

Kalibriereinrichtung für Wärmestromsensoren

Joseph Beerel¹, Sebastian Marin¹, Silke Augustin¹, Thomas Fröhlich¹, Frederik Bartz² und Stephan Gehrman²

¹Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland

²Messtechnik Automatisierungstechnik, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach, Deutschland

Kontakt: joseph.beerel@tu-ilmenau.de

Einleitung

Die immer stärker an Bedeutung gewinnende Elektromobilität erfordert eine intensive Forschung im Bereich der Batterietechnik [1]. Eine wichtige Aufgabe ist es, die Temperatur der Batteriezellen im Kraftfahrzeug zu überwachen. Die Batterie hat nur ein kleines thermisches Arbeitsfenster, deshalb ist es von Bedeutung die Temperatur schnell zu erfassen, um mit einer Temperaturregelung Einfluss zu nehmen [2]. Eine Möglichkeit der Temperaturüberwachung in Batteriezellen besteht darin, einen Wärmestromsensor zwischen Batterie und zugehörigem Kühlsystem einzubetten [1]. Mit Wärmestromsensoren (WSS) können kleinste Temperaturdifferenzen gemessen und die Richtung kleinster Wärmeströme detektiert werden [3]. Für diesen Einsatzzweck sind WSS mit einer bekannten Empfindlichkeit notwendig, deshalb ist die Kalibrierung der WSS von höchster Bedeutung.

In diesem Beitrag wird eine Kalibriereinrichtung vorgestellt, mit der Wärmestromsensoren, deren Funktionsweise auf der Gradienten Methode beruht, kalibriert werden können. Durch die Einrichtung werden zwei exakt temperierbare Oberflächen bereitgestellt. Zwischen diesen beiden Oberflächen wird der zu prüfende WSS appliziert, dabei bildet sich ein thermischer Kontaktwiderstand zwischen Prüfling und Prüfstandoberfläche aus [4, 5]. Die Anforderungen an den Prüfstand betreffen zum einen den Temperaturbereich (absolut -30 °C bis 60 °C) und zum anderen die kleinste einstellbare Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta = 100$ mK.

Wärmestrom

Der Wärmestrom ist eine nicht messbare Prozessgröße, die durch einen Temperaturgradienten hervorgerufen wird. Im Falle der Wärmeleitung wird die Wärmestromdichte \dot{q} , die den Wärmestrom bezogen auf die Fläche angibt, durch die Fouriersche Differenzialgleichung beschrieben [6]. Für den eindimensionalen Wärmetransport durch eine Schicht mit der Dicke l , der Wärmeleitfähigkeit λ und der über der Schicht abfallenden Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ kann diese Differenzialgleichung zu Gleichung (1) vereinfacht werden.

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{l} \cdot \Delta\vartheta \quad (1)$$

Wärmestromsensor

Ein Wärmestromsensor ist ein messtechnisches Wandlerelement, das einen Wärmestrom in ein elektrisches Signal umwandelt, das zum zu messenden Wärmestrom proportional ist. Um präzise Messungen mit dem WSS durchführen zu können muss die Kennlinie zuvor bestimmt werden. Wärmestromsensoren, deren Funktionsprinzip auf der

„Gradienten Methode“ (auch bekannt unter dem Namen „Hilfswandprinzip“ [9]) beruht, messen eine Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$, die über einem thermischen Widerstand abfällt

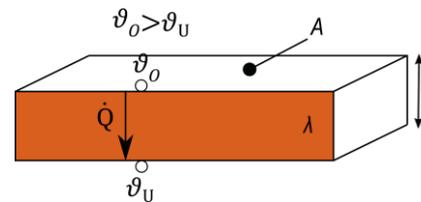


Abbildung 1: Vereinfachte Geometrie eines Wärmestromsensors [7].

Dabei zeichnet sich der Wärmestromsensor durch eine Fläche A , eine Dicke l und den thermischen Widerstand R_{th} aus (vgl. Abbildung 1), diese Größen stehen wie folgt im Zusammenhang [8]:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot \Delta\vartheta = \frac{\Delta\vartheta}{R_{th}} \quad (2)$$

Die Temperaturdifferenz wird meist mittels Thermoketten gemessen [9], dabei sind die Temperaturmessstellen gleichmäßig über die gesamte Fläche des WSS verteilt.

