

# ZUSTANDSDETEKTION IN DER TRINKWARMWASSERINSTALLATION MITTELS TEMPERATURHALTEBAND

Martin Altenburger\*<sup>1</sup>,

Joachim Seifert<sup>1,2</sup>, Marcel Röschke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU Berlin - Hermann-Rietschel-Institut, Marchstr. 4 10587 Berlin, Deutschland,  
martin.altenburger@tu-berlin.de

<sup>2</sup> TU Dresden Institut für Energietechnik, Helmholtzstraße 14 01069 Dresden, Deutschland,  
E-Mail: Joachim.Seifert@tu-dresden.de / marcel.roeschke@tu-dresden.de

## **Kurzfassung:**

Die wachsenden Anforderungen an das Gebäudeenergiemanagement mit dem Ziel einer höheren energetischen Effizienz im Rahmen der Energiewendung erfordern auf der einen Seite ein höheres Maß an Informationen zum Betriebszustand der einzelnen Komponenten. Auf der anderen Seite macht es die wachsende Digitalisierung möglich, diese Daten entweder direkt als Messdaten zu erfassen oder alternative Wege zur Datenbereitstellung zu nutzen.

Vor diesem Hintergrund betrachtet dieser Beitrag die Möglichkeiten der Zustandsdetektion einer Trinkwarmwasserinstallation (TWI) über elektrische Messdaten eines Temperaturhaltebandes (THB). Zunächst wird ein Verfahren beschrieben, mit dem die Temperatur des Trinkwarmwassers (TWW) ausgehend von Messwerten des elektrischen Widerstandes ermittelt werden kann. Dazu wird auf Basis des Aufbaus der TWI mit THB der Berechnungsansatz hergeleitet und anhand von Messergebnissen aus Laborversuchen evaluiert. Es wird gezeigt, dass eine solche Berechnung grundsätzlich eine hohe Übereinstimmung erreicht aber eine größere Unsicherheit als bei fest verbauten Temperatursensoren zu erwarten ist. Die Verwendung dieser Informationen ist jedoch eine kostengünstigere Alternative zum Einbau weiterer Sensoren. Weiterhin werden Ansätze zur Ermittlung von Zapfereignissen beschrieben, mit denen es möglich wird, ein zeitliches Profil von solchen Entnahmen von TWW abzuleiten, um dieses in der Betriebsoptimierung zur Steigerung der Effizienz einzusetzen.

**Keywords:** Maschinelles Lernen, Trinkwarmwasser, Temperaturhalteband, Monitoring, N5GEH

## **1 Hintergrund**

Die Bereitstellung von TWW in Mehrfamilienhäusern erfolgt oft durch eine zentrale Trinkwassererwärmung (TWE), welche über Verteilleitungen die einzelnen Zapfstellen versorgt. Kühlt das Wasser in dieser TWI ab, kann die Folge ein gesteigertes Wachstum von Legionellen (*Legionella pneumophila*) und damit negative hygienischen Auswirkungen sein [1]. Um dies und daraus folgende gesundheitliche Probleme zu vermeiden, sind auf Basis der aktuellen Normen bestimmte Temperaturen (Austrittstemperatur aus TWE  $\vartheta_{TWW} \geq 60 \text{ °C}$  und maximale Absenkung  $\Delta\vartheta_{TWW} = 5 \text{ K}$  in der Verteilleitung) sicherzustellen [2]–[4]. Dazu können Zirkulationssysteme aber auch THBs eingesetzt werden, welche die notwendige

Energiezufuhr auf zwei verschiedenen Wegen sicherstellen [5]. Entweder zentral durch die TWE oder dezentral durch eine selbstregulierende, elektrische Widerstandsheizung (Temperaturhalteband - THB).

### **1.1 Funktionsweise und Möglichkeiten des THB**

Ein THB ist ein elektrisches Heizband, das im Wesentlichen aus zwei parallel geführten Kupferleitern besteht, welche im gleichen Abstand mit einem Kunststoffmaterial ummantelt sind. Durch Kohlenstoffbeigabe in dieses Kunststoffmaterial wird eine Leitfähigkeit herbeigeführt, welche über die gesamte Länge des THB wirksam ist und bei Anlegen einer Spannung, durch den daraus resultierenden Stromfluss, zum Umsatz elektrischer Energie und damit einer Erwärmung führt. Diese bewirkt eine thermische Expansion des Kunststoffmaterial, wodurch sich die Leitfähigkeit und damit die Leistungsaufnahme reduziert. Somit ergibt sich eine temperaturabhängige Wärmeabgabe und damit die selbstregulierende Wirkung des THB. Diese Eigenschaft ist individuell für jede einzelne Stelle des Temperaturhaltebandes gegeben, so dass in kälteren Bereichen mehr Leistung und in wärmeren Bereichen weniger Leistung abgegeben werden kann.

