Austausch des gesamten Zählers notwendig.

Der kumulierte Primärenergieaufwand für die Herstellung eines Wärmezählers mit einem Gewicht von 0,7 kg beträgt bei einer vereinfachenden Betrachtung als „Elektronik“ und einer Berechnung mit Verwendung des hierfür anzusetzenden kumulierten Energieaufwands von 129 kWh/kg insgesamt rund 90 kWh bzw. bei einem Nutzungszeitraum von 7 Jahren rund 13 kWh/a.

Der kumulierte Energieaufwand für das TeBwA-Verfahren kann bei einer vereinfachenden Betrachtung vernachlässigt werden, da die zur Messdatenerfassung benötigten Temperaturfühler auch bei der Verwendung von Wärmezählern notwendig sind und die zur Datenauswertung beim TeBwA-Verfahren zusätzlich benötigte Rechenleistung im Vergleich zu der in modernen Regelungen ohnehin schon vorhandenen Rechenleistung vernachlässigbar ist.

Wird der kumulierte Energieaufwand von ca. 13 kWh/a für einen Wärmezähler mit dem elektrischen Stromverbrauch zur vorsätzlichen Generierung von Temperaturgradienten in einem hydraulischen Kreislauf beim TeBwA-Verfahren von ca. 1 bis 2 kWh/a verglichen, so beträgt bei einer ganzheitlichen Betrachtung der kumulierte Energieaufwand bzw. kumulierte Primärenergieaufwand⁸ beim TeBwA-Verfahren nur ca. 7 – 15 % im Vergleich zum Einsatz von konventionellen Wärmezählern.

⁸ Unter der Annahme, dass der Primärenergiefaktor für Strom den gleichen Wert hat wie der Primärenergiefaktor für den kumulierten Energieaufwand für die Herstellung des Wärmezählers ergibt sich bei einer relativen Betrachtung bzw. einem prozentualen Vergleich des kumulierten Energieaufwands und des kumulierten Primärenergieaufwands kein Unterschied.

5. Auswertung synthetisch generierter Daten (AP4)

Mit dem Simulationsprogramm TRNSYS wurde im Verlauf des Projekts u. a. das Verhalten eines wasserdurchströmten Rohrs simuliert. Hierbei wurden die Parameter des Rohrs, die eine Berechnung des Volumenstroms auf Basis der entwickelten, temperaturbasierten Auswertalgorithmen maßgeblich beeinflussen, systematisch variiert. Bei den genannten Parametern handelt es sich um:

- Rohrmaterial und -dicke
- Material bzw. Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und deren Dicke
- Strömungsgeschwindigkeit
- Temperaturniveau der Strömung

Auf Basis der so generierten synthetischen Messdaten wurde mit den entwickelten Auswertalgorithmen eine Berechnung des Volumenstroms durchgeführt und die Abweichung des jeweils vorgegebenen und berechneten Volumenstroms ermittelt. Es zeigte sich, dass die Genauigkeit der Volumenstromberechnung auf Basis der entwickelten Auswertalgorithmen maßgeblich von den auftretenden Wärmeverlusten der Rohrleitung zwischen den beiden Temperatursensoren abhängt. Somit ist die Realisierung geringer Wärmedurchgangskoeffizienten entlang der Messstrecke von essentieller Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung des Verfahrens. Dies gilt insbesondere bei einer großen Differenz zwischen der Temperatur des strömenden Fluids und der Umgebungstemperatur. Hinsichtlich der praktischen Umsetzung gilt es daher, die verwendeten Messstrecken sorgfältig mit einer Wärmedämmung zu versehen.

Des Weiteren wurden synthetisch generierte Daten zur Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung des Volumenstroms im Rohr (vgl. Abschnitt 2.1) sowie für die Untersuchungen zur Verbesserung der Messgenauigkeit durch die vorsätzliche Generierung von Temperaturflanken (vgl. Kapitel 3) eingesetzt.

Um die entwickelten Auswertalgorithmen zur Berechnung des Volumenstroms im Inneren eines Rohrs unter realen Bedingungen zu testen und diese zusätzlich hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu optimieren, wurde frühzeitig auf Messwerte zurückgegriffen, die mittels des zu diesem Zweck errichteten Versuchsstands generiert wurden. Für Ergebnisse der Auswertung dieser Messwerte siehe Abschnitt 2.1. Zudem wurden die entwickelten Auswertalgorithmen in Rahmen der energetischen Bilanzierung der vier untersuchten Feldtestanlagen auf deren Einsetzbarkeit hin untersucht und weiter verbessert; siehe hierzu Abschnitt 4. Auf weitergehende Auswertungen synthetisch generierter Messwerte wurde zugunsten der Auswertung von Messwerten, die durch den Versuchsstand gewonnenen wurden und der Auswertung von Messwerten, die aus den vier untersuchten Feldtestanlagen stammen, verzichtet.

6. Auswertung von Messdaten aus DST-Tests (AP 5)

Als ein weiteres Element für die Entwicklung und Optimierung des TeBwA-Verfahrens war die Verwendung von bereits verfügbaren Messdaten von Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung, die nach dem in der ISO 9459-4 festgeschriebenen Prüfverfahren, dem sogenannten Dynamic System Test (DST) geprüft wurden, vorgesehen. Diese Daten liegen in aggregierter Form mit einer Zeitschrittweite von 90 s vor. Im Rahmen der durchgeführten Auswertungen stellte sich jedoch heraus, dass diese zeitliche Auflösung zu gering für eine präzise Berechnung des Volumenstroms, der auftretenden Wärmeverluste und der übertragenen Wärmemengen mit dem neu entwickelten TeBwA-Verfahren ist. Die Auswertung der Messdaten aus DST-Tests wurde daher zugunsten einer umfangreicheren Auswertung von weiteren Arten an Messdaten nicht weiterverfolgt. Bei den weiteren Arten an Messdaten handelt es sich um synthetisch erzeugte, d. h. mit dem Simulationsprogramm TRNSYS berechnete und experimentell mit dem Versuchsstand gemessene Messdaten sowie um Messdaten von den vier Feldtestanlagen. Da die Auswertung dieser Messdaten ohnehin eine deutlich größere Relevanz als die Auswertung der Messdaten aus den DST-Tests hat, konnten die Projektziele auch ohne die Auswertung der Messdaten aus DST-Tests vollumfänglich erreicht werden.

7. In-situ Messungen (AP 6)

Für die Validierung und Verbesserung der Auswertelgorithmen und für die Validierung des gesamten TeBwA-Verfahrens wurden vier wärmetechnische Anlagen (Feldtestanlagen) mit erforderlicher Messtechnik ausgestattet. Bei den Feldtestanlagen wurden sämtliche an den zentralen Warmwasserspeicher angeschlossenen hydraulischen Kreisläufe energetisch vermessen. Zwei der Feldtestanlagen sind Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und zwei der Feldtestanlagen sind solare Kombianlagen, die zur kombinierten Erzeugung von Wärme für die Trinkwassererwärmung und zur Gebäudebeheizung dienen. Jeder Feldtestanlage wurde ein Akronym zugeordnet, das den Standort und den Typ der jeweiligen Anlage beschreibt. So steht beispielsweise das Akronym „LoK“ für eine in der Stadt Leonberg befindliche solare Kombianlage. Das Akronym „WaT“ steht für eine in der Stadt Waiblingen installierte Solaranlage zur Trinkwassererwärmung. In Tabelle 7-1 werden die Akronyme der vier Feldtestanlagen aufgeführt und deren Bedeutung erläutert.

Tabelle 7-1: Akronyme der Feldtestanlagen

Akronym	Standort	Anlagentyp
LoT	Leonberg	Solare Anlage zur TW-Erwärmung
WaT	Waiblingen	Solare Anlage zur TW-Erwärmung
LoK	Leonberg	Solare Kombianlage
EdK	Leinfelden-Echterdingen	Solare Kombianlage

7.1 Erstellung der Messkonzepte samt graphischer Darstellung

Es wurde für jede der vier Feldtestanlagen ein individuelles Messkonzept erarbeitet und graphisch dokumentiert. Im Folgenden sind die Messkonzepte für die vier Feldtestanlagen dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine kurze Erläuterung der zu erfassenden Größen sowie der hierfür verwendeten messtechnischen Komponenten. Hierbei wird sowohl auf die für das TeBwA-Verfahren dienende Messtechnik als auch auf die zur Ermittlung der Referenzwerte dienende konventionelle Messtechnik eingegangen.

Eine ausführliche Beschreibung der in die vier Feldtestanlagen installierten konventionellen Messtechnik sowie der eingebauten TeBwA-Technologie erfolgt im Abschnitt 7.3.

7.1.1 Feldtestanlage EdK

Die Abbildung 7-1 zeigt das Messkonzept der Feldtestanlage EdK.

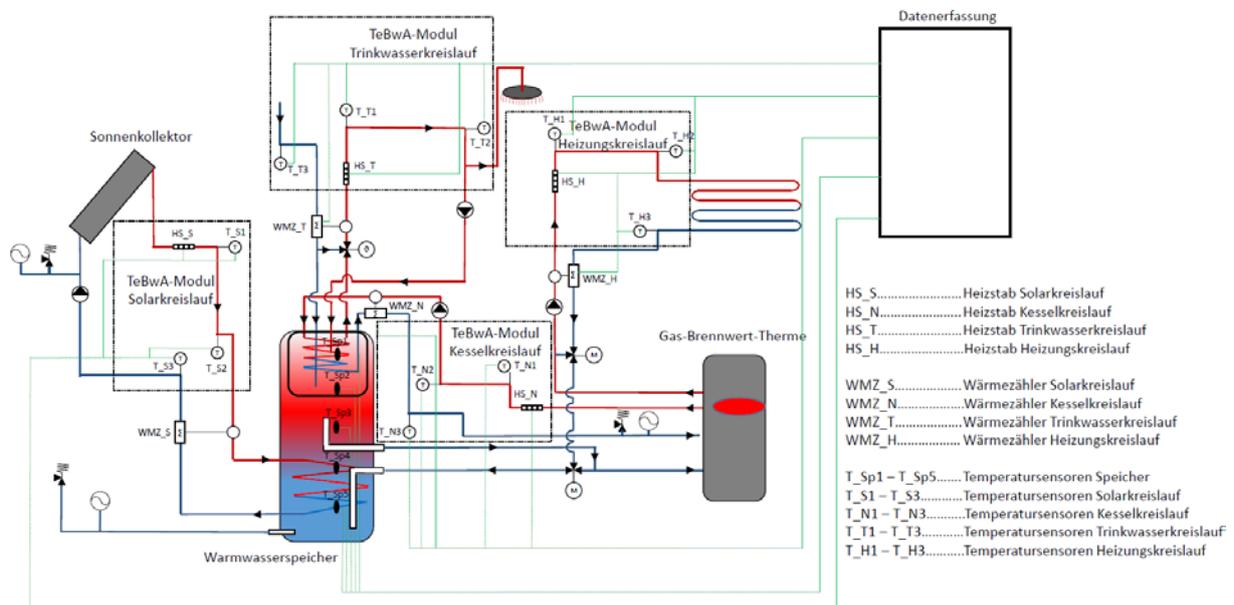


Abbildung 7-1: Messkonzept Feldtestanlage EdK

Die Feldtestanlage EdK ist eine solare Kombianlage, Abbildung 7-1 zeigt die vier hydraulischen Kreisläufe, die mit dem zentralen Warmwasserspeicher verbunden sind. Hierbei handelt es sich um den Solarkreislauf, den Trinkwasserkreislauf, den Kesselkreislauf und den Heizungskreislauf. Im Rahmen des Projekts TeBwA erfolgte für die Feldtestanlage EdK eine energetische Bilanzierung dieser vier hydraulischen Kreisläufe und des zentralen Warmwasserspeichers, siehe hierzu Abschnitt 4.1.1.