Kalibrier Aufbau

Es gibt verschiedene Verfahren zum Kalibrieren von WSS, deren Aufbau der Gradienten Methode entspricht. Ein weit verbreitetes Verfahren ist die Guarded Hot Plate (GHP) Methode [10], bei der ein definierter Wärmeeintrag in Form von elektrischer Leistung in den WSS eingepreßt wird. Eine weitere Möglichkeit ist der Vergleich des Sensors gegen einen Referenzsensor [11] oder Referenzmaterial [12], dies ist in verschiedensten Variationen möglich.

Eine neuartige Methode zum Kalibrieren von Wärmestromsensoren wurde von Hohmann [13] vorgestellt, dieser Kalibrier Aufbau bedient sich dem Ansatz, eine bekannte Temperaturdifferenz bereitzustellen, durch die der WSS kalibriert wird. Der Temperaturbereich dieses Aufbaus reicht von 50 °C bis 200 °C, die Temperierung wird durch elektrische Heizer vorgenommen. Auf das Prinzip einer bekannten Temperaturdifferenz baut der in diesem Beitrag vorgestellte Kalibrierstand auf, denn dieser Aufbau ähnelt sehr stark den späteren Einsatzbedingungen der zu kalibrierenden WSS.

Aufbau und Funktionsweise

Für den in diesem Beitrag vorgestellten Kalibrier Aufbau wird ein angepasster Temperaturbereich von -30 °C bis 60 °C benötigt. Da auch bei Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur kalibriert werden soll, ist eine Temperierung allein durch eine elektrische Heizung nicht möglich,

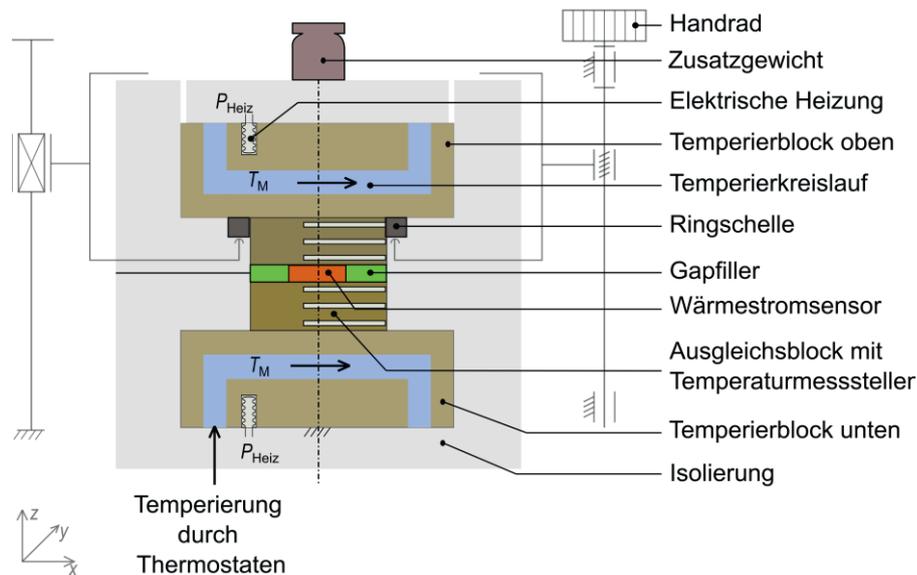


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Kalibriereinrichtung

deshalb erfolgt die Temperierung durch einen Badthermostaten. Im Vorfeld wurde ein FEM Modell des Aufbaus erstellt und eine Parameteroptimierung hinsichtlich der Anforderungen an den Prüfstand durchgeführt. Diese Optimierung, wie auch die Beschreibung des Aufbaus der Kalibriereinrichtung wurde von Marin [14] vorgestellt. Im Wesentlichen besteht der Prüfstand, wie in Abbildung 2 dargestellt, aus zwei temperierten Oberflächen zwischen die der Prüfling eingebracht wird und um den sich die gesamte Kalibriereinrichtung symmetrisch aufbaut. Der Prüfling (WSS) ist in der $x - y$ Ebene von dem Gapfiller umgeben, der die gleichen Wärmeleiteigenschaften wie der WSS haben sollte, nur so wird eine homogene Temperaturverteilung über der Prüfoberfläche gewährleistet.