Zur gezielten Einhaltung einer bestimmten Temperatur (abgeleitet aus der notwendigen TWW-Temperatur) wird eine Steuerbox eingesetzt, welche aufgrund der Parameter der Installation den Betrieb des THB mit dem Ziel, die auftretenden Wärmeverluste auszugleichen, steuert. Diese Steuerung erfolgt aufgrund von wirtschaftlichen Zwängen über eine Taktung des THBs, sodass dies zwischen den Betriebszuständen „An“ und „Aus“ wechselt und somit das gesamte System einer zyklischen Schwingung unterliegt.

Wird ein System mit THB genutzt, bietet dieses aufgrund seiner temperaturabhängigen Eigenschaften die Möglichkeit, aus aufgenommenen Messdaten den Systemzustand der TWI ableiten zu können. Diese Zustandsdetektion beinhaltet zwei Teilaspekte: die Ermittlung der Temperatur und die Erkennung von Zapfereignissen, welche gesondert zu betrachten sind und nachfolgend vorgestellt werden. Die Kenntnis über beide Aspekte ermöglicht in der Folge eine Verbesserung in der Betriebsführung, wie ein Monitoring der Betriebsparameter in Bezug auf die Grenzwerte der hygienischen Qualität und entsprechende Reaktionen, die Optimierung der Wärmebereitstellung der zentralen TWE durch eine Ableitung von Nutzungsprofilen aber auch der Anpassung des Betriebs des THBs selbst.

### **1.2 Datenplattform zur Datenerfassung und Auswertung**

Im Kontext der datengetriebenen Betriebsoptimierung dezentraler Anlagen ist die Nutzung einer stabilen Kommunikation und Administration notwendig. Zur Anbindung der Steuerbox des THB wird daher als Kommunikationsplattform das N5GEH<sup>1</sup> [6] genutzt, welches für die Verwaltung von IoT-Geräten und den Datenaustausch mit diesen entwickelt wurde. Durch die Verwendung dieser Plattform ist es über eine einheitliche Schnittstelle möglich, sowohl Daten für eine Auswertung abzurufen als auch Steuersignale zu übermitteln, sodass einerseits die Datenerfassung als auch die Ansteuerung zur Betriebsanpassung des THB möglich ist und

---

<sup>1</sup> National 5G Energy Hub: ([www.n5geh.de](http://www.n5geh.de))

andererseits die Datenauswertung und damit die Entwicklung von Algorithmen und den daraus resultierenden Micro-Services erheblich erleichtert wird.

## 2 Konzept der Zustandsdetektion

Die Zustandsdetektion der TWE umfasst zwei grundlegende Bereiche:

- Die Ermittlung der Temperatur des TWW in der Verteilleitung
- Die Detektion von Zapfereignissen

Für diesen Beitrag ist die zentrale Fragestellung: „Können die Messdaten eines Temperaturhaltebandes für die Zustandsdetektion einer Trinkwarmwasserinstallation genutzt werden?“ Um diese Frage zu beantworten, wurde ein Versuchsstand errichtet, mit dem verschiedene Situationen nachgebildet werden können. Die Messergebnisse dienen hierbei einerseits zur Ableitung der notwendigen Zusammenhänge zur Ermittlung von Algorithmen als auch als Grundlage für die Modellbildung und Evaluation der Ergebnisse.

Im Folgenden wird jeweils auf die Datenauswertung und Entwicklung von Algorithmen für die beiden Teilaspekte eingegangen.

### 2.1 Ermittlung der Temperatur des TWW

Die Steuerbox des THB ermöglicht es, die elektrischen Kennwerte des THB auszulesen. Diese lassen dabei einen Rückschluss auf den Betrieb des angeschlossenen THBs zu. Die Ermittlung der TWW-Temperatur ist aufgrund des Aufbaus der TWI mit THB nur über mehreren Zwischenschritten möglich. Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die hier verwendete Struktur inkl. der vorhandenen Bestandteile und der relevanten Temperaturen.