In Abbildung 7-1 ist zudem die in jeden der hydraulischen Kreisläufe installierte Messtechnik erkennbar, die für die Anwendung des TeBwA-Verfahrens benötigt wird. Hierbei handelt es sich, neben der zentralen Datenerfassung, um drei Temperatursensoren je hydraulischem Kreislauf. Zudem sind in Abbildung 7-1 die Temperatursensoren TSp_1 bis TSp_5 erkennbar, die an der Außenseite des Warmwasserspeichers angebracht wurden. Durch die mittels dieser Temperatursensoren gemessenen Temperaturwerte kann die in dem zentralen Warmwasserspeicher gespeicherte thermische Energie und deren Änderung über die Zeit bestimmt werden. Außerdem ist in Abbildung 7-1 erkennbar, dass in jeden der hydraulischen Kreisläufe ein konventioneller Wärmezähler installiert wurde. Die von den konventionellen Wärmezählern gelieferten Werte werden als Referenz für die Beurteilung der Genauigkeit, mit der sich die übertragene thermische Energie anhand des TeBwA-Verfahrens berechnen lässt, benötigt. Weiter sind in Abbildung 7-1 die in jeden der hydraulischen Kreisläufe installierten elektrischen Heizstäbe erkennbar. Diese können in Zeiträumen mit geringer Temperaturdynamik aktiviert werden und auf diese Weise die Temperaturdynamik und damit die Qualität der mit dem TeBwA-Verfahren erzielbaren Ergebnisse erhöhen.

7.1.2 Feldtestanlage LoK

Die Abbildung 7-2 zeigt das Messkonzept der Feldtestanlage LoK.

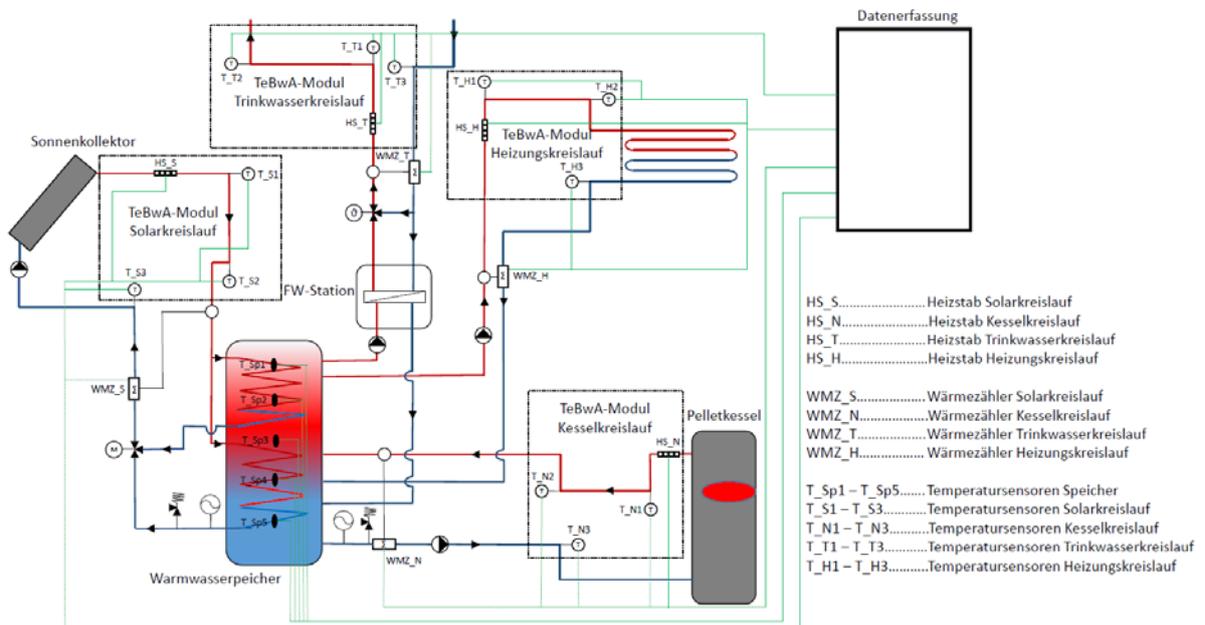


Abbildung 7-2: Messkonzept Feldtestanlage LoK

Da die Feldtestanlage LoK eine solare Kombianlage ist, wurden bei dem in Abbildung 7-2 dargestellten Messkonzept wiederum vier hydraulische Kreisläufe und der zentrale Warmwasserspeicher berücksichtigt. Für die energetische Bilanzierung der Feldtestanlage LoK, siehe Abschnitt 4.1.2. Bei der verwendeten Messtechnik handelt es sich um die gleiche, die bereits in Zusammenhang mit dem Messkonzept der Feldtestanlage EdK erläutert wurde.

7.1.3 Feldtestanlage LoT

Die Abbildung 7-3 zeigt das Messkonzept der Feldtestanlage LoT.

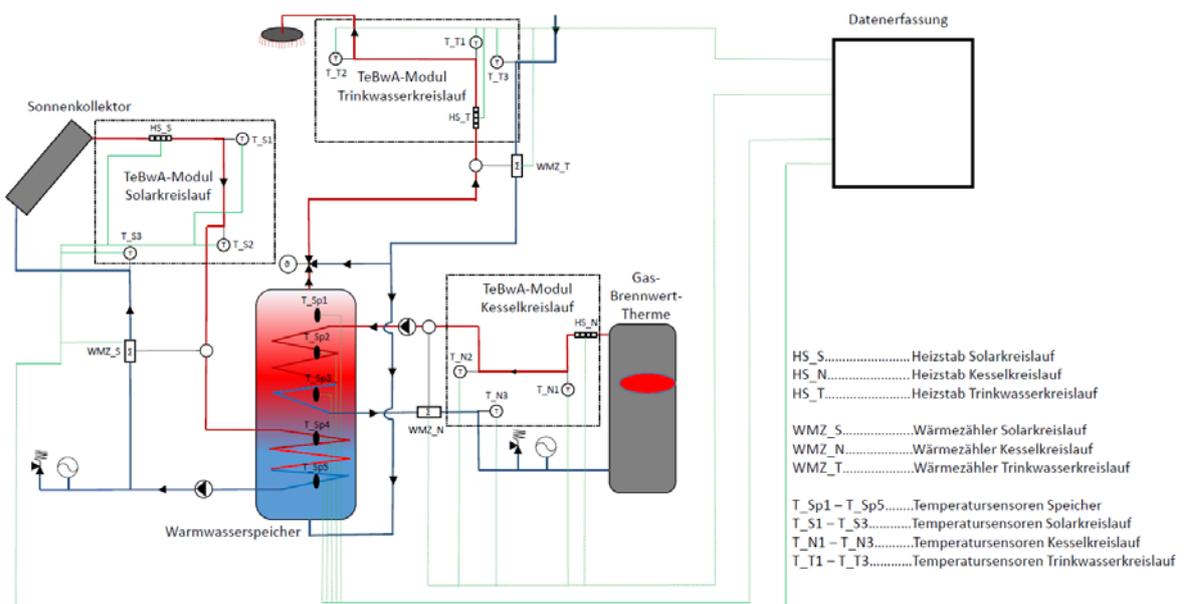


Abbildung 7-3: Messkonzept Feldtestanlage LoT

Da die Feldtestanlage LoT eine solare Anlage zur Trinkwassererwärmung ist, wurde der Heizungskreislauf nicht in das dargestellte Messkonzept integriert. In dem dargestellten Messkonzept berücksichtigt wurden der Solarkreislauf, der Trinkwasserkreislauf und der Kesselkreislauf sowie der zentrale Warmwasserspeicher. Für die energetische Bilanzierung der Feldtestanlage LoT wird auf Abschnitt 4.1.3 verwiesen. Bei der verwendeten Messtechnik handelt es sich um die gleiche, die bereits in Zusammenhang mit dem Messkonzept der Feldtestanlage EdK erläutert wurde.

7.1.4 Feldtestanlage WaT

Die Abbildung 7-4 zeigt das Messkonzept der Feldtestanlage WaT.

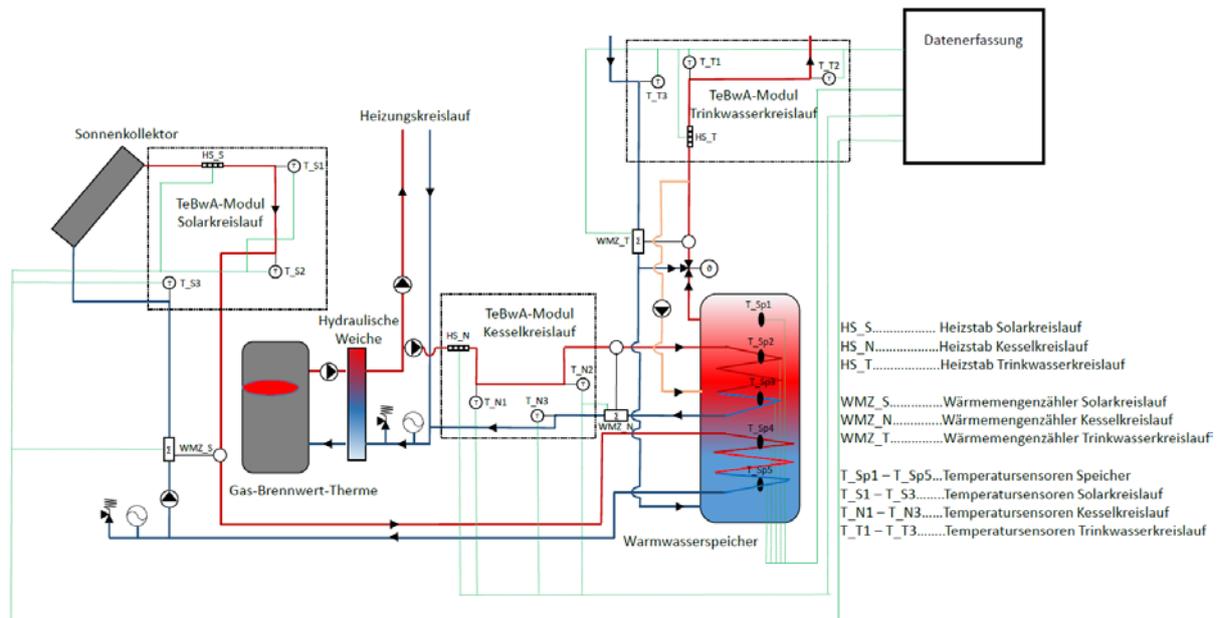


Abbildung 7-4: Messkonzept Feldtestanlage WaT

Auch die Feldtestanlage WaT ist eine solare Anlage zur Trinkwassererwärmung, weshalb der Heizungskreislauf zwar in Abbildung 7-4 dargestellt, nicht aber Teil des Messkonzepts ist. Weiter sind der zentrale Warmwasserspeicher und die an diesem angeschlossenen hydraulischen Kreisläufe erkennbar. Da der Solarkreislauf der Feldtestanlage WaT aufgrund eines Defekts während des Projektzeitraums außer Betrieb war, erfolgte nur eine energetische Bilanzierung des Trinkwasserkreislaufs, des Kesselkreislaufs und des zentralen Warmwasserspeichers, siehe hierzu Abschnitt 4.1.4. Die installierte Messtechnik entspricht jener, die in Zusammenhang mit dem Messkonzept der Feldtestanlage EdK bereits erläutert wurde.

7.2 Erstellung der Messvereinbarungen und Einholung der Zustimmung der Anlagenbesitzer

Mit jedem der Besitzer der untersuchten Feldtestanlagen wurde eine entsprechende schriftliche Vereinbarung über seine Zustimmung zur Vermessung seiner Solaranlage im Rahmen des Projekts TeBwA abgeschlossen.

7.3 Messtechnik in den vier Feldtestanlagen

In diesem Kapitel wird die Messtechnik, die in die vier untersuchten Feldtestanlagen installiert wurde, detailliert beschrieben. Die Installation der Messtechnik erfolgte mit dem Ziel, eine energetische Bilanzierung der untersuchten Feldtestanlagen zu ermöglichen. Es wurde zum einen Messtechnik installiert, die für eine energetische Bilanzierung der Feldtestanlagen unter Verwendung des TeBwA-Verfahrens erforderlich ist. Zum anderen wurden konventionelle Wärmezähler installiert, die Vergleichs- bzw. Referenzwerte für die Beurteilung der Ergebnisse des TeBwA-Verfahrens liefern.

7.3.1 Konventionelle Messtechnik

Bei den verwendeten konventionellen Wärmezählern handelt es sich um Geräte des Modells Multical 603 des Herstellers Kamstrup. Ein solcher Wärmezähler wurde in jeden der an die Warmwasserspeicher angeschlossenen hydraulischen Kreisläufe installiert. Dadurch können alle Energieein- und -austräge in die bzw. aus den Warmwasserspeichern erfasst werden. In Abbildung 7-5 ist das Bedienfeld des Rechenwerks eines solchen Wärmezählers dargestellt.