Die Prüfoberflächen werden durch den Ausgleichsblock oben und den Ausgleichsblock unten bereitgestellt. Die Oberflächentemperatur wird nach einem aus der Kalibrierung von Oberflächentastthermometern bekanntem Verfahren ermittelt [9]. So werden in den Ausgleichsblock drei Temperaturmessstellen integriert (vgl. Abbildung 2), in denen die Temperatur mit Widerstandsthermometern Pt100 ermittelt wird. Die Thermometer wurde in-situ kalibriert. Die Position der Temperaturmessstellen ist bekannt, so kann von den drei gemessenen Temperaturen auf die Oberflächentemperatur extrapoliert werden. Die Applikationsfläche ist eine Kreisfläche mit dem Durchmesser 75 mm. Der Ausgleichsblock und der sich daran anschließende Temperierblock sind rotationssymmetrisch und sie bestehen aus Kupfer, denn Kupfer hat eine hohe Wärme- und Temperaturleitfähigkeit [15]. Dadurch wird eine in radialer Richtung homogene Temperaturverteilung ermöglicht. In den Temperierblock oben und den Temperierblock unten ist jeweils ein Kanal integriert, durch den das Temperiermedium aus dem Badthermostaten gepumpt wird. Außerdem ist jeweils eine elektrische Heizung eingearbeitet, um einen Temperaturgradienten einzuprägen. Der Aufbau ist so konzipiert, dass die obere Temperiereinheit, bestehend aus Temperierblock

und Ausgleichsblock durch eine Verfahrereinrichtung abgehoben werden kann. Die Verfahrereinrichtung wird durch das Handrad angetrieben und greift unter die Ringschelle, die den Ausgleichsblock klemmt. Um die Anpresskraft auf den WSS zu erhöhen, können auf die obere Temperiereinheit zusätzlich Gewichte aufgelegt werden. Die gesamte obere, wie auch die untere Temperiereinheit sind von einer Isolationschicht umschlossen.

Thermisches Ersatzschaltbild

Zur Beschreibung der Wärmeleitvorgänge in der Kalibriereinrichtung und der Erstellung eines Berechnungsmodells wird die elektro-thermische Analogie angewandt. Die Betrachtung bezieht sich auf die beiden Ausgleichsblöcke sowie deren thermische Kopplung zueinander.

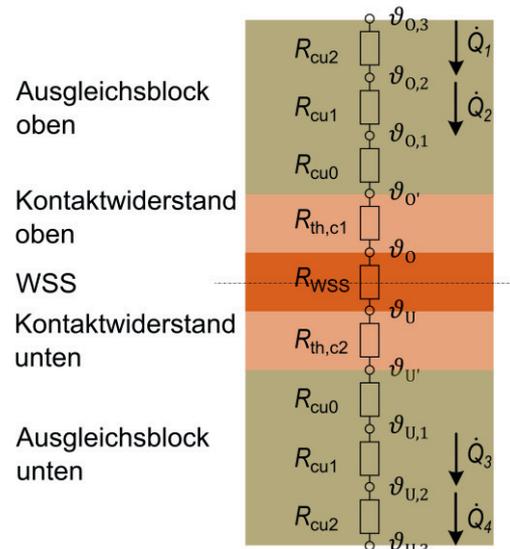


Abbildung 3: Thermisches Ersatzschaltbild für die Ausgleichsblöcke und den WSS

Das thermische Ersatzschaltbild für den Fall der eindimensionalen Wärmeleitung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die

Annahme einer eindimensionalen Wärmeleitung gilt, solange der Wärmestrom \dot{Q} in axialer Richtung deutlich größer ist als der parasitäre Wärmestrom \dot{Q}_{par} , der radial im Ausgleichsblock, Prüfling und Kontaktwiderstand fließt und durch die Isolation abgeführt wird.