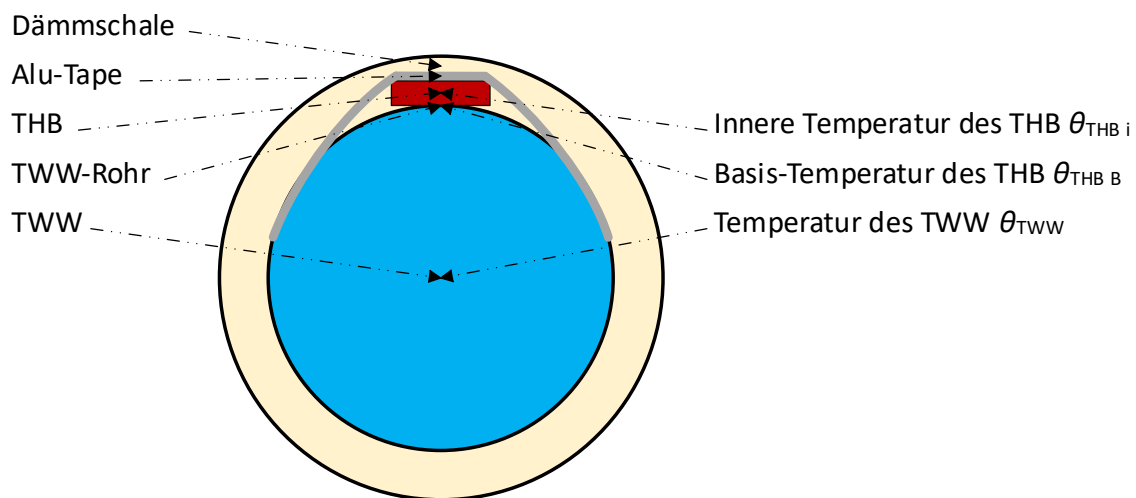


Abbildung 2-1: Schema Aufbau TWI mit THB

Wie in dieser Abbildung zu erkennen ist, unterscheiden sich die Temperaturen im Inneren des THB  $\vartheta_{\text{THB } i}$ , am äußeren Rand des THB  $\vartheta_{\text{THB } B}$  und im TWW  $\vartheta_{\text{TWW}}$  voneinander. Ausgehend von den elektrischen Kennwerten ist eine mehrstufige Berechnung, wie in der folgenden Übersicht dargestellt und nachfolgend beschrieben, zu nutzen:

- Berechnung der Temperatur im Inneren des THB  $\vartheta_{\text{THB } i}$
- Berechnung der Basis-Temperatur des THB  $\vartheta_{\text{THB } B}$  (vgl. äußeren THB-Temperatur)
- Berechnung der Temperatur des TWW  $\vartheta_{\text{TWW}}$

### 2.1.1 Berechnung der Innen-Temperatur des THB

Die Steuerbox des THB ist in der Lage verschiedene elektrische Kenngrößen als Messwerte zur Verfügung zu stellen, welche erfasst und an einen Berechnungsservice übermittelt werden können. Hierbei ist in aktuelle Messwerte und aggregierte Werte zu unterscheiden (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Übersicht über Messwerte der Steuerbox des THB

Aktuelle Messwerte	Aggregierte Werte
<ul style="list-style-type: none"> <li>el. Spannung am THB <math>U_{\text{THB}}</math></li> <li>el. Stromstärke durch THB <math>I_{\text{THB}}</math></li> <li>el. Leistung des THB <math>P_{\text{THB}}</math></li> <li>el. Widerstand des THB <math>R_{\text{THB}}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>aufgenommene el. Energie des THB <math>W_{\text{THB}}</math></li> </ul>

Die Messgröße des el. Widerstandes  $R_{\text{THB}}$  bietet den Vorteil, dass sie über eine zweite Messschaltung auch in Standby-Phasen des THBs ermittelt werden kann. Dies hat den Vorteil, dass zu jeder Zeit eine Aussage über den Zustand des THBs bestimmt werden kann. Nachteilig ist hingegen, dass sich der Widerstand aufgrund des Taktbetriebs des THBs zyklisch und mit teilweise großen Gradienten ändert, sodass eine hohe zeitliche Auflösung notwendig wird (vgl. Ergebnisse in Kapitel 3). Die Verwendung der aggregierten el. Energie hat an dieser Stelle den Vorteil, dass eine geringere zeitliche Auflösung genutzt werden kann. Gleichzeitig sinkt damit auch der Detailgrad der Ergebnisse und es steigt die Zeitspanne, bis zur Detektion einer Änderung. Aufgrund dieser Abwägung wird die Berechnung über den el. Widerstand gewählt.