Abbildung 7-5: Bedienfeld Wärmezähler Modell Multical 603 des Herstellers Kamstrup

Im zeitlichen Verlauf der Auswertung von in-situ Messdaten zeigte sich, dass die Genauigkeit der von den konventionellen Wärmezählern erfassten Volumenströme stark von dem jeweils in Kombination mit dem Rechenwerk eingesetzten Durchflusssensor abhängt. Da die von den konventionellen Wärmezählern gelieferten Werte als Referenz für die Beurteilung der Genauigkeit dienen, mit der sich die übertragene thermische Energie anhand des TeBwA-Verfahrens berechnen lässt, mussten die verwendeten konventionellen Wärmezähler und insbesondere die eingesetzten Durchflusssensoren zunächst näher untersucht werden.

Um den Einfluss unterschiedlicher Sensoren zur Messung des Volumenstroms zu untersuchen, wurden in den Feldtestanlagen zwei unterschiedliche Arten von Durchflusssensoren installiert, die jeweils mit dem Wärmezähler Multical 603 des Herstellers Kamstrup (siehe Abbildung 7-5) verbunden sind.

In den Solarkreisläufen, die mit einem Wasser-Glykol-Gemisch betrieben werden, werden mechanische Durchflusssensoren nach dem Flügelrad-Prinzip eingesetzt. In den restlichen Kreisläufen, in denen reines Wasser strömt, werden ultraschallbasierte Durchflusssensoren genutzt. Um die Genauigkeit der Messwerte beurteilen zu können, die von den beiden unterschiedlichen Arten an Durchflusssensoren geliefert werden, wurde der Aufbau des Versuchsstands (siehe Abbildung 3-1) zeitweise geändert. Die Änderung bestand im Wesentlichen darin, dass zusätzlich zu dem ohnehin bereits in den Versuchsstand installierten konventionellen Wärmezähler mit ultraschallbasiertem Durchflusssensor und dem ebenfalls bereits installierten magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) ein weiterer konventioneller Wärmezähler installiert wurde, der mit einem mechanischen Durchflusssensor versehen war.

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass Wärmezähler, die mit einem mechanischen Durchflusssensor ausgerüstet sind, relativ träge auf rasche Volumenstromänderungen reagieren, insbesondere bei einer plötzlichen Abnahme des Volumenstroms. Siehe hierzu Abbildung 7-6.

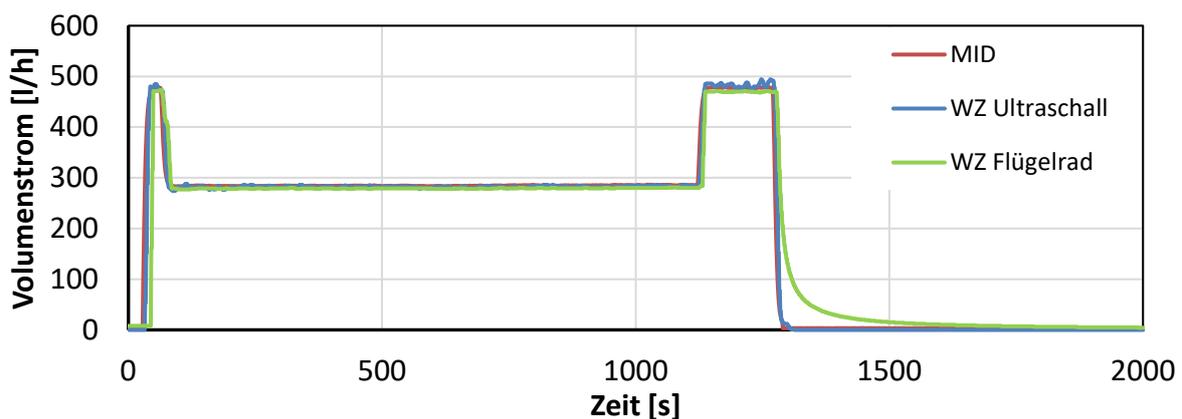


Abbildung 7-6: Vergleich des ermittelten Volumenstroms bei Verwendung unterschiedlicher Durchflusssensoren

Die Untersuchungen ergaben zudem, dass sich die von den internen Rechenwerken der Wärmezähler errechneten Werte für die übertragene thermische Energie bei Verwendung von ultraschallbasierten bzw. bei Verwendung von mechanischen Durchflusssensoren nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Wird die übertragene thermische Energie auf Basis des für einen bestimmten Zeitraum von einem konventionellen Wärmezähler mit ultraschallbasiertem Durchflusssensor ermittelten Volumenstrom und den beiden gemessenen Temperaturen im Vor- und Rücklauf extern separat berechnet, so weicht dieser Wert ebenfalls kaum von den Werten ab, die von den integrierten Rechenwerken geliefert werden.

Wird allerdings der von dem konventionellen Wärmezähler mit mechanischem Durchflusssensor gelieferte Wert für den Volumenstrom und den gemessenen Temperaturen für die Berechnung verwendet, so weicht die berechnete übertragene thermische Energie von den zuvor genannten Werten ab. Demzufolge sollte als Referenzwert für die Beurteilung der Genauigkeit, mit der sich die übertragene thermische Energie auf Basis des TeBwA-Verfahrens ermitteln

lässt, der intern vom jeweiligen Rechenwerk des betreffenden Wärmehählers berechnete Wert verwendet werden.

Für eine Berechnung der übertragenen thermischen Energie auf Basis des für einen bestimmten Zeitraum von einem konventionellen Wärmehähler ermittelten Volumenstroms empfiehlt sich die Verwendung von ultraschallbasierten Durchflusssensoren. Bei der Verwendung von mechanischen Durchflusssensoren können hier insbesondere dann erhebliche Ungenauigkeiten auftreten, wenn der Volumenstrom eine große Dynamik aufweist, wie dies z. B. beim Trinkwasserkreislauf der Fall ist.

Entsprechend wurde als Referenzwert jeweils die vom Rechenwerk des betreffenden, konventionellen Wärmehählers berechnete, übertragene thermische Energie herangezogen.

7.3.2 TeBwA- Messtechnik

Um eine energetische Bilanzierung auf Basis des TeBwA-Verfahrens umsetzen zu können, wurde in jeden der hydraulischen Kreisläufe eine TeBwA-Messstrecke installiert. In den Messstrecken befinden sich jeweils zwei Mantelthermoelemente und ein elektrischer Heizstab mit einer thermischen Leistung von 1,6 kW. Die mittels der Mantelthermoelemente erfassten Temperaturen dienen primär der Berechnung des jeweils vorliegenden Volumenstroms. Für die eigentliche energetische Bilanzierung müssen zudem für jeden hydraulischen Kreislauf die Temperaturen auf der warmwasserführenden Seite und auf der kaltwasserführenden Seite gemessen werden. Die Mantelthermoelemente, die für die Berechnung des Volumenstroms erforderlich sind, dienen zusätzlich der energetischen Bilanzierung, indem einer der beiden gemessenen Werte als Temperaturwert der warmwasserführenden Seite des jeweiligen hydraulischen Kreislauhs für die Bestimmung des übertragenen Wärmestroms bzw. der übertragenen Wärmemenge verwendet wird. Für die Erfassung der Temperaturen auf den kaltwasserführenden Seiten werden zusätzliche Einschraubthermoelemente verwendet, die jeweils in einen Kugelhahn mit einer Temperatursensoraufnahme eingeschraubt werden. Außerdem müssen für eine vollständige energetische Bilanzierung die Temperaturen im Inneren der Warmwasserspeicher ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden Anlegethermoelemente verwendet, die in unterschiedlichen Höhen direkt auf die Außenseite der Metallbehälter geklebt wurden. Auf Basis der so ermittelten Werte werden die Temperaturen im Inneren der Speicher abgeschätzt.

Elektrische Heizstäbe wurden in den TeBwA-Messstrecken vorgesehen, um gezielt Wärme in die Rohrströmung einbringen zu können. Zu Projektbeginn wurde angenommen, dass eine Einbringung von Wärme erforderlich ist, wenn die Temperaturdynamik des betrachteten hydraulischen Kreislauhs in einem bestimmten Zeitraum nicht ausreichend hoch ist, um den Volumenstrom auf Basis der entwickelten Auswertelgorithmen berechnen zu können. Im Verlauf der Auswertung von in-situ Messdaten stellte sich allerdings heraus, dass eine energetische Bilanzierung auf Basis des TeBwA-Verfahrens auch dann mit hoher Genauigkeit umgesetzt werden kann, wenn auf eine Nutzung der installierten elektrischen Heizstäbe gänzlich verzichtet wird. Abbildung 7-7 zeigt eine der beschriebenen Messstrecken, die samt Mantelthermoelementen und elektrischem Heizstab in einen der hydraulischen Kreisläufe einer Feldtestanlage installiert war. Die eigentliche Messstrecke befindet sich hierbei zwischen den beiden Mantelthermoelementen. Die Fließrichtung der Strömung wurde in der Abbildung durch Pfeile gekennzeichnet.

Um die auftretenden Wärmeverluste möglichst gering zu halten, wurde die Messstrecke im Anschluss an die Erstellung der Fotografie sorgfältig wärmegeämmt.



Abbildung 7-7: Messstrecke (a) mit Mantelthermoelementen (b) und elektrischem Heizstab (c);
Hinweis: Aufgrund der besseren Anschaulichkeit ohne Wärmedämmung dargestellt

Die von den Thermoelementen gelieferten Ausgangssignale im Bereich einiger Millivolt wurden mittels analoger Messumformer in Signale zwischen 0 und 10 V gewandelt. Diese Signale wurden wiederum an Input/Output-Module mit integriertem analog/digital-Wandler (AD-Wandlern) weitergeleitet, von diesen in ein digitales Signal umgewandelt und zur Zwischenspeicherung an einen PC übertragen. Anschließend wurden die zwischengespeicherten Werte auf einem Onlineserver gesichert. Abbildung 7-8 bis Abbildung 7-10 zeigen die drei unterschiedlichen Arten der verwendeten Thermoelemente.

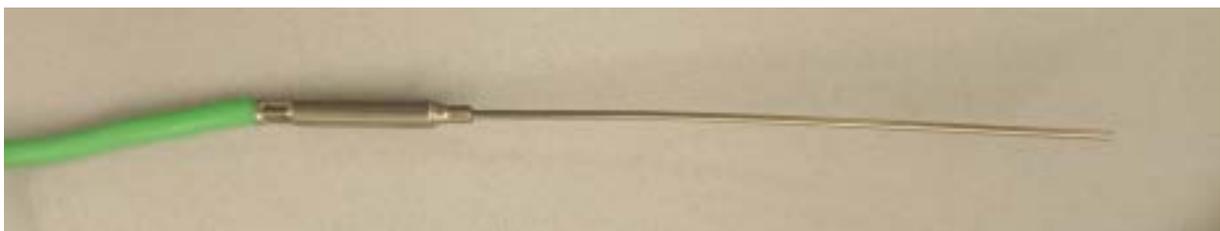


Abbildung 7-8: Mantelthermoelement



Abbildung 7-9: Einschraubthermoelement



Abbildung 7-10: Anlegethermoelement

Die verwendeten Input/Output-Module und die angeschlossenen Messumformer sind in Abbildung 7-11 dargestellt.