In dem Ersatzschaltbild sind die durch die Widerstandsthermometer gemessenen Temperaturen mit $\vartheta_{O,x}$ für die Temperaturen im oberen Ausgleichsblock und für die im unteren Ausgleichsblock mit $\vartheta_{U,x}$ gekennzeichnet. Die durch Extrapolation ermittelten Oberflächentemperaturen werden mit ϑ_O und ϑ_U bezeichnet. Da zwischen Ausgleichsblock und WSS jeweils ein Kontaktwiderstand ($R_{\text{th,C1}}, R_{\text{th,C2}}$) entsteht [16], stellt sich auf der Oberfläche des Wärmestromsensors eine andere Oberflächentemperatur ϑ_0 und ϑ_U ein.

Die Ausgleichsblöcke werden jeweils in Scheiben unterteilt, die voneinander durch die Temperatursensstellen abgegrenzt werden, modelliert werden diese Scheiben als thermische Widerstände R_{Cu} auf Basis der Wärmeleitung. Der Kontaktwiderstand, wie auch der WSS R_{WSS} werden ebenfalls durch thermische Widerstände im Modell abgebildet. Für die Berechnung der Kontaktwiderstände muss der Wärmestrom berechnet werden, dies erfolgt durch die gemessene Temperaturdifferenz $\vartheta_{O,2} - \vartheta_{O,1}$ und den bekannten thermischen Widerstand R_{Cu1} nach Gleichung (2). Der Wärmestrom, der durch den Kontaktwiderstand und den WSS fließt wird aus dem Mittelwert von \dot{Q}_2 und \dot{Q}_3 gebildet. Zur Bewertung der durchgeführten Messungen wird der Ersatzwiderstand R_{ers} eingeführt, der nach Gleichung (3) berechnet wird.

$$R_{\text{ers}} = R_{\text{th,C1}} + R_{\text{th,C2}} + R_{\text{WSS}} \quad (3)$$

Messtechnische Untersuchungen

Untersuchte Proben

Zur Validierung des Prüfstands wurden zunächst Materialproben verwendet, die ähnliche Material- und Oberflächeneigenschaften wie die Gapfiller aufweisen.

So ist garantiert, dass eine homogene Probenschicht eingebracht wird und sich somit auch über die gesamte Prüflfläche gleiche Bedingungen für den Kontaktwiderstand einstellen. Als Proben wurden ein 3 Zoll Siliziumwafer ($\lambda = 75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, [17]) und eine PTFE-Scheibe verwendet, die physikalischen und geometrischen Eigenschaften sind in der Tabelle 1 festgehalten.

Tabelle 1: Untersuchte Proben und deren Eigenschaften

Material	Wärmeleitfähigkeit ($\vartheta = 0^\circ\text{C}$) λ in $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	Dicke l in mm	Thermischer Widerstand R_{th} in $\frac{\text{mK}}{\text{W}}$
Siliziumwafer	75	0,37	1,1
PTFE	0,25	0,2	164,7

Voruntersuchung zur Temperaturstabilität

Für die Kalibriermessungen ist es wichtig, dass sich die Oberflächentemperaturen und damit auch die resultierenden Temperaturdifferenzen definiert, stabil und reproduzierbar einstellen lassen.

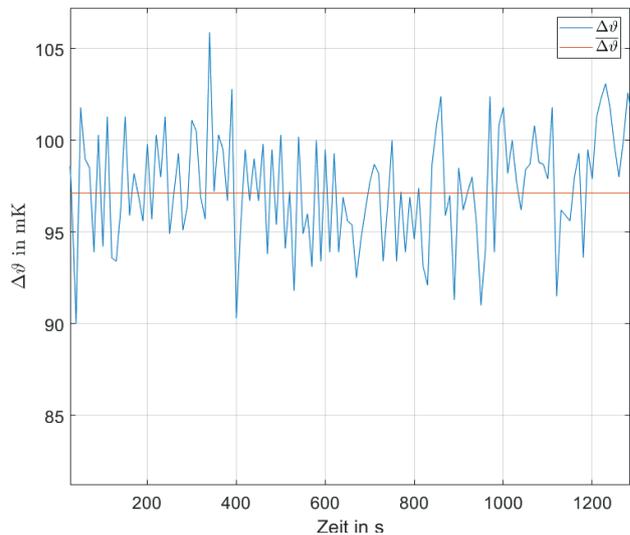


Abbildung 4: Eingestellte Temperaturdifferenz zwischen den Prüfflächen über der Zeit, bei einer Bezugstemperatur von 0°C