Infolge der Eigenschaften des Materials des THBs besteht ein Zusammenhang zwischen dem Widerstand bzw. der el. Leistung und der Temperatur des Materials. Um diesen Zusammenhang per Formel zu beschreiben, wurden Versuche durchgeführt und die Messdaten ausgewertet. Für das verwendete THB zeigt sich, dass eine Regressionsgleichung für die innere Temperatur des THB  $\vartheta_{\text{THB}i}$  nach Gleichung 1 unter Nutzung des spezifischen Widerstands  $r_{\text{THB}}$  (vgl. Gleichung 2) herstellbar ist.

$$\vartheta_{\text{THB}i} = x_{\vartheta 0} + x_{\vartheta 1} \cdot \frac{1}{r_{\text{THB}}} + x_{\vartheta 2} \cdot \frac{1}{r_{\text{THB}}^2} + x_{\vartheta 3} \cdot \frac{1}{r_{\text{THB}}^3} \quad 1$$

$$r_{\text{THB}} = R_{\text{THB}} \cdot l_{\text{THB}} \quad 2$$

Über diese Gleichung und die dabei zu verwenden Koeffizienten, kann die mittlere Temperatur im Inneren des THB  $\vartheta_{\text{THB}i}$  für eine TWI mit THB beliebiger Länge  $l_{\text{THB}}$  ausgehend von Messwert des el. Widerstandes  $R_{\text{THB}}$  kontinuierlich berechnet werden.

### 2.1.2 Berechnung der Basis-Temperatur des THB

Aufgrund der zyklischen Betriebsweise des THB wird es notwendig, die Schwankungen der inneren Temperatur des THB zu detektieren, um diese in den weiteren Berechnungen ausschließen zu können. Dies ist erforderlich, da die Temperatur des TWW i.d.R. aufgrund der thermischen Kapazitäten und Widerstände im System kaum schwankt. Aufgrund der

einfachen Detektion wird an dieser Stelle die minimale Temperatur des THB als Basis-Temperatur angenommen, welche bei ausbleibendem inneren Wärmeeintrag im THB der äußeren Temperatur des THB entspricht. Die Detektion kann für vollständige Zyklen über die Ermittlung der Minima als Stützstellen und eine Interpolation erfolgen. Für eine fortlaufende Analyse und damit eine Auswertung von Daten unabgeschlossener Betriebszyklen wird es notwendig, diese Berechnung anderweitig fortzuschreiben. Dafür stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung, wie:

- die Fortschreibung aus letzten Zyklen,
- die Nutzung von künstlichen neuronalen Netzen (KNN),
- oder die Nutzung von ARIMA-Modellen.

Praktische Analysen haben gezeigt, dass die Fortschreibung der Werte aus dem letzten Zyklus die Methode mit den geringsten Abweichungen und Rechenzeiten ist. Der Ansatz beruht auf der Annahme, dass sich aufgrund des zyklischen Verhaltens die gleiche Übertemperatur des THB gegenüber der Basistemperatur ausbildet und damit die aktuelle Basis-Temperatur fortlaufend ermittelt werden kann. Gleichung 3 und 4 beschreiben diesen Ansatz. Die jeweilige Übertemperatur ist dabei selbst in Relation zur aktuellen THB-Temperatur zu setzen, da diese ebenfalls Einfluss hat. Dies kann über eine lineare Abhängigkeit und Verhältnisgleichung zwischen den Temperaturniveaus der aktuellen THB-Temperatur und der THB-Temperatur der vorangegangenen Zyklen erfolgen, welche über den Faktor  $\alpha$  eingefügt wird.

$$\vartheta_{\text{THB B}} = \vartheta_{\text{THB i}} - \Delta\vartheta_{\text{THB}} \quad 3$$

$$\Delta\vartheta_{\text{THB}}(t) = \alpha \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=-m}^m \Delta\vartheta_{\text{THB}}(t + j \cdot \tau_{\text{SR}} - i \cdot \tau_{\text{OC}}) \quad 4$$

Mit diesem Ansatz kann eine Basistemperatur des THBs  $\vartheta_{\text{THB B}}$  ermittelt werden, welche in linearer Abhängigkeit zur TWW-Temperatur  $\vartheta_{\text{TWW}}$  verläuft.

### 2.1.3 Berechnung der Temperatur des TWW

Die zuvor ermittelte Basistemperatur des THBs weist eine vom Betrieb des THBs abhängige Übertemperatur gegenüber der Temperatur des TWWs auf. Diese Übertemperatur ist vorrangig von folgenden Faktoren abhängig:

- Temperatur des THBs  $\vartheta_{\text{THB}}$
- Aktiver Betriebsanteil (Duty Cycle)  $\varphi_{\text{DC}}$
- Länge des Betriebszyklus des THB  $\tau_{\text{DC}}$

Die Länge des Betriebszyklus spielt dabei eine untergeordnete Rolle, da dieser Parameter im normalen Betriebsfall konstant gehalten wird. Die beiden anderen Parameter ( $\vartheta_{\text{THB}}$  und  $\varphi_{\text{DC}}$ ) hingegen sind im Betrieb von entscheidender Bedeutung, da beide variieren können.