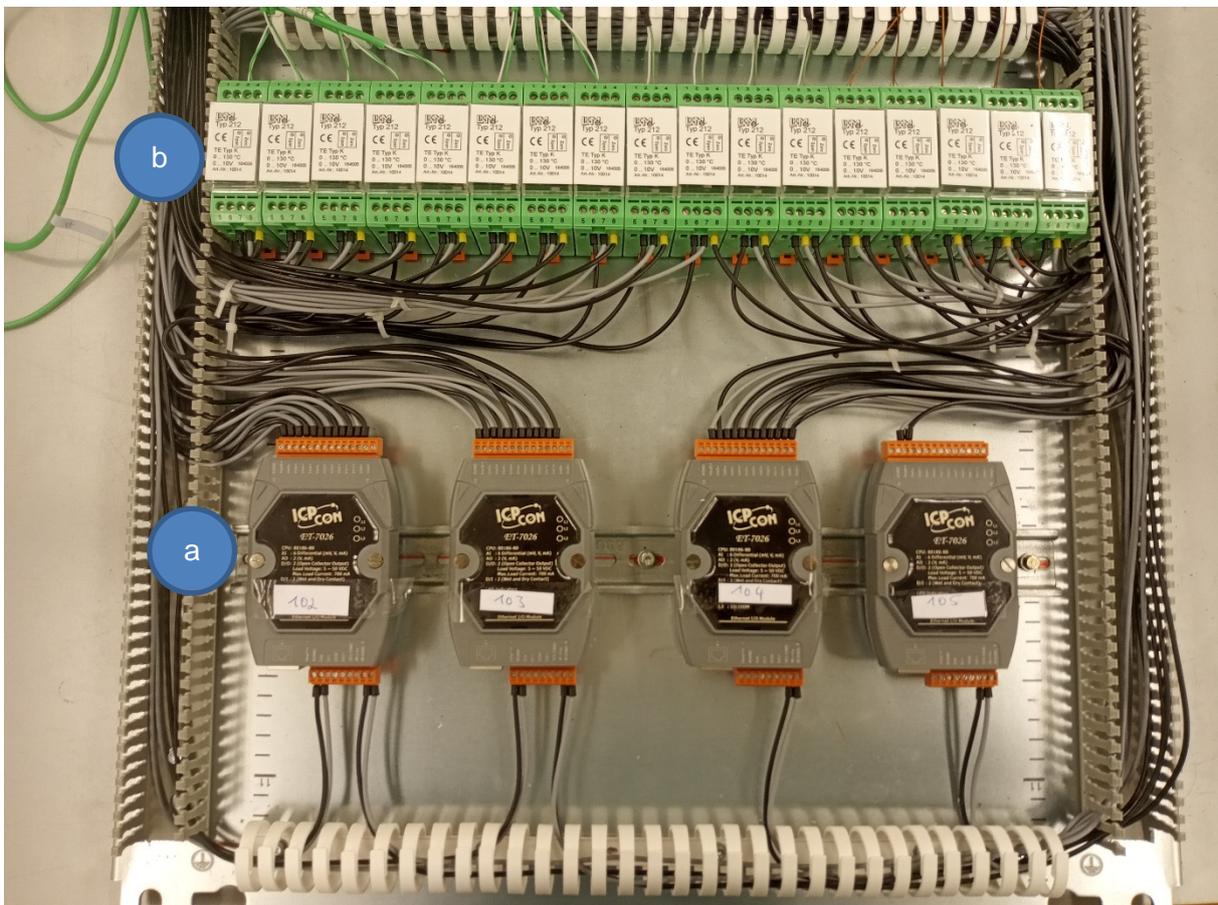


Abbildung 7-11: Input/Output-Module (a) mit angeschlossenen Messumformern (b)

7.4 Validierung und Optimierung der Algorithmen unter Verwendung von Messdaten aus den in-situ Anlagen

Parallel zu der Auswertung der erfassten Messwerte der Feldtestanlagen und der damit verbundenen energetischen Bilanzierungen wurden die entwickelten Auswertelgorithmen auf Basis der hierbei gesammelten Erkenntnisse kontinuierlich überprüft und verbessert. Die entsprechenden Arbeiten sind daher implizit integraler Bestandteil der in Zusammenhang mit der Entwicklung der Auswertelgorithmen in Kapitel 2 und der energetischen Bilanzierung der Feldtestanlagen in Kapitel 4 durchgeführten und beschriebenen Arbeiten.

8. Untersuchungen der Verfahrensunsicherheit (AP 7)

8.1 8.1 Identifikation maßgeblicher Einflussfaktoren auf die Genauigkeit des entwickelten Verfahrens

Im Rahmen der Messdatenauswertung konnten zwei Faktoren identifiziert werden, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit haben, mit der der Volumenstrom einer Rohrströmung auf Basis des entwickelten TeBwA-Verfahrens bestimmt werden kann. Hierbei handelt es sich um

- die zeitliche Auflösung der Temperaturwerte, die für die Berechnung des Volumenstroms der betreffenden Rohrströmung herangezogen werden,
- die Art des Kontakts zwischen den eingesetzten Temperatursensoren und dem strömenden Fluid.

Aufgrund der signifikanten Bedeutung dieser beiden Einflussfaktoren wurde deren Auswirkung auf die erzielbare Genauigkeit auf Basis einer Auswertung aufgezeichneter Messwerte quantifiziert.

8.2 8.2 Beurteilung der Auswirkung der beeinflussenden Variablen

Für die Untersuchung des Einflusses der zeitlichen Auflösung der erfassten Temperaturwerte auf die erzielbare Genauigkeit wurden Daten der mit Messtechnik ausgerüsteten Feldtestanlagen verwendet. Für eine Beschreibung der Feldtestanlagen siehe Kapitel 4 und Kapitel 7. Für die Untersuchung des Einflusses des Kontakts zwischen den eingesetzten Temperatursensoren und dem strömenden Fluid wurden experimentell mittels des Versuchsstands generierte Daten verwendet. Für eine Beschreibung des Versuchsstands siehe Kapitel 3.

8.2.1 8.2.1 Einfluss der zeitlichen Auflösung der Temperaturwerte

Aktuell wird die temperaturbasierte Volumenstromberechnung auf Basis von Temperaturwerten umgesetzt, die in einer zeitlichen Auflösung von zehn Werten je Sekunde vorliegen. Entsprechend erfolgt die Messdatenerfassung ebenfalls mit einer Frequenz von 10 Hz. Sämtliche in Kapitel 2, Kapitel 3 und Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse basieren auf der Auswertung von Messwerten mit der genannten zeitlichen Auflösung. Die Anforderungen an die verwendete Messtechnik sind umso geringer, je niedriger die geforderte zeitliche Auflösung der verwendeten Messwerte ist. Dasselbe gilt für die Anschaffungskosten der für die Messdatenerfassung benötigten Messtechnik. Daher wurde geprüft, welche Auswirkung eine Reduzierung der zeitlichen Auflösung der verwendeten Temperaturwerte auf die erzielbare Genauigkeit hat. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurden Daten von fünf verschiedenen hydraulischen Kreisläufen der untersuchten Feldtestanlagen ausgewertet. Im Rahmen dieser Auswertungen wurden jeweils für den Zeitraum eines Tages auf Basis der temperaturbasierten Volumenstromberechnung die auftretenden Volumenströme in den verschiedenen hydraulischen Kreisläufen ermittelt. Darauf aufbauend wurde die thermische Energie berechnet, die innerhalb eines Tages zwischen dem betreffenden hydraulischen Kreislauf und dem zentralen Warmwasserspeicher der Anlage übertragen wurde. Anschließend erfolgte ein Vergleich der so ermittelten Werte mit den durch einen konventionellen Wärmezähler erfassten Werten. Die Ergebnisse dieser Auswertungen werden in Tabelle 8-1 dargestellt.

Tabelle 8-1: Abweichung bei unterschiedlicher zeitlicher Auslösung der Temperaturwerte

Anlage und jeweiliger hydraulischer Kreislauf	Datum	Konventioneller Wärmehähler [kWh]	Abweichung [%] bei		
			10 Hz	2 Hz	1 Hz
LoK - Kesselkreislauf	05.11.2021	197	0,61	2,94	0,10
	15.11.2021	196	-0,31	1,73	-1,43
	25.11.2021	264	-0,30	2,12	-1,82
LoK - Heizungskreislauf	05.11.2021	194	-0,05	-10,93	-25,72
	15.11.2021	160	-4,56	-12,38	-19,63
	25.11.2021	227	-3,88	-13,57	-24,41
	28.01.2022	244	-2,13	-4,75	-8,20
LoK - Solarkreislauf	10.10.2022	5	0,82	-17,55	-40,82
	17.10.2022	6	10,32	-11,59	-43,33
	22.10.2022	8	4,40	-10,27	-36,40
LoT - Solarkreislauf	01.06.2022	6	1,90	8,41	-7,94
	02.06.2022	9	7,70	13,45	-2,87
	10.06.2022	8	-0,39	5,66	-9,61
	20.06.2022	7	2,17	8,26	-7,83
	30.06.2022	11	2,45	10,19	-4,43
WaT - Trinkwasser	10.09.2022	16	1,88	5,00	-31,88
	15.09.2022	14	5,00	6,43	-25,71
	25.09.2022	14	0,00	1,43	-21,43
	30.09.2022	17	9,41	0,59	-25,88

Anhand von Tabelle 8-1 ist erkennbar, dass die Genauigkeit, mit der die täglich übertragene thermische Energie berechnet werden kann, bei geringerer zeitlicher Auflösung der verwendeten Temperaturwerte, grundsätzlich abnimmt. So liegt die Abweichung bei Verwendung von zehn Temperaturwerten je Sekunde gegenüber den von einem konventionellen Wärmehähler gelieferten Werten in der Regel bei deutlich unter $\pm 10\%$. Auch bei Verwendung von zwei Temperaturwerten je Sekunde betragen die Abweichungen gegenüber den Werten des konventionellen Wärmehählers nur in einem Fall mehr als $\pm 15\%$ und sind meist deutlich geringer. Wird jedoch nur ein Temperaturwert je Sekunde verwendet, so fällt die Genauigkeit bis auf wenige Ausnahmen deutlich ab.

Allerdings ist ebenfalls erkennbar, dass die erzielbare Genauigkeit in Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung stark von dem jeweils betrachteten hydraulischen Kreislauf abhängt. Ursächlich hierfür ist die Temperaturdynamik in dem jeweiligen hydraulischen Kreislauf. Bei hydraulischen Kreisläufen mit einer relativ geringen Temperaturdynamik, wie z. B. dem Kesselkreislauf, hat eine geringere zeitliche Auflösung der Messwerte wesentlich weniger negative Auswirkungen als in hydraulischen Kreisläufen mit einer hohen Temperaturdynamik, wie z. B. dem Trinkwasserkreislauf.

8.2.2 Einfluss des thermischen Kontakts zwischen Temperatursensoren und strömendem Fluid

Die experimentell erzeugten, bzw. von den untersuchten Feldtestanlagen stammenden Temperaturwerte, die für die temperaturbasierte Volumenstromberechnung in Kapitel 2, Kapitel 3 und Kapitel 4 verwendet wurden, wurden mittels Mantelthermoelementen gemessen (siehe Abbildung 7-8). Diese Mantelthermoelemente wurden durch den Einsatz einer Klemmringverschraubung in die jeweilige Messstrecke eingebracht und wasserdicht installiert. Dadurch standen die Spitzen der Mantelthermoelemente in direktem thermischen Kontakt mit dem strömenden Fluid.

Um zu prüfen, wie sich ein indirekter Kontakt zwischen den Temperatursensoren und dem strömenden Fluid auswirkt, wurde alternativ der Einsatz von Anlegethermoelementen geprüft (siehe Abbildung 7-10). Hierbei kamen experimentell mittels des Versuchsstands generierte Daten zum Einsatz. Die Anlegethermoelemente wurden auf der äußeren Oberfläche des Kupferrohrs der Messstrecke befestigt und mittels Wärmedämmmaterial nach außen, d. h. gegenüber der Umgebung, wärmegeklämt. Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, da der Einsatz von auf der Oberfläche der Messstrecke bzw. des flüssigkeitsdurchströmten Rohrs angebrachten Anlegethermoelementen einen deutlich weniger aufwändigen, minimalinvasiven Eingriff in eine bestehende Anlage bedeuten und sich somit auch für nachträgliche Installationen der neu entwickelten TeBwA-Messtechnik eignen würde.

Die Volumenströme, die auf Basis der durch Mantelthermoelemente und Anlegethermoelemente gemessenen Temperaturwerte berechnet wurden, sind in Abbildung 8-1 dargestellt. Zudem ist der durch einen konventionellen Wärmezähler gemessene Volumenstrom dargestellt, der in der Auswertung als Referenzwert verwendet wurde. Die Messung fand in einem Temperaturbereich zwischen 21,5 und 28,0 °C statt. Der eingestellte Volumenstrom betrug konstant 700 l/h. Der elektrische Heizstab des Versuchsstands wurde für die Erzeugung eines auswertbaren Temperaturprofils wiederholt für jeweils 2 s aktiviert und anschließend für 4 s deaktiviert.