In der Abbildung 4 ist blau der Verlauf der eingestellten Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = \vartheta_O - \vartheta_U$, und rot der daraus gebildete Mittelwert über der Zeit dargestellt. Die Temperaturdifferenz ist sehr stabil, die doppelte Standardabweichung beträgt für den dargestellten Zeitraum von 1200 s lediglich 6 mK. Verglichen mit dem Aufbau von Hohmann [13], der in einem Zeitintervall von 300 s Schwankungen von 50 mK spezifiziert, wurde die Stabilität der Temperaturdifferenz deutlich gesteigert. Für die Auswertung einer Messung werden, nach Erreichen des statischen Zustands, über ein Zeitintervall von 600 s alle Messwerte integriert.

Untersuchungen zum Kontaktwiderstand und der Reproduzierbarkeit der Messungen

Um belastbare Aussagen zu Messergebnissen treffen zu können, ist es wichtig, dass die Messungen reproduzierbar sind. Zur Bewertung der Reproduzierbarkeit des Prüfstands wird der Ersatzwiderstand R_{ers} herangezogen, der nach Gleichung (3) gebildet wird. Die Bezugstemperatur beträgt 0°C und der Temperaturgradient wird durch einen Wärmeeintrag in der oberen Temperatureinheit von 162 W eingeprägt. Unter der Annahme, dass immer dieselbe Probe bei konstanter Temperatur vermessen wird, dürfte sich der thermische Widerstand R_{WSS} nicht ändern. Somit ist eine Änderung des Ersatzwiderstands auf eine Änderung des Kontaktwiderstands $R_{\text{th,C}}$ zurückzuführen und die Reproduzierbarkeit der Messungen hängt maßgeblich von der Reproduzierbarkeit des Kontaktwiderstands ab. Der Kontaktwiderstand ist von vielen Einflussfaktoren abhängig, so wird dieser durch die Oberflächenrauheit der Kontaktflächen, die Materialpaarung und die Flächenpressung in der Kontaktschicht bestimmt [4, 5].

Für die Untersuchungen werden mehrere Wiederholbarkeitsmessungen durchgeführt. Dazu wird die jeweilige Probe im Aufbau appliziert und anschließend mit dem Temperaturgradienten, der durch den Eintrag der 162 W Heizleistung entsteht, beaufschlagt. Nachdem die Messergebnisse abgefragt wurden, wird kein Temperaturgradient mehr eingepreßt, dies wird 3-mal wiederholt, sodass drei Messungen durchgeführt werden können. Um die Reproduzierbarkeit zu untersuchen, wird die Probe ausgebaut, gereinigt und neu appliziert.

Auch das Kontaktmedium beeinflusst die Reproduzierbarkeit des Kontaktwiderstands, so wurden der Einsatz von Luft, Silikonfett und Silikonöl untersucht. Für die Messung mit der PTFE-Probe und Luft als Kontaktmedium ist der Kontaktwiderstand $2 \cdot R_{th,C} = 301 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$ doppelt so groß wie der zu messende Probenwiderstand $R_{WSS} = 164,7 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$. Somit fällt der größte Teil des eingestellten Temperaturgradienten ($\vartheta_O - \vartheta_U = 6,8 \text{ K}$) über dem Kontaktwiderstand ab und nur $\vartheta_O - \vartheta_U = 2,4 \text{ K}$ über der eigentlichen Probe/WSS. Aus diesem Grund ist Luft als Kontaktmedium für diese Prüfeinrichtung ungeeignet. Silikonfett weist zwar eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, [18]) als Luft ($\lambda = 0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, [15]) auf, jedoch ergaben die Messungen in Kombination mit der PTFE-Probe, dass diese nicht so gut reproduzierbar sind. Bei der Applikation bildeten sich Lufteinschlüsse im Kontaktwiderstand, die sich auch durch ein Erhöhen der Flächenpressung im Kontaktwiderstand nicht eliminieren ließen.