Eine separate Betrachtung der beiden Einflussgrößen zeigt hier die Abhängigkeiten auf, wobei für den Zusammenhang zwischen der Temperatur des TWW  $\vartheta_{\text{TWW}}$  und des THB  $\vartheta_{\text{THB}}$  eine lineare Abhängigkeit festzustellen ist und für die Abbildung über den Duty Cycle  $\varphi_{\text{DC}}$  hingegen die größten Übereinstimmungen bei Nutzung einer quadratischen Funktion erreicht werden.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen ist eine gekoppelte Berechnung möglich, mit der für Messdaten aus der Versuchsumgebung die in Abbildung 2-2 dargestellten Ergebnisse erreicht werden. Der Berechnung liegt eine kombinierte Regression nach Gleichung 5 zugrunde.

$$\vartheta_{\text{TWW}} = (x_{\text{TWW } 0} + x_{\text{TWW } 1} \cdot \varphi_{\text{DC}} + x_{\text{TWW } 2} \cdot \varphi_{\text{DC}}^2) \cdot \vartheta_{\text{THB}} + x_{\text{TWW } 3} \cdot \varphi_{\text{DC}} + x_{\text{TWW } 4} \cdot \varphi_{\text{DC}}^2 + x_{\text{TWW } 5} \quad 5$$

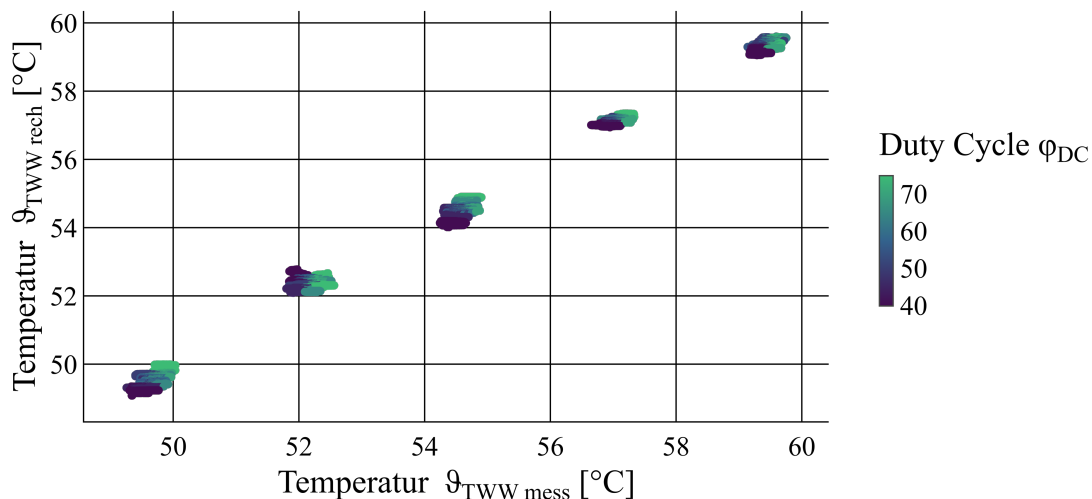


Abbildung 2-2: Zusammenhang zwischen der TWW- & THB-Temperatur

Mit diesem Ansatz ist es möglich, eine Abschätzung der Temperaturen in der TWI vorzunehmen und damit weitere Analysen umsetzen zu können.

## 2.2 Detektion von Zapfereignissen

Eine Problemstellung, für welche die Daten des THB bzw. die ermittelten Temperaturen herangezogen werden, ist die Detektion von Zapfereignissen, also Zeitpunkten, in denen es zu Entnahmen von TWW kommt. Hier sind verschiedene Ansätze denkbar, zu denen nachfolgend kurz deren Ansatz skizziert wird, wobei eine ausführliche Evaluation der Ergebnisse aber noch aussteht.

### 2.2.1 Detektion über Temperaturschwankungen

Der erste Ansatz ist es, die Zapfereignisse über einen Anstieg der Temperatur zu detektieren, was auf der Annahme der aktuell geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland aufbaut, nach denen die Temperatur des TWW in der Leitung bei  $\vartheta_{\text{TWW}} = 55 \text{ °C}$  gehalten werden muss und die Austrittstemperatur aus dem Wärmeerzeuger auf  $\vartheta_{\text{TWE}} = 60 \text{ °C}$  einzustellen ist. Mit dieser Annahme wird die Temperatur in der TWI bei stattfindenden Zapfereignissen ansteigen bzw. bei ausbleibenden Zapfereignissen wieder absinken.