Aus Abbildung 8-1 lässt sich erkennen, dass die Berechnung des Volumenstroms bei Verwendung der mittels Mantelthermoelementen gemessenen Temperaturwerte, mit Ausnahme einiger Ausreißer, mit hoher Genauigkeit möglich ist. Bei Verwendung der mittels Anlegethermoelementen gemessenen Temperaturwerte hingegen liegt eine große Abweichung zwischen dem gemessenen Volumenstrom und dem berechneten Volumenstrom vor. Zudem liegen bei Verwendung der mittels Anlegethermoelementen erfassten Temperaturwerte Abschnitte in Abbildung 8-1 vor, für die keine Volumenstromberechnung möglich war. Der Grund hierfür ist eine zu geringe Temperaturdynamik der gemessenen Temperaturwerte an der Außenseite des Rohres.

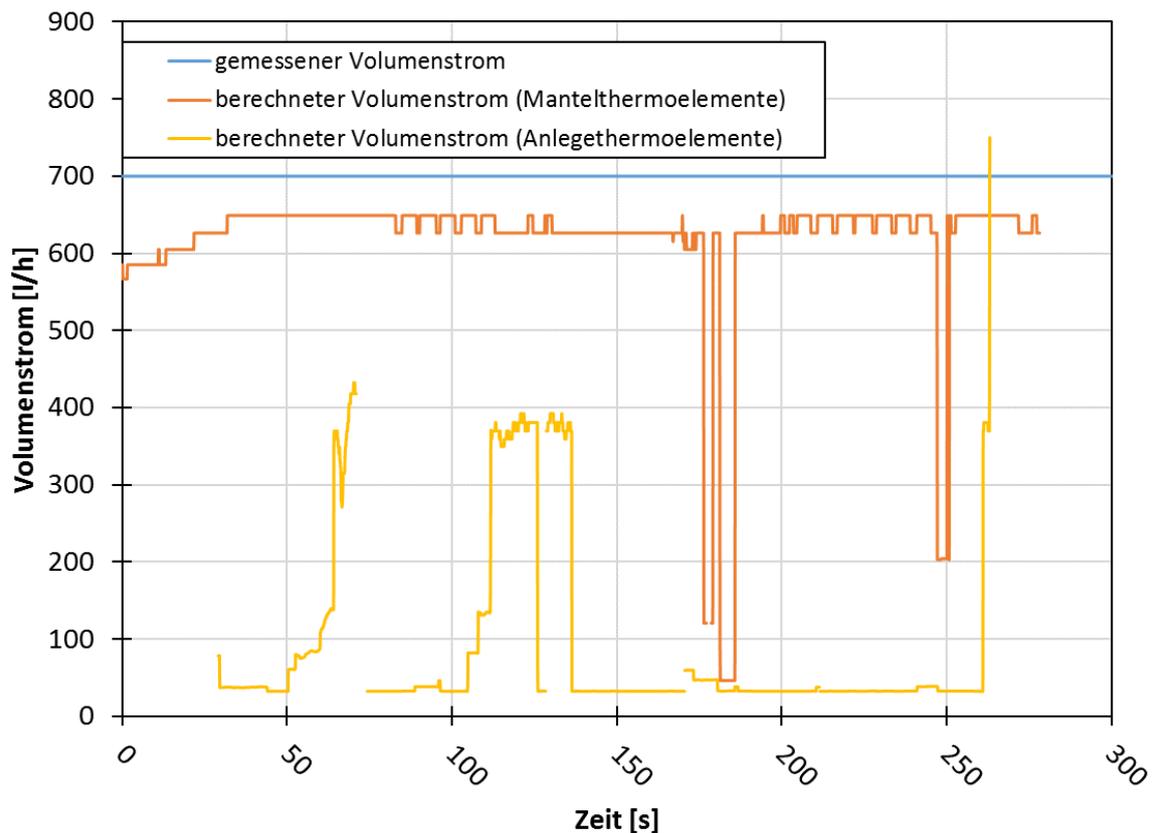


Abbildung 8-1: Temperaturbasierte Volumenstromberechnung – Mantelthermoelemente (orange) vs. Anlegethermoelemente (gelb) (Teil 1 von 2)

Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 zeigen die für die Volumenstromberechnung verwendeten gemessenen Temperaturwerte der Mantelthermoelemente bzw. der Anlegethermoelemente. Es wurden hierbei nur die gemessenen Temperaturwerte des jeweils ersten Temperatursensors dargestellt, da diese mit jenen des jeweils zweiten Temperatursensors nahezu identisch sind.

Aus Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 ist ersichtlich, dass die durch den elektrischen Heizstab erzeugten Temperaturänderungen bei Verwendung von direkt in das strömende Fluid eingebrachten Mantelthermoelementen gut detektiert werden können. Bei Verwendung der auf der Oberfläche der Messstrecke angebrachten Anlegethermoelemente hingegen können die Temperaturänderungen des strömenden Fluids nicht in ausreichender Weise gemessen werden. Daraus resultiert die in Abbildung 8-1 dargestellte, geringe Genauigkeit des berechneten Volumenstroms.

Die Abbildung 8-4 zeigt die Ergebnisse der Volumenstromberechnung für einen weiteren experimentell erzeugten Datensatz. Die Messung fand in einem Temperaturbereich zwischen 59,1 und 60,4 °C statt. Der eingestellte Volumenstrom betrug konstant 300 l/h. Der elektrische Heizstab wurde ebenfalls periodisch für jeweils 2 s aktiviert und anschließend für 4 s deaktiviert.

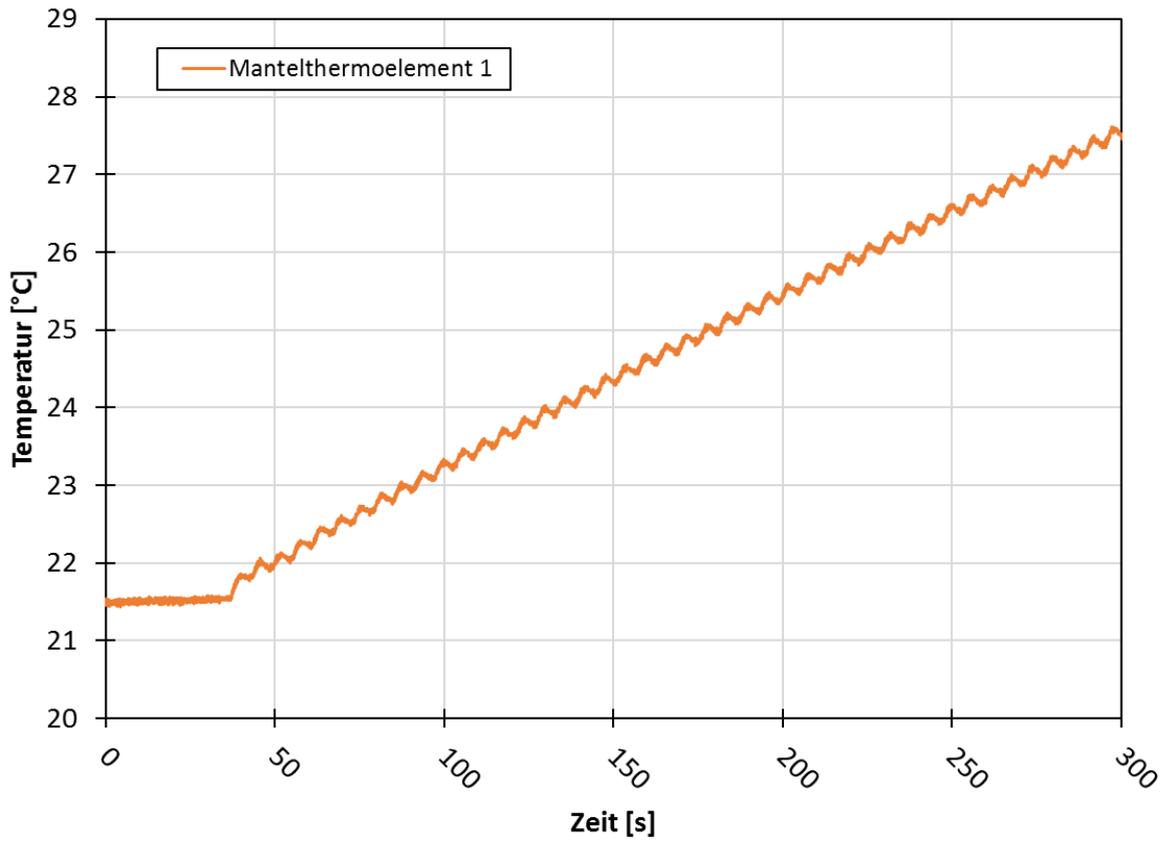


Abbildung 8-2: Temperaturprofil Mantelthermoelement (Teil 1 von 2)

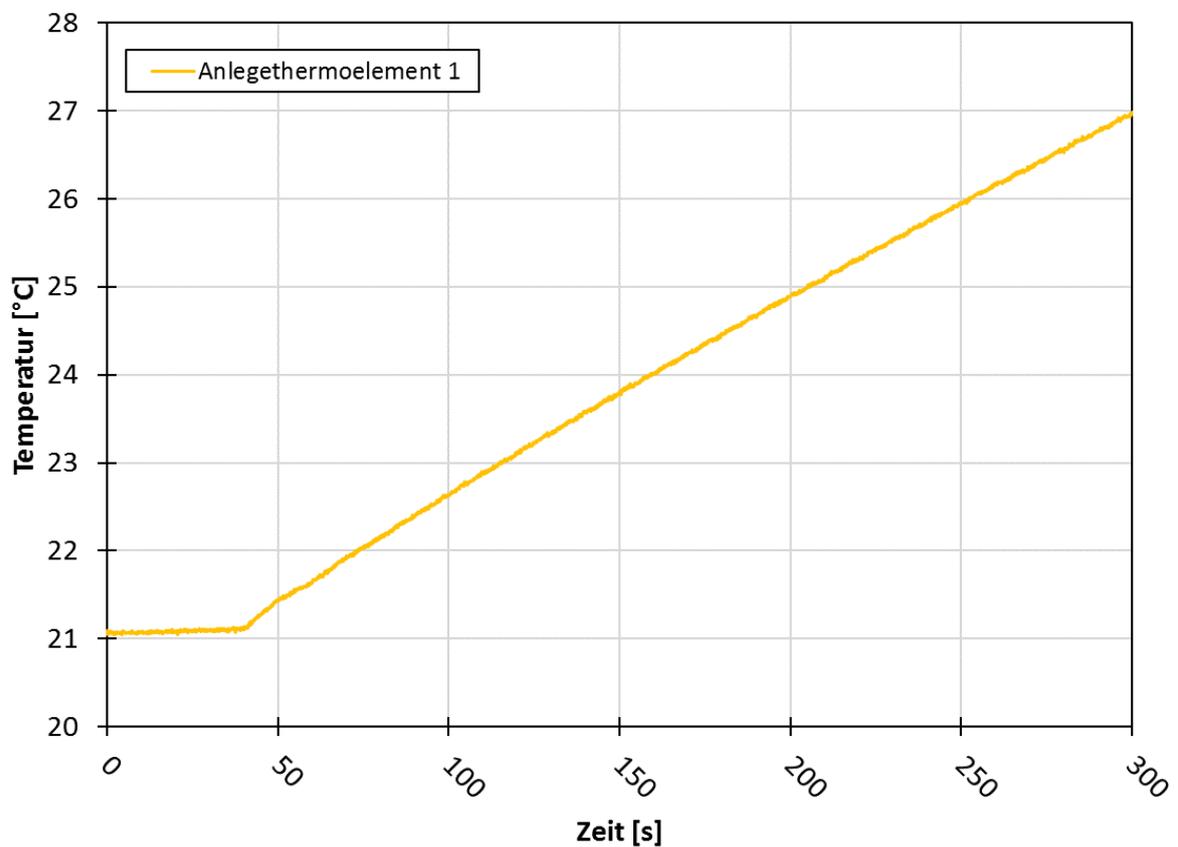


Abbildung 8-3: Temperaturprofil Anlegethermoelement (Teil 1 von 2)