Außerdem wurden die Silizium- und PTFE-Probe jeweils mit einem Silikonöl vermessen, dessen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, [19]) mit der des Silikonfetts vergleichbar ist. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 2 dargestellt. Ein Zeileneintrag wird aus dem Mittelwert dreier Wiederholungsmessungen gebildet. Aus ersten Messungen ging hervor, dass es sich positiv auf die Reproduzierbarkeit auswirkt, wenn ein Zusatzgewicht (7,5 kg) aufgelegt wird, deshalb wurden alle Messungen mit diesem Zusatzgewicht durchgeführt. Die angegebene erweiterte Unsicherheit $U(R_{ers})$ für $k=2$ wurde durch die Methode der Fehlerfortpflanzung nach Gauß berechnet, wobei für die Unsicherheit der Temperaturmessung die Standardabweichung der Temperaturmesswerte angesetzt wurde.

Tabelle 2: Thermischer Widerstand für die Messung mit Silikonöl

Material	R_{ers} in $\frac{\text{mK}}{\text{W}}$	$U(R_{ers})$ in $\frac{\text{mK}}{\text{W}}$	$R_{th,C1} + R_{th,C2}$ in $\frac{\text{mK}}{\text{W}}$
PTFE	180,9	8,7	16,2
PTFE	176,3	6,0	11,5
PTFE	177,9	6,9	13,2
Siliziumwafer	61,6	4,5	60,5
Siliziumwafer	65,2	4,5	64,1
Siliziumwafer	67,6	4,5	66,5

Die Reproduzierbarkeit mit dem Kontaktmedium Silikonöl ist als sehr gut zu bewerten und kann mit Abweichungen

von $2,4 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$ für die PTFE-Probe und $6,0 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$ für die Siliziumprobe beziffert werden.

Auffällig ist, dass der Kontaktwiderstand bei der Vermessung der Siliziumprobe ca. 6-mal größer ist als der Kontaktwiderstand bei der Vermessung der PTFE-Probe. Dies ist mit der Materialpaarung zu begründen, denn Silizium hat eine höhere Härte als PTFE, wodurch sich Rauigkeitsspitzen der Prüfoberfläche leichter in das PTFE als in das Silizium eindrücken lassen. Zum Kontaktwiderstand können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Die Flächenpressung in der Kontaktschicht hat einen Einfluss auf den thermischen Kontaktwiderstand
- Der Kontaktwiderstand ist reproduzierbar, wenn eine homogene Kontaktschicht bereitgestellt werden kann (Kontaktmedien: Luft und Silikonöl)
- Der Kontaktwiderstand ist von der Materialpaarung abhängig, vgl. Messung Silizium- und PTFE-Probe

Gültigkeitsbereich des eindimensionalen Wärmetransports

Das abgeleitete Ersatzschaltbild und die Auswertung der Messungen in Bezug auf den Ersatzwiderstand wurden unter der Annahme eines eindimensionalen Wärmetransports im Bereich der Ausgleichsblöcke, Kontaktwiderstände und Probe/WSS durchgeführt. Dies ist eine Annahme, die nur zulässig ist, solange der axiale Wärmestrom \dot{Q} deutlich größer ist als der parasitäre Wärmestrom \dot{Q}_{par} . Um den Gültigkeitsbereich dieser Annahme zu untersuchen, wurden Messungen mit unterschiedlich großen Wärmeströmen durchgeführt.