Eine Detektion dieser Anstiege kann über verschiedene Verfahren erfolgen zu denen Tabelle 2.2 eine Übersicht gibt. Es ist jedoch festzustellen, dass mit jedem der Verfahren nur ein Zapfereignis festgestellt werden kann, der genaue zeitliche Umfang lässt sich auf Basis der Daten nicht ableiten. Dies resultiert aus der thermischen Trägheit sowohl zu Beginn eines Zapfereignisses (Temperaturanstieg) als auch nach Ende des Zapfereignisses (Abfall der

Temperatur). Damit kann auch der vorhandene Volumenstrom nicht bzw. nur sehr unkonkret abgeschätzt werden, da auch der Gradient der Anstiege von weiteren Faktoren, wie bspw. der Position der Zapfstelle, abhängig ist

Tabelle 2.2: Berechnungsverfahren zur Detektion von Zapfereignissen über Temperaturänderungen

Verfahren	Beschreibung	Bewertung
Schwellwertverfahren	Manuelle Festsetzung bestimmter Grenzwerte für Temperaturanstieg und -abfall	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachvollziehbare Zuordnung</li> <li>• einfache Umsetzung</li> <li>• feste Schwellwerte, d.h. keine dynamische Anpassung</li> </ul>
Klassifikation mit überwachtem Machine Learning	Nutzung von Eingangsdaten mit Informationen über Zapfereignisse (Labels) zur Identifikation der Grenzwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begründbare Identifikation der Schwellwerte</li> <li>• Notwendigkeit der Nutzung von Labels</li> </ul>
Cluster-Verfahren mit unüberwachtem Machine Learning	Identifikation von Schwellwerten auf Basis von Messdaten aufgrund vorhandener Cluster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begründbare Identifikation der Schwellwerte</li> <li>• Anpassung der Schwellwerte mit Messdaten möglich</li> <li>• Keine Labels zum Training notwendig</li> </ul>

### 2.2.2 Detektion über den mittleren Widerstand des THBs

Ein weiterer Ansatz ist die Auswertung des mittleren Widerstands des THBs  $R_{\text{THB m}}$ . Hintergrund ist, dass der Wärmeübergang zwischen TWW und Rohr bei Strömung (Zapfereignissen) erhöht wird, sodass die Übertemperatur des THB im Vergleich zum TWW sinkt und damit bei gleichbleibender Temperatur der mittlere Widerstand  $R_{\text{THB m}}$  absinkt. Nutzt man diesen Ansatz ist es denkbar, mögliche Zapfereignisse auf Basis der Messdaten des THBs erkennen zu können. Eine Einschätzung des Volumenstroms ist aber auch hier nur bedingt möglich, da bei höheren Volumenströme nur noch geringe Änderungen des Widerstandes festzustellen sind. Abbildung 2-3 stellt den Ansatz schematisch dar, nach dem zu erkennen ist, dass über die Grenzwerte zugeordnet werden kann, ob ein Zapfereignis vorliegt oder nicht. Gleichung 6 zeigt die Fallunterscheidung für diese Zuordnung.

$$Z_{\text{TWW}} = \begin{cases} 1, R_{\text{THB m}} \leq R_{\text{THB Grenz}} \\ 0, R_{\text{THB m}} > R_{\text{THB Grenz}} \end{cases} \quad 6$$