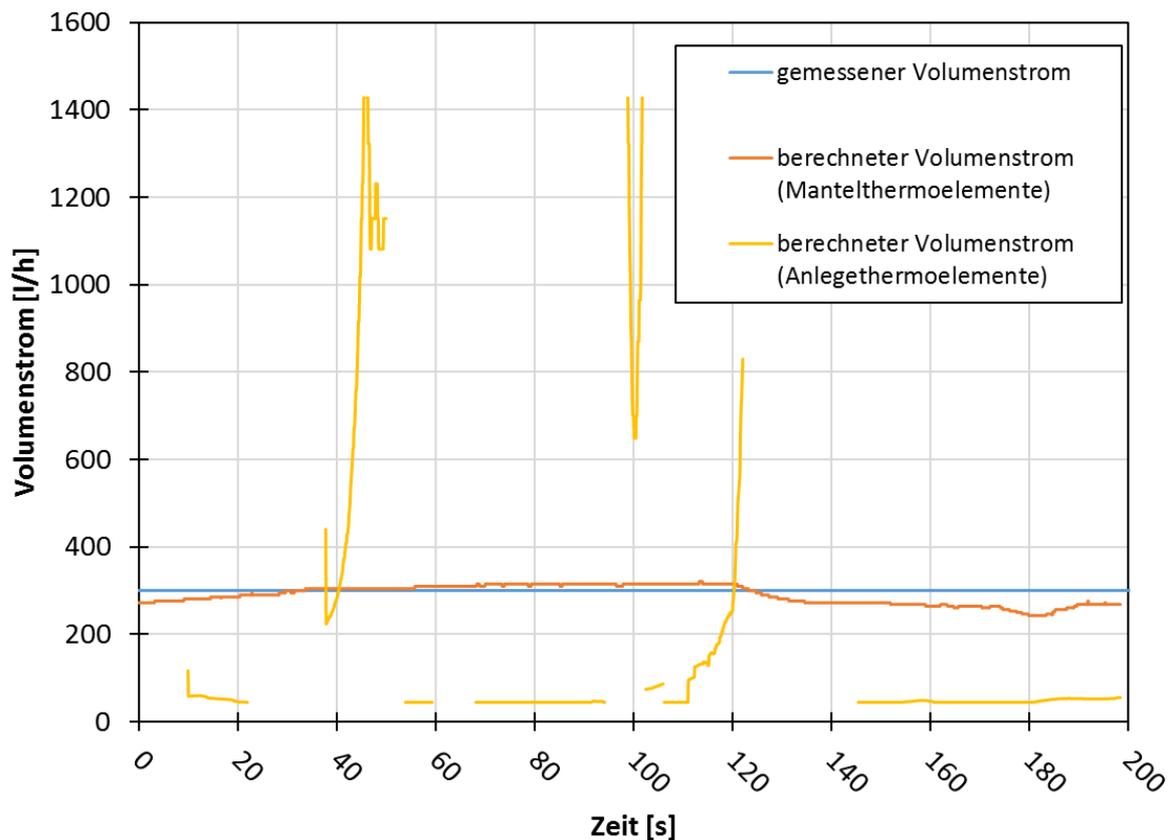


Abbildung 8-4: Temperaturbasierte Volumenstromberechnung – Mantelthermoelemente vs. Anlegethermoelemente (Teil 2 von 2)

Wie bereits bei Abbildung 8-1 lässt sich auch bei Betrachtung von Abbildung 8-4 feststellen, dass bei Verwendung der mittels Mantelthermoelementen gemessenen Temperaturwerte eine hohe Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Volumenstrom vorliegt. Die Verwendung der mittels Anlegethermoelementen gemessenen Temperaturwerte hingegen führt zu einer sehr geringen Genauigkeit des berechneten Volumenstroms im Vergleich zu dem gemessenen Referenzwert. Zudem liegen bei Verwendung der mittels Anlegethermoelementen erfassten Temperaturwerte erneut Abschnitte vor, in denen eine Berechnung des Volumenstroms aufgrund einer zu geringen an der Rohraußenseite gemessenen Temperaturdynamik nicht umgesetzt werden konnte.

Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6 zeigen die für die Volumenstromberechnung verwendeten Temperaturwerte, die mittels Mantelthermoelementen bzw. mittels Anlegethermoelementen gemessen wurden.

Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6 lassen erneut das in Zusammenhang mit Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 diskutierte Verhalten der gemessenen Temperaturwerte erkennen. Die durch den elektrischen Heizstab erzeugten Temperaturänderungen können bei Betrachtung der Messwerte des Mantelthermoelements, das in direktem Kontakt mit dem strömenden Fluid steht, klar identifiziert werden. Bei Betrachtung der Messwerte des auf der Oberfläche der Messstrecke angebrachten Anlegethermoelements ist dies nicht der Fall. Eine präzise Berechnung des auftretenden Volumenstroms auf Basis der durch die Anlegethermoelemente gemessenen Temperaturwerte ist demnach mit den bisher verfügbaren Algorithmen nicht möglich.

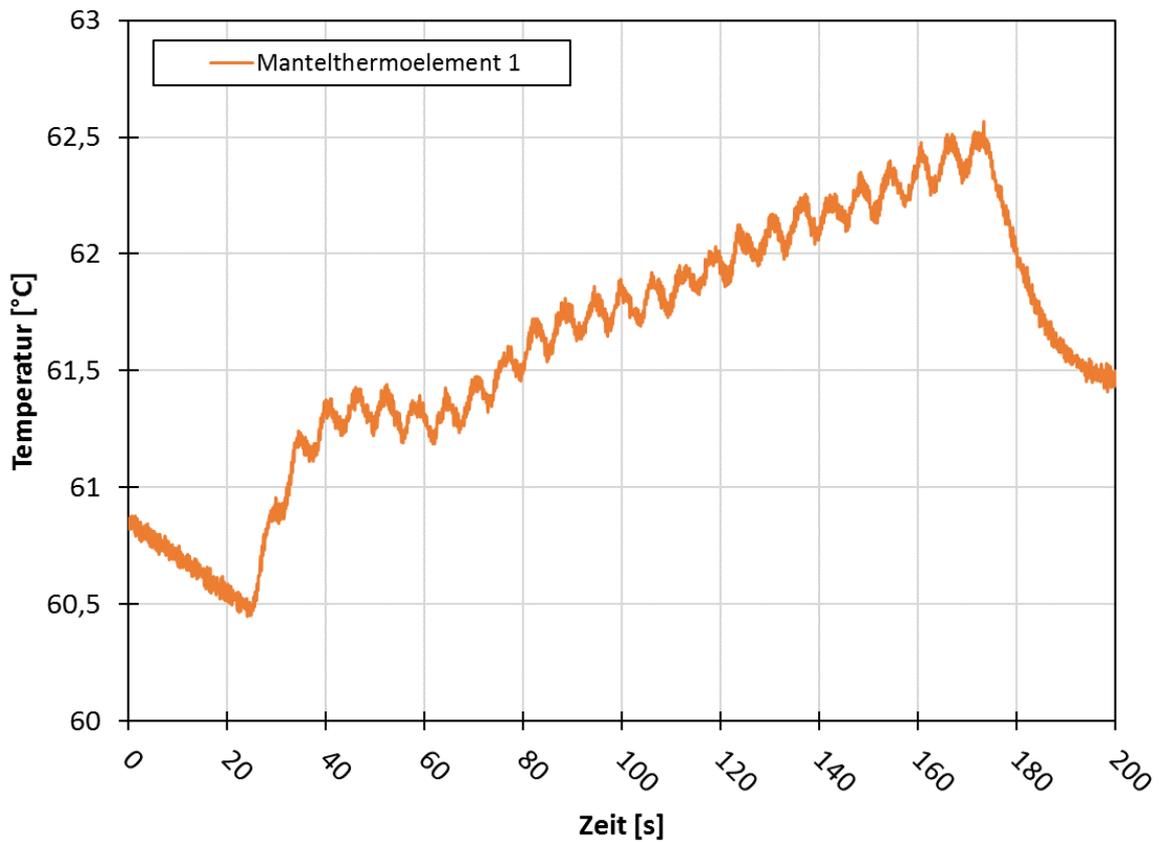


Abbildung 8-5: Temperaturprofil Mantelthermoelement (Teil 2 von 2)

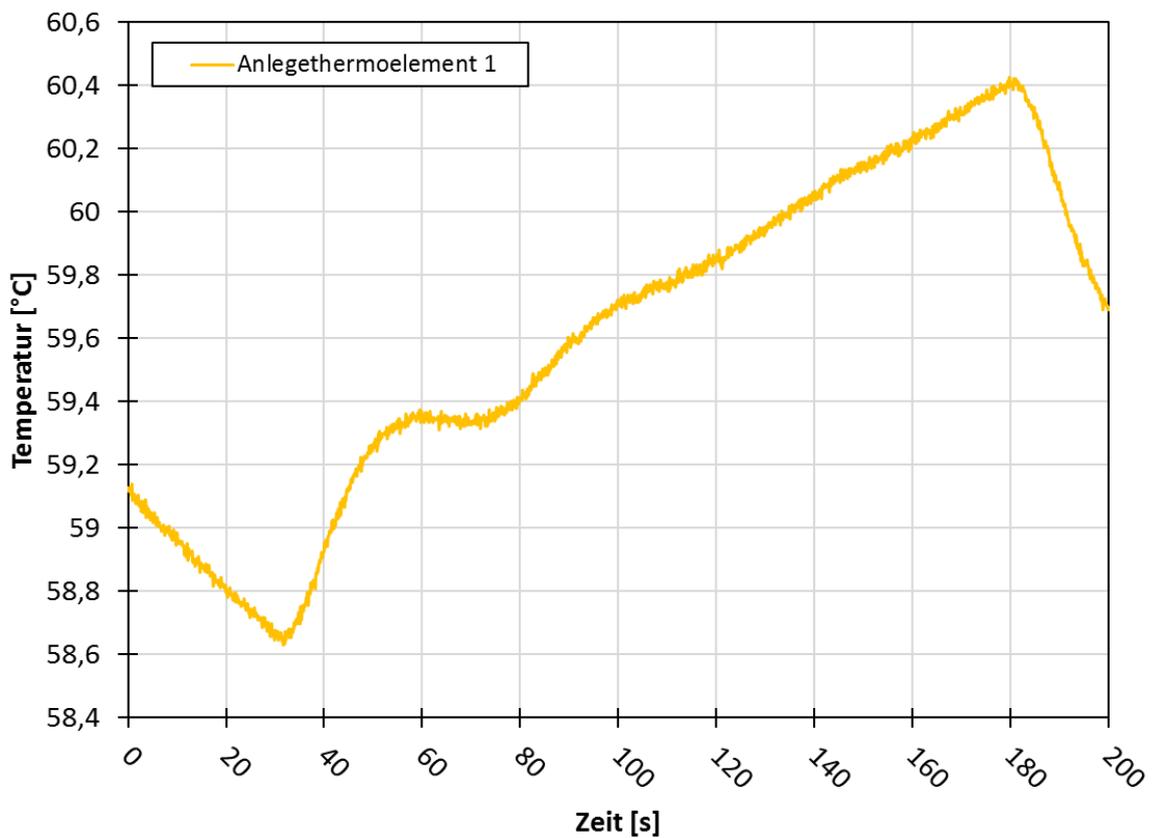


Abbildung 8-6: Temperaturprofil Anlegethermoelement (Teil 2 von 2)

9. Projektleitung, Öffentlichkeits- und Normungsarbeit (AP8)

Die Bearbeitung des Projekts wurde durch ein professionelles Projektmanagement begleitet. Dieses beinhaltete die Leitung des Projekts und die Kontrolle des Projektfortschritts einerseits, und andererseits an Dritte gerichtete Maßnahmen, die primär die Öffentlichkeits- und Normungsarbeiten umfassten.

9.1 Projektleitung

Um den Erfolg des Projekts zu gewährleisten, wurde von SWT regelmäßig ein Soll-Ist-Vergleich zwischen dem jeweils aktuellen Stand des Projekts in Bezug auf die im Projektantrag definierten einzelnen Arbeitspakete und der im Projektantrag definierten zeitlichen Planung durchgeführt. So konnte einerseits der planungsgemäße Projektfortschritt kontrolliert und andererseits konnten im Fall von Abweichungen frühzeitige und zielgerichtete Maßnahmen ergriffen werden, um angemessen auf diese Abweichungen zu reagieren. Zur effizienten und stringenten Projektleitung und erfolgreichen Bearbeitung der Projekthinhalte wurden regelmäßige interne Besprechungen mit den in das Vorhaben involvierten MitarbeiterInnen durchgeführt. Als besonders zielführend hat sich ein zweiwöchentlicher Rhythmus für diese internen Besprechungen herausgestellt.