Der parasitäre Wärmestrom wird größer, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur und der Kalibriertemperatur ist. Deshalb wurden die Randbereiche des Einsatztemperaturbereiches $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ und $60 \text{ }^\circ\text{C}$ untersucht. Außerdem wurden Messungen mit unterschiedlichen Temperaturgradienten bzw. Wärmeströmen bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$ und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 5 zeigen den Verlauf des Ersatzwiderstands über dem Temperaturgradienten für verschiedene Kalibriertemperaturen. Der Ersatzwiderstand sollte bei konstanter Temperatur einen konstanten Wert annehmen. In der Abbildung 5 ist der Ersatzwiderstand für Temperaturgradienten $|\Delta\vartheta| > 500 \text{ mK}$ konstant, für kleinere Temperaturgradienten ändert sich der Ersatzwiderstand, wobei die Änderung für Temperaturgradienten $|\Delta\vartheta| < 100 \text{ mK}$ signifikant ist. Die Änderung des Ersatzwiderstands ist auf die Berechnungsmethode des Ersatzwiderstands zurückzuführen, zum einen ist die Temperaturmessung für kleine Temperaturgradienten im Ausgleichsblock stark unsicherheitsbehaftet, zum anderen ist das verwendete Berechnungsmodell der eindimensionalen Wärmeleitung nicht mehr zulässig. So beträgt der berechnete parasitäre Wärmestrom bei einer Kalibriertemperatur von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $\dot{Q}_{par} = 0,1 \text{ W}$. Im Gegensatz dazu steht bei einem Temperaturgradienten von $|\Delta\vartheta| = 100 \text{ mK}$ ein axialer Wärmestrom von $\dot{Q} = 0,9 \text{ W}$ und bei $|\Delta\vartheta| = 500 \text{ mK}$ ein axialer

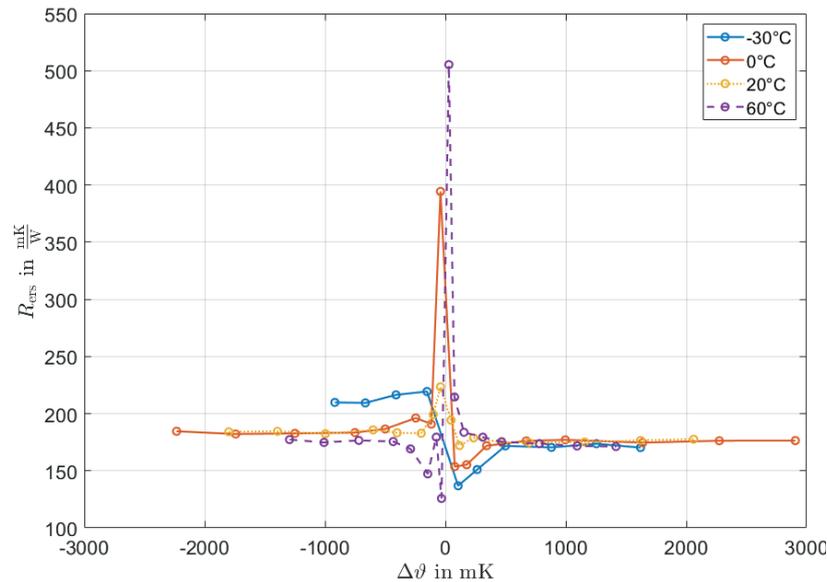


Abbildung 5: Untersuchungen zum eindimensionalen Wärmetransport

Wärmestrom von $\dot{Q} = 3,2 \text{ W}$. Dieser Vergleich zeigt, dass bei einem geringen Temperaturgradienten von $|\Delta\theta| = 100 \text{ mK}$ der parasitäre Wärmestrom nicht mehr zu vernachlässigen ist.

Aus der Untersuchung ist auch zu entnehmen, dass es eine systematische Abweichung zwischen dem berechneten Ersatzwiderstand für positive und negative Temperaturgradienten gibt. Für die Messung bei der Kalibriertemperatur von 0 °C ist der Ersatzwiderstand für positive Temperaturgradienten $R_{\text{ers},0\text{°C}} = 176 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$ und für negative Temperaturgradienten $R_{\text{ers},0\text{°C}} = 184 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1}$. Diese Abweichung wird gegenwärtig näher untersucht.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Kalibriereinrichtung für WSS aufgebaut und untersucht. Das Funktionsprinzip zweier temperierter Oberflächen ermöglicht die präzise Einstellung einer Temperaturdifferenz in einem Temperaturbereich von -30 °C bis 60 °C . Die Temperaturdifferenz ist dabei zeitlich sehr stabil einstellbar. Im Rahmen der Validierung des Prüfstands wurden auch umfassende Untersuchungen zum Kontaktwiderstand und der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse angestellt. Dabei wurde eine Applikationsmethodik entwickelt, die reproduzierbare und geringe Kontaktwiderstände ermöglicht. Für die Berechnung der Größen thermischer Widerstand und Wärmestrom wurde ein Berechnungsmodell erstellt, dessen Gültigkeitsbereich ermittelt wurde. So ist das Modell für Temperaturdifferenzen $|\Delta\theta| > 100 \text{ mK}$ zulässig. Mit dem Prüfstand können Wärmestromsensoren unter Einsatzbedingungen, wie sie in Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge vorkommen, kalibriert werden.