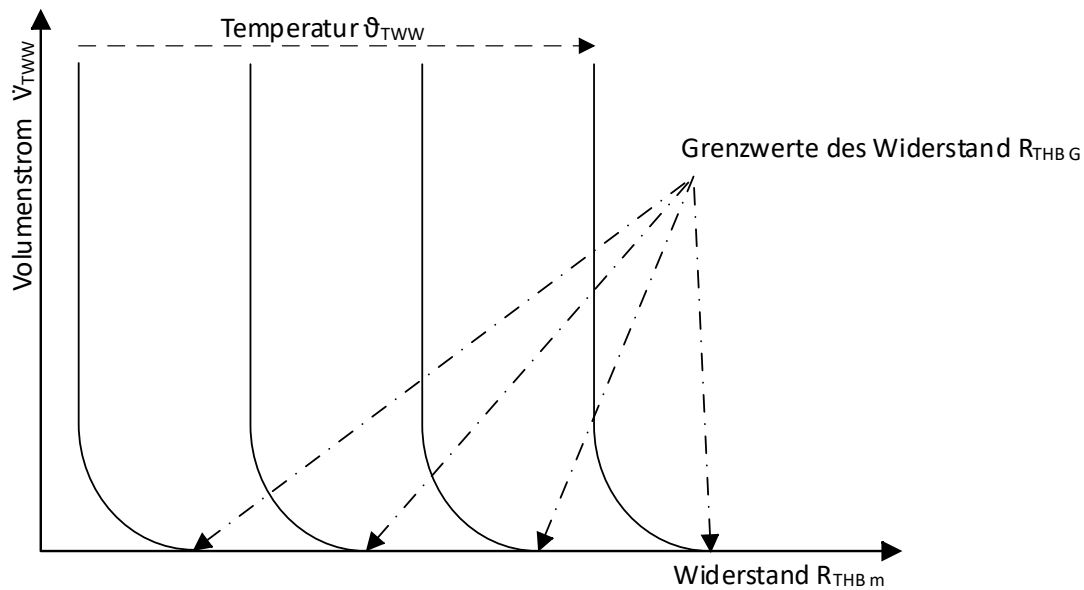


Abbildung 2-3: Schema zum Zusammenhang zwischen Widerstand  $R_{THB m}$  und Volumenstrom  $\dot{V}_{TWW}$

Problematisch an diesem Ansatz ist, dass hierfür die exakte Temperatur des TWW in der Leitung  $\vartheta_{TWW}$  benötigt wird, und diese aus den Messdaten des THBs nur mit einer gewissen Toleranz ermittelbar ist (vgl. Kapitel 3). Eine gemeinsame Verwendung ist daher mit hohen Unsicherheiten verbunden und nicht zu empfehlen.

### 3 Bewertung der Ergebnisse

Die im vorangegangenen Kapitel 2 vorgestellten Berechnungen zur Ermittlung der TWW-Temperaturen wurden im Betrieb an Versuchsstand evaluiert, sodass nachfolgend erste Ergebnisse vorgestellt und bewertet werden.

Die Berechnung wurde für einen Zeitraum mit verschiedenen Temperaturniveaus, Volumenströmen für verschiedene zeitliche Auflösungen durchgeführt und die Ergebnisse mit den real gemessenen Temperaturen im TWW verglichen. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die zur Bewertung verwendete Versuchsmatrix.

Tabelle 3.1: Versuchsmatrix zur Bewertung der Berechnungen

Parameter	Variation
TWW-Temperatur $\vartheta_{TWW}$	50 °C ... 60 °C
Zeitliche Auflösung / Abtastrate $\tau_{SR}$	1 s, 5 s, 10 s
Volumenstrom $\dot{V}_{TWW}$	0 l/min ... 32 l/min

Ergebnis der Bewertung ist, dass mit dem Ansatz die Temperatur des TWWs in einem Toleranzbereich zuverlässig ermittelt werden kann. Diese Schwankungen liegen für den Großteil der Messwerte im Bereich von  $\Delta\vartheta = 2 \text{ K}$ , was auf Schwankungen der Übertemperatur in Abhängigkeit des Volumenstroms zurückgeführt werden kann. Weiterhin ist festzustellen, dass die Güte der Berechnungsergebnisse mit zeitlicher Auflösung abnehmen, da die Information über die minimalen Temperaturen im Betriebszyklus aufgrund teilweise hoher



Gradienten reduziert werden. Abbildung 3-1 gibt einen Überblick über die Abweichungen zwischen den verschiedenen zeitlichen Auflösungen (Varianten). Der Boxplot stellt den Schwankungsbereich dar, wobei 50 % der Messwerte innerhalb der Box liegen und nur Ausreißer (Abweichung mehr als das 1,5-fache des Interquartilsabstand).