9.2 Öffentlichkeitsarbeit

Im Folgenden werden die an Dritte gerichteten Maßnahmen, die zur Verbreitung der Projektergebnisse durchgeführt wurden, beschrieben.

9.2.1 Teilnahme an Konferenzen und Tagungen

Herr Manuel Joschka Seiz hat am „31. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, das vom 27.-29. April 2021 als Online-Veranstaltung durchgeführt wurde, teilgenommen und dort einen Beitrag mit dem Titel „Kostengünstige Volumenstrombestimmung von Rohrströmungen mittels Temperaturmessungen“ präsentiert. Dieser Beitrag ist auch im entsprechenden Tagungsband veröffentlicht [2].

Herr Abinon Paul Nedumparambil hat während des Projektzeitraums einen Beitrag mit dem Titel „Temperature based determination of volume flow rates in pipes as a low cost option for energy measurements of solar thermal systems“ veröffentlicht. Dieser Beitrag erschien im Tagungsband des Solar World Congress, der zweijährlich von der International Solar Energy Society (ISES) veranstaltet wird [3]. Es handelte sich hierbei ebenfalls um eine Online-Veranstaltung, die im Zeitraum vom 25.-29.10.2021 stattfand. Herr Nedumparambil stellte seinen Beitrag im Rahmen des ISES Solar World Congress ebenfalls in einem Vortrag vor.

Herr Seiz hat außerdem einen Beitrag für den jährlich vom „Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung, Lüftung, Klimatechnik Stuttgart e. V.“ veröffentlichten HLK-Brief eingereicht. Die Veröffentlichung des Beitrags erfolgte in der im Jahr 2021 erschienenen Ausgabe des HLK-Briefs [4].

Des Weiteren wurde von Herrn Seiz für das „32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, das im Zeitraum vom 03.-05.05.2022 im Kloster Banz in Bad Staffelstein stattfand, ein Beitrag mit dem Titel „Kostengünstige energetische Bilanzierung wärmetechnischer

Anlagen durch eine temperaturbasierte Volumenstrombestimmung“ eingereicht, der im Tagungsband der Veranstaltung veröffentlicht wurde [5]. Herr Dominik Bestenlehner stellte diesen Beitrag bei der Veranstaltung in einem Vortrag vor.

Weiterhin wurde von Herr Seiz für die „International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry - EuroSun 2022“ ein Beitrag mit dem Titel „Cost-effective energy balancing of thermal systems based on temperature measurements only“ erstellt. Dieser Beitrag wird voraussichtlich in dem Tagungsband der Veranstaltung veröffentlicht [6]. Zudem wurde während der Veranstaltung ein Poster ausgestellt, das Auszüge des genannten Beitrags beinhaltete. Die Inhalte des Posters wurden interessierten VertreterInnen aus der Wissenschaft und der Industrie von Herrn Seiz während der Veranstaltung erläutert.

Für das „33. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, das vom 09.-11.05.2023 im Kloster Banz in Bad Staffelstein stattfand, hat Herr Seiz einen Beitrag mit dem Titel „Verfahren für die temperaturbasierte energetische Bilanzierung thermischer Solaranlagen“ vorbereitet [7]. Dieser wurde von Herrn Dr. Drück als Posterbeitrag präsentiert.

9.2.2 Vorträge

Am 05.10.2020 wurde von Herrn Seiz bei der Mitgliederversammlung des „Vereins der Förderer der Forschung im Bereich Heizung, Lüftung, Klimatechnik Stuttgart e.V.“ ein Vortrag mit dem Titel „Kostengünstige Volumenstrombestimmung von Rohrströmungen mittels Temperaturmessungen“ gehalten. Hierbei wurde von Herr Seiz der damalige Stand des Forschungsprojekts „TeBwA“ präsentiert.

Am 29.04.2021 hat Dr. Harald Drück das Verfahren zur temperaturbasierten energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen (TeBwA) bei der Vorlesung „Solarthermie“ an der Universität Stuttgart vorgestellt.

Am 25.01.2022 hat Dr. Harald Drück über die temperaturbasierte energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen (TeBwA) bei der Sitzung des DIN-Normausschusses „Thermische Solaranlagen“ berichtet.

Am 05.05.2022 hat Herr Dominik Bestenlehner beim „32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, einen Vortrag mit dem Titel „Kostengünstige energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen durch eine temperaturbasierte Volumenstrombestimmung“ gehalten.

9.2.3 Normungsarbeit

Dr. Harald Drück nahm an zahlreichen Sitzungen des DIN-Normenausschusses „Thermische Solaranlagen“ teil. Diese fanden statt am 14.01.2020, am 26.01.2021, am 25.01.2022 und am 24.01.2023. Dr. Harald Drück informierte in Form eines Vortrags in der Sitzung am 25.01.2022 über das „TeBwA-Verfahren“ sowie den aktuellen Stand der Verfahrensentwicklung zur temperaturbasierten energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen.

Dr. Harald Drück nahm am 18.11.2020, am 13.09.2021, am 14.09.2021, am 16.11.2021, am 22.11.2022 und am 01.12.2022 an Sitzungen des Technischen Komitees ISO/TC 180 „Solar energy“ teil.

Am 06.03.2019, am 23.09.2021 und am 27.10.2022 nahm Dr. Harald Drück an Sitzungen des europäischen Normungsausschusses CEN TC 312 teil.

9.2.4 Treffen Forschungsnetzwerk „EnergieWendeBauen“

Während der Projektlaufzeit erfolgte die Teilnahme an folgenden Treffen des BMWK Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“:

Dr. Harald Drück und Herr Dominik Bestenlehner nahmen am 14.05.2020 und am 15.05.2020 an einem Projektleitungstreffen des Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“ teil. An einem weiteren Projektleitungstreffen am 15.04.2021 nahmen Dr. Drück, Herr Bestenlehner und Herr Manuel Joschka Seiz teil. Am 23.04.2021 nahm Dr. Drück an einem weiteren Projektleitungstreffen teil.

Dr. Drück, Herr Bestenlehner und Herr Seiz nahmen am 17.11.2020 an der Vorstellung der „neuen wissenschaftlichen Begleitforschung EnergieWendeBauen“ teil.

Am 07.03.2022 nahm Dr. Drück an einem Treffen der Arbeitsgruppensprecher des Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“ teil.

Zudem leitete Dr. Drück in seiner Eigenschaft als Sprecher „Wissenschaft“ der Deutschen Solarthermie-Technologie Plattform (DSTTP) am 23.11.2020, am 25.01.2021, am 18.03.2021, am 10.05.2021 am 28.05.2021, am 21.06.2021, am 04.10.2021, am 08.12.2021, am 16.02.2022, am 03.05.2022 und am 4.& 5.10.2022 die Sitzungen der Arbeitsgruppe 10 „Solarthermie Technologie“ des BMWK Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“.

10. Verwertung der Ergebnisse

Das zentrale Ziel des Vorhabens war die wissenschaftliche Erarbeitung der Grundlagen für ein Verfahren zur temperaturbasierten energetischen Bilanzierung von wärmetechnischen Anlagen sowie die Demonstration seiner grundsätzlichen Funktionsfähigkeit am Beispiel thermischer Solaranlagen. Hierbei sollte eine Genauigkeit von etwa $\pm 10\%$ im Hinblick auf die ermittelten Wärmemengen erzielt werden. Bei den in diesem Zusammenhang durchzuführenden Arbeiten handelte es sich zum weitaus überwiegenden Teil um grundlagenorientierte Vorlauforschung.

Wie aus den in diesem Bericht dargelegten Ergebnissen ersichtlich ist, wurde das zentrale Ziel des Vorhabens erreicht.

10.1 Wissenschaftliche Verwertung

Aus dem Projekt resultiert eine Vielzahl von Ergebnissen, die von wissenschaftlicher Relevanz sind. Hierbei handelt es sich primär um:

- die Ergebnisse der Untersuchungen diverser Algorithmen zur Bestimmung des Volumenstroms im Inneren eines Rohrs.
- Kriterien zur Charakterisierung der Auswertbarkeit von Temperaturprofilen mit dem Ziel, aus diesen den Volumenstrom im Rohr zu bestimmen.
- Erkenntnisse wie eine vorsätzliche Generierung von Temperaturgradienten am effektivsten zu erfolgen hat und welche Verbesserungen sich dadurch im Hinblick auf die Bestimmung des Volumenstroms erzielen lassen.
- die zur Volumenstrombestimmung entwickelten und für das TeBwA-Verfahren erfolgreich eingesetzten Algorithmen.
- Erkenntnisse im Hinblick auf die Faktoren bzw. Aspekte, welche die Genauigkeit des TeBwA-Verfahrens maßgeblich beeinflussen.
- Detaillierte insitu-Messdaten für mehrere Betriebsmonate von zwei Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und zwei solaren Kombianlagen.

In Zusammenhang mit der akademischen Ausbildung Studierender an der Universität Stuttgart dienten Teilaspekte des Projekts als Basis für die Anfertigung von insgesamt acht studentischen Arbeiten, d. h. Bachelor-, Master-, Forschungs- und Studienarbeiten.

Die wesentlichen aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse wurden auf insgesamt 6 nationalen und internationalen wissenschaftlichen Tagungen und Kongressen einem breiten Fachpublikum vorgestellt und mit diesem diskutiert.

Zusätzlich hat das Projekt auch maßgeblich dazu beigetragen bei SWT umfangreiches spezifisches Wissen auf dem Gebiet der temperaturbasierten energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen zu generieren. Hierdurch wird die nationale Forschungskompetenz ausgebaut und auch die Basis für weitere anspruchsvolle Forschungsarbeiten sowie insbesondere auch für eine Weiterentwicklung des TeBwA-Verfahrens bereitet.

10.2 Technische Verwertung

Mit dem innerhalb dieses Projekts neu entwickelten TeBwA-Verfahren steht erstmals ein praxistaugliches Verfahren zur Verfügung, das prinzipiell eine kostengünstige energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen ermöglicht.

Wird bei neu zu errichtenden wärmetechnischen Anlagen, wie z. B. thermische Solaranlagen oder Wärmepumpenanlagen die für die Umsetzung des TeBwA-Verfahrens notwendige Hardware direkt integriert und die erforderliche Software in die entsprechenden Anlagenregelungen implementiert, so kann mit nur sehr geringen Mehrkosten eine energetische Bilanzierung der Gesamtanlage realisiert werden. Hieraus resultieren primär die folgenden beiden Einsatzbereiche. Zum einen kann basierend auf den Ergebnissen der energetischen Bilanzierung eine Aussage zur Funktionsfähigkeit bzw. Leistungsfähigkeit der Anlage erfolgen. Zum anderen kann die in den technischen Mindestanforderungen für die in Zusammenhang mit dem Gebäudeenergiegesetz einsetzbaren bzw. förderfähigen Technologien geforderte Wärmemengenerfassung z. B. bei Wärmepumpenanlagen hierdurch erfüllt werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt für die technische Verwertung der aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse stellt die Weiterentwicklung bzw. Verbesserung des TeBwA-Verfahrens dar. Mehrere in diesem Zusammenhang relevante Ansatzpunkte sind im Abschnitt 11.2 aufgeführt.