Derzeit wird die Kalibrierung kommerzieller Wärmestromsensoren untersucht. Zudem wird eine aktive Isolationsschicht für den Aufbau entwickelt, um die parasitären Wärmeströme zu verringern.

Literatur

- [1] BARTZ, F., et al.: Vorstellung des Konzepts eines keramischen Wärmestromsensors (2022).
- [2] DESER, S., et al.: Effizientes Thermomanagement bei Hochvoltbatterien. *ATZelektronik*, Band 15 (2020) Heft 4, S. 50–55.
- [3] SAPOZHNIKOV, S.Z.; MITYAKOV, V.Y.; MITYAKOV, A.V. (Hrsg.): *Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement*. Cham: Springer, 2020.
- [4] AUGUSTIN, S.; SCHALLES, M.: Neuerscheinung der VDI-Richtlinie 3520 „Oberflächentemperaturmessung mit elektrischen Berührungsthermometern“ – Inhalte und Hintergründe der Erarbeitung (2022), S. 34–38.
- [5] *Entwurf VDI/VDE Richtlinie 3520: „Oberflächentemperaturmessung mit Berührungsthermometern“*. VDI-Verlag GmbH, 2021.
- [6] BÖCKH, P.; WETZEL, T.: *Wärmeübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [7] CHILDS, P.R.; GREENWOOD, J.R.; LONG, C.A.: Heat flux measurement techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Band 213 (1999) Heft 7, S. 655–677.
- [8] HOHMANN, M.: *Realisierung eines Blockkalibrators mit Wärmestromsensoren und integrierten Fixpunktzellen*. Dissertation TU Ilmenau, Ilmenau.
- [9] BERNHARD, F.: *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [10] ARPINO, F., et al.: Design of a Calibration System for Heat Flux Meters. *International Journal of Thermophysics*, Band 32 (2011) 11–12, S. 2727–2734.

- [11] AKOSHIMA, M.: Development of an apparatus for practical calibration of heat flux sensors. *Measurement: Sensors*, Band 18 (2021), S. 100343.
- [12] RIZZO, G.; CHRISTEN, R.; STÖCK, M.: Calibration methodology for contact heat flux sensors with enhanced accuracy. *Measurement Science and Technology*, Band 32 (2021) Heft 4, S. 45003.
- [13] HOHMANN, M.; SCHALLES, M.; FRÖHLICH, T.: Kalibrierung von Wärmestromsensoren zur Detektion von kleinen Wärmeströmen. *tm - Technisches Messen*, Band 83 (2016) 7-8, S. 393–401.
- [14] MARIN, S., et al. (Hrsg.): *Kalibrierenrichtung für Wärmestromsensoren. Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung 10. – 11. Mai 2022 in Nürnberg*. Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GmbH, 2022.
- [15] SPRINGER-VERLAG GMBH: *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [16] HANNOSCHÖCK, N.: *Wärmeleitung und -transport*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [17] NETZSCH: *Silicium-Wafer — Thermophysikalische Eigenschaften*, 2022. <https://analyzing-testing.netzsch.com/de/applikationen/photovoltaik/silicium-wafer-thermophysikalische-eigenschaften> (abgerufen am 27.10.2022).
- [18] RS-ONLINE: *Datenblatt RS Pro-Silikonfett*, 2022. <https://docs.rs-online.com/c757/0900766b816dedac.pdf>.
- [19] WACKER-CHEMIE GMBH: *Wackersilikonöle AK*, 2022. <https://www.hellermannntyton.at/binaries/content/assets/downloads/at/datenblatter/01-wacker-silikone/siliconefluidsakde.pdf>.