

# Kalibrierenrichtung für Wärmestromsensoren

## Calibration Bench for Heat Flux Sensors

Dr.-Ing. Sebastian Marin<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Silke Augustin<sup>1</sup>, B. Sc. Joseph Beerel<sup>1</sup>, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich<sup>1</sup>  
M.Sc. Frederik Bartz<sup>2</sup>, Dipl.-Ing. Stephan Gehrmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, Sebastian.Marin@tu-ilmenau.de

<sup>2</sup>Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Messtechnik Automatisierungstechnik, Weissach, Deutschland

### Kurzfassung

Wärmestromsensoren zur Nutzung in der Elektromobilität werden im Temperaturbereich von  $-30\text{ °C}$  bis  $60\text{ °C}$  eingesetzt. Eine Einrichtung für die Kalibrierung solcher Sensoren wird in diesem Beitrag vorgestellt. Der für die Kalibrierung notwendige Temperaturgradient wird über eine erprobte Extrapolationsmethode der Oberflächentemperatur zweier metallischer Prüfkörper zur Verfügung gestellt. Dies setzt einen eindimensionalen Wärmestrom voraus. Die Kalibriereinrichtung wurde nach thermischen FEM-Simulationen u. a. für die Einstellung von geringen Temperaturgradienten optimal ausgelegt. Sowohl der eindimensionale Wärmestrom als auch die Einstellung von geringen Temperaturgradienten wurden messtechnisch bestätigt und werden in diesem Beitrag dargestellt.

### Abstract

Heat flux sensors for electromobility will be used in the temperature range from  $-30\text{ °C}$  to  $60\text{ °C}$ . A calibration bench for such sensors is presented in this paper. The temperature gradient needed for the calibration is provided by the calibration bench using a known method by extrapolation of the surface temperature of two metal normalization blocks. This requires a one-dimensional heat transport. The calibration bench was designed for setting low temperature gradients. For this, optimization with a thermal FEM simulation model were carried out. As well the one-dimensional heat transport as the possibility to setting low temperature gradients have been measure. This will be even introduced in this article..

## 1 Einführung

Der Wärmestrom kann als die Energie  $\dot{q}$  pro Querschnittsfläche  $A$  senkrecht zur Flussrichtung, die aufgrund einer Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  hervorgerufen wird, definiert werden. Die Energie und dementsprechend der Wärmestrom können nicht direkt gemessen werden, sondern es wird gezielt die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  ermittelt [1]. Für den Fall, dass die Wärmeübertragung über Wärmeleitung stattfindet, wird der Wärmestrom durch die Fouriersche Differentialgleichung (Gleichung (1) für den eindimensionalen Wärmestrom) beschrieben [2]. Die Messung der Temperaturdifferenz zwischen zwei Oberflächen kann mit Wärmestromsensoren (WSS) erfolgen. Dann entspricht  $d$  dem Abstand zwischen den Oberflächen  $A$  bzw. der Dicke des WSS und  $\lambda$  seiner Wärmeleitfähigkeit.

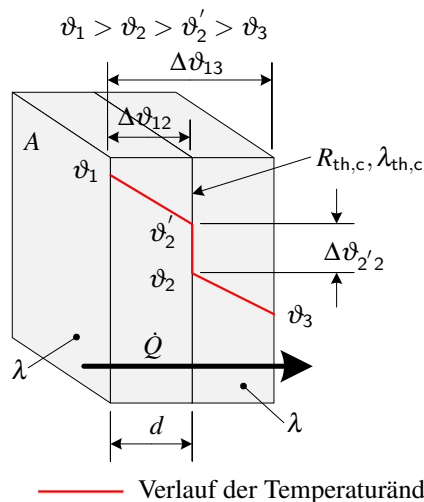
$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{d} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta\vartheta}{d} \quad (1)$$

Der Einsatz von WSS für die Messung von Temperaturdifferenzen hat sich vor allem in der Bauphysik