10.3 Wirtschaftliche Verwertung

Bereits zum Zeitpunkt der Beantragung dieses Forschungsvorhabens wurde das Ziel formuliert, dass für den Fall einer erfolgreichen Entwicklung des Verfahrens zur temperaturbasierten Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen basierend darauf in einem Anschlussvorhaben gemeinsam mit einem oder mehreren Industriepartnern ein marktfähiges Produkt entwickelt werden soll. Nachdem absehbar war, dass das zentrale Ziel, nämlich die temperaturbasierte Ermittlung der Wärmemengen einzelner hydraulischer Kreisläufe mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 10\%$ im Hinblick auf die übertragenen Wärmemengen erreicht wird, wurde mit der Suche nach einem Industriepartner begonnen. Obwohl der Bedarf für einen Industriepartner bereits mehrfach offensiv kommuniziert wurde, so z. B. beim 31. und 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme im Kloster Banz in Bad Staffelstein und auch bereits mehrere erfolgversprechende Gespräche geführt wurden, ist es bisher nicht gelungen einen Industriepartner für die Realisierung eines marktfähigen Produkts zu gewinnen. Allerdings bestehen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch zu mehreren Firmen erfolgversprechende Kontakte, so dass die Erreichung dieses Ziels durchaus noch realistisch erscheint.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Nachfolgend wird eine Zusammenfassung der im Forschungsprojekt „TeBwA“ generierten Ergebnisse und gesammelten Erkenntnisse sowie ein Ausblick über mögliche weitere Untersuchungsaspekte in Zusammenhang mit der Weiterentwicklung des in diesem Vorhaben entwickelten „TeBwA-Verfahrens“ gegeben.

11.1 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt TeBwA wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht durch die ausschließliche Verwendung kostengünstiger Temperatursensoren wärmetechnische Anlagen präzise energetisch zu bilanzieren.

Der zentrale Aspekt des Verfahrens besteht in der temperaturbasierten Berechnung von Volumenströmen flüssigkeitsdurchströmter Rohre. Diese Volumenströme werden auf Basis der Ausbreitung eines Temperaturgradienten im Fluid ermittelt. Hierfür ist das Vorhandensein einer Temperaturdynamik im Fluid erforderlich. Für die Berechnung des Volumenstroms muss die Temperatur des Fluids im Inneren des Rohrs an zwei Stellen in einem definierten Abstand gemessen werden. Hierbei kommen kostengünstige Temperatursensoren zum Einsatz. Die Berechnung auftretender Volumenströme ist unter Verwendung dieser Temperaturwerte auf Basis der im Projekt TeBwA entwickelten Auswertelgorithmen mit hoher Genauigkeit möglich. Die auftretenden Abweichungen gegenüber den mit konventionellen Wärmezählern bzw. Volumenstrommessgeräten ermittelten Messergebnissen betragen im Allgemeinen deutlich weniger als $\pm 10\%$.

Innerhalb des Projekts wurden vier wärmetechnische Anlagen bzw. thermische Solaranlagen unter Verwendung des neu entwickelten TeBwA-Verfahrens in Kombination mit kostengünstigen Temperatursensoren energetisch bilanziert. Hierbei wurde das neu entwickelte Verfahren der temperaturbasierten Berechnung von Volumenströmen angewandt, um die auftretenden Volumenströme in den hydraulischen Kreisläufen zu berechnen, die an den zentralen Warmwasserspeicher der jeweiligen Anlage angeschlossen sind. Dazu wurden die im regulären Betrieb der Anlagen auftretenden Temperaturschwankungen in den hydraulischen Kreisläufen verwendet. Aufbauend auf den ermittelten Volumenströmen wurde die thermische Energie berechnet, die dem Warmwasserspeicher über die hydraulischen Kreisläufe monatlich zu- bzw. abgeführt wurde. Beim Vergleich der mit dem TeBwA-Verfahren ermittelten Werte gegenüber den Referenzwerten, die von konventionellen Wärmezählern geliefert wurden, zeigte sich, dass die monatlich übertragenen Wärmemengen mit hoher Genauigkeit berechnet werden können. Zwar variiert die hierbei erzielbare Genauigkeit in Abhängigkeit von den betrachteten hydraulischen Kreisläufen, generell liegen die Abweichungen aber meist bei deutlich weniger als $\pm 10\%$ gegenüber den Referenzwerten.

11.2 Ausblick

Nachfolgend werden jene Punkte aufgeführt, die für eine weitere Verbesserung des im Rahmen des Forschungsprojekts TeBwA entwickelten Verfahrens untersucht werden könnten:

- Verbesserung der Berechenbarkeit von kleinen Volumenströmen durch die Verwendung von drei, statt zwei Temperatursensoren in einer Messstrecke. Durch eine entsprechende Platzierung der drei Temperatursensoren in der Messstrecke können zwei Teilstrecken mit unterschiedlichen Längen realisiert werden. Hierbei kann die kurze

Teilstrecke für eine Berechnung kleiner Volumenströme verwendet werden und die lange Teilstrecke für die Berechnung großer Volumenströme. Bei der Datenauswertung kann dadurch flexibel auf auftretende Volumenstromänderungen im betrachteten hydraulischen Kreislauf reagiert werden.

- Gezielte Erhöhung der Temperaturdynamik der betrachteten Rohrströmungen. Hierbei kann auf die bereits entwickelte Strategie für die Aktivierung der elektrischen Heizstäbe aufgebaut werden. In diesem Zusammenhang wurden erste Untersuchungen durchgeführt, bei denen Magnetventile anstelle der elektrischen Heizstäbe eingesetzt wurden. Durch ein kurzzeitiges Schließen der Magnetventile, verbunden mit einem Aufstauen des Fluids, kann eine Erhöhung der Temperaturdynamik erzielt werden ohne dass hierfür in nennenswertem Maß elektrische Energie aufgewendet werden muss. Eine Fortsetzung dieser Untersuchungen erscheint vielversprechend.
- Verwendung von Messwerten mit einer geringeren zeitlichen Auflösung. Derzeit werden im Rahmen des TeBwA-Verfahrens Messwerte mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Hz verwendet. Die bereits durchgeführten ersten Untersuchungen hinsichtlich einer möglichen Reduzierung der zeitlichen Auflösung könnten fortgesetzt werden. Sofern eine temperaturbasierte Volumenstromberechnung mit ausreichender Genauigkeit auch auf Basis von Messwerten mit einer geringeren zeitlichen Auflösung möglich ist, können in finanzieller Hinsicht günstigere messtechnische Komponenten verwendet werden, was sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens auswirken würde.
- Verzicht auf die derzeit verwendeten Messstrecken. Stattdessen könnten die verwendeten Temperatursensoren in einem definierten Abstand direkt in die wasserführenden Rohre der hydraulischen Kreisläufe der energetisch zu bilanzierenden Anlagen eingebracht werden. Die Abschnitte zwischen den Temperatursensoren würden in diesem Fall als Messstrecke fungieren. Dies würde eine weitere Reduzierung der Kosten des Verfahrens mit sich bringen und der Eingriff in die hydraulischen Kreisläufe der energetisch zu bilanzierenden Anlagen würde geringer ausfallen.
- Verwendung von Anlegethermoelementen bzw. Anlegetemperaturfühlern zur Ermittlung des Volumenstroms und zur Berechnung der übertragenen thermischen Leistungen bzw. Wärmemengen. Auch wenn die bisher diesbezüglich durchgeführten Versuche nicht zu erfolversprechenden Ergebnissen geführt haben, vgl. Kapitel 8.2.2, sollten weitere diesbezügliche Untersuchungen durchgeführt werden, da durch die Verwendung von Anlegetemperaturfühlern das TeBwA-Verfahren mit sehr geringem Aufwand bei bestehenden Anlagen eingesetzt werden könnte. Grundsätzlich erscheint es nicht völlig ausgeschlossen, dass durch eine entsprechende Adaption bzw. Modifikation der bereits entwickelten Algorithmen eine realitätsnahe Volumenstrombestimmung auch bei der Verwendung von Anlegetemperaturfühlern möglich ist.
- Einsatz von KI- bzw. KNN-basierten Algorithmen zur Volumenstrombestimmung. Unter Berücksichtigung der aktuell auf den Gebieten der künstlichen Intelligenz (KI) bzw. bei künstlichen neuronalen Netzwerken (KNN) stattfindenden dynamischen Entwicklungen ist der Einsatz dieser Technologien naheliegend. Im Vergleich zu den bisher entwickelten und auf analytischen Berechnungsverfahren basierenden Algorithmen zur Ermittlung des Volumenstroms hätten KI- bzw. KNN-basierte Algorithmen vermutlich den Vorteil, dass sie für ein breiteres Spektrum unterschiedlicher hydraulischer Kreisläufe

zuverlässigere Ergebnisse liefern. Allerdings ist in diesem Zusammenhang auch die Frage zu klären, wie in diesem Fall das Training bzw. das Anlernen der KI- bzw. KNN-basierten Algorithmen erfolgen könnte.

- Mittelfristig sollte das neu entwickelte TeBwA-Verfahren zur temperaturbasierten energetischen Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen kommerzialisiert werden. Zu diesem Zweck wurde in der Endphase des Projekts mit der Suche nach einem geeigneten Industriepartner begonnen. Es ist geplant in Abstimmung mit diesem auf Basis des neu entwickelten TeBwA-Verfahrens ein marktfähiges Produkt zu realisieren.

12. Danksagung

Das Forschungsprojekt „Temperaturbasierte energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen“ mit dem Akronym „TeBwA“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) mit dem Förderkennzeichen 03ETW010 gefördert.

Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Die Autoren bedanken sich zudem bei Herrn Dietmar Haaf, Prof. Dr.-Ing. Harald Mandel, Dr. Kai Scholl und der Wohneigentümergeinschaft aus Waiblingen, die ihre Heizungs- bzw. Solaranlagen für eine Ausrüstung mit umfangreicher Messtechnik zur Verfügung gestellt und somit eine Validierung und Optimierung des TeBwA-Verfahrens auf Basis von Daten aus Feldtestanlagen ermöglicht haben.

13. Literaturverzeichnis

- [1] Frank E.: Untersuchungen zur Bestimmung von Kollektorkreis-Volumenströmen durch Auswertung von Temperaturflanken. Staatsexamensarbeit, Philipps-Universität Marburg 2000.
- [2] Seiz, M.; Nedumparambil, A.; Drück, H.; Bestenlehner, D. „Kostengünstige Volumenstrombestimmung von Rohrströmungen mittels Temperaturmessungen“. In: Tagungsband zum 31. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2021. Virtuell: Conexio GmbH, 2021, 27.-30.04.2021, S. 352-368. ISBN 978-3-948176-13-6. <https://www.solarthermie-symposium.de/fileadmin/ebook/solarthermie-symposium2021>, zuletzt aufgerufen am 24.10.2022.
- [3] Nedumparambil, A., Seiz, M., Drück, H., Bestenlehner, D. „Temperature Based Determination of Volume Flow Rates in Pipes as a Low-Cost Option for Energy Measurements of Solar Thermal Systems“. In: Tagungsband zu ISES Solar World Congress 2021. Virtuell: International Solar Energy Society, 2021, 25.-29.10.2021, S. 608-619. ISBN 978-3-9820408-7-5. <https://doi.org/10.18086/swc.2021.26.05>
- [4] Seiz, M.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Lang, X.: „Temperaturbasierte Volumenstrombestimmung als Basis für eine kostengünstige energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen“. In: HLK-Brief, Bd. 28, Nr.1, 2021, S. 36-38. <https://vdf.hlk-stuttgart.de/veroeffentlichungen/2021-1>, zuletzt aufgerufen am 07.02.2023.
- [5] Seiz, M.; Lang, X., Drück, H., Bestenlehner, D. „Kostengünstige energetische Bilanzierung wärmetechnischer Anlagen durch eine temperaturbasierte Volumenstrombestimmung“. In: Tagungsband zum 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2023. Bad Staffelstein: Conexio GmbH, 2023, 09.-11.05.2023, S. 351-370. ISBN 978-3-948176-22-8. <https://www.solarthermie-symposium.de/fileadmin/ebook/solarthermie-symposium2023>, zuletzt aufgerufen am 24.10.2022.
- [6] Seiz, M.; Lang, X., Drück, H., Bestenlehner, D. „Cost-effective energy balancing of thermal systems based on temperature measurements only“. In: Tagungsband zu ISES and IEA SHC International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry - EuroSun 2022. Kassel: International Solar Energy Society, 2022, 25.-29.09.2022, to be published.
- [7] Seiz, M.; Lang, X., Drück, H., Bestenlehner, D. „Verfahren für die temperaturbasierte energetische Bilanzierung thermischer Solaranlagen“. In: Tagungsband zum 33. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2022. Bad Staffelstein: Conexio GmbH, 2022, 03.-05.05.2022, S. 211-230. ISBN 978-3-948176-17-4. <https://www.solarthermie-symposium.de/fileadmin/ebook/solarthermie-symposium2022>, zuletzt aufgerufen am 24.10.2022.