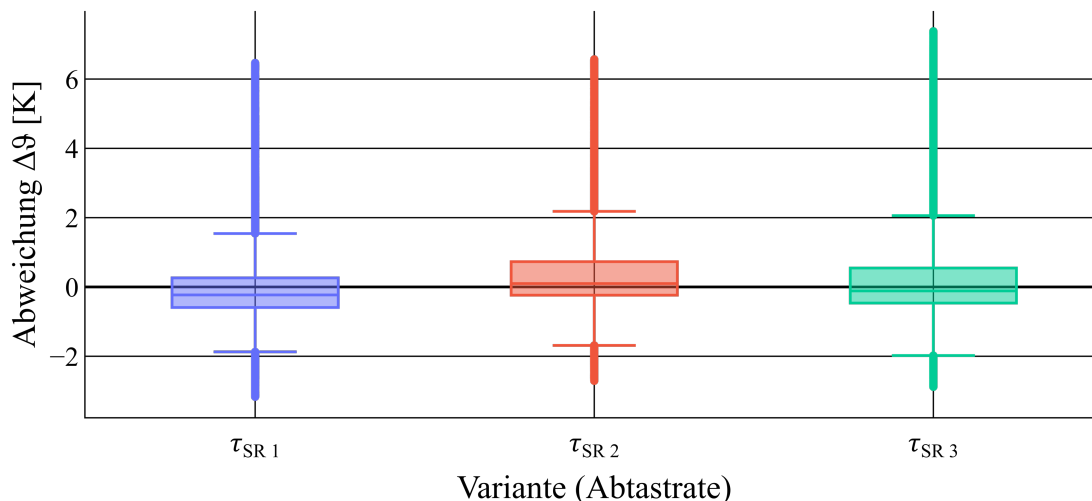


Abbildung 3-1: Abweichungen der Temperaturberechnung bei verschiedenen Abtastraten

Die Berechnung der Temperaturen ist also in der Lage die realen TWW-Temperaturen aus dem Widerstand des THB abzuleiten. Für akkurate Ergebnisse ist dabei eine möglichst hohe Auflösung  $\tau_{SR} < 5$  s anzustreben.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Berechnungsansätze zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, aus den elektrischen Messdaten des THB, Informationen über den Zustand der TWI, wie die mittlere Temperatur des TWW  $\vartheta_{TWW}$  oder auftretende Zapfereignisse, zu ermitteln. Die gestellte Forschungsfrage kann damit bejaht werden, wobei die Ergebnisse solcher Berechnungen einer höheren Unsicherheit unterliegen, als das bei herkömmlichen zusätzlichen Sensoren zur direkten Messung zu erwarten wäre. Die Verwendung des THB als Sensor hat jedoch den Vorteil, dass keine zusätzlichen Messgeräte im Gebäude verbaut und angeschlossen werden müssen, was den Aufwand bei der Installation erheblich senkt und damit weitere Informationen zu geringeren Kosten zur Verfügung gestellt werden können.

Die vorgestellten Verfahren wurden bislang noch nicht mit Messdaten eines THBs im praktischen Einsatz in einem Gebäude und damit unter realen Bedingungen getestet, dies wird zeitnah angestrebt, um zu demonstrieren, dass die ermittelten Ergebnisse reproduzierbar sind und somit die Methode auch in der Praxis Anwendung finden kann. An dieser Stelle ist als erster Anwendungsfall das Monitoring der Temperaturen in der TWI und die Einschätzung von potenziellen Problemen in Bezug auf Legionellen zu nennen.

Der Ansatz der Zapfdetektion wird ebenso weiterhin genauer untersucht und anhand von Messdaten aus dem Labor sowie aus einem realen Gebäude erprobt. Bisherige Messdaten zeigen jedoch, dass auch hier ein Mehrwert zu erwarten ist, da in vielen Gebäuden mit einer zentralen TWE mit einem TWW-Speicher gearbeitet wird und somit keine konkreten

Informationen über Zapfereignisse vorliegen. Sole Informationen könnten jedoch die Effizienz der Bereitstellung des TWW durch eine zeitliche Anpassung an den Bedarf erhöhen.

## 5 Danksagung

Dieser Beitrag entspringt dem Vorhaben TWE-Flex, das mit Mitteln des deutschen Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EN1056-A gefördert wurde.

## 6 Literatur

- [1] H. Müller, N. Zacharias, C. Schreiber, S. Völker, und T. Kistemann, „Erkennung und Bekämpfung von vorübergehend unkultivierbaren Pathogenen in der Trinkwasser-Installation: Teilprojekt 1“, Universität Bonn - Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit, Bonn, 2014.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN 1988-200“. Beuth Verlag GmbH, Mai 2012.
- [3] S. B. Löwe, „Risikofaktoren in Trinkwasser-Installationen für das Vorkommen von Legionellen“, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://hdl.handle.net/20.500.11811/7735>
- [4] H. E. Müller, *Legionellen - ein aktuelles Problem der Sanitärhygiene Infektion und Bekämpfung*. Ehningen bei Böblingen: expert-Verl., 1992.
- [5] M. Knorr und J. Seifert, „Energetische Gesamtsystemanalyse von Trinkwarmwassererzeugungs- und Verteilsystemen“, *GI - Gebäudetechn. Innenraumklima*, Nr. Jg.134, Nr. 1, S. 66–74, März 2013.
- [6] J. Seifert *u. a.*, „National 5G Energy Hub - Einführung zukunftssträchtiger Kommunikationsstandards in der Energietechnik“, Technische Universität Dresden, Dresden, Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2314/KXP:1802513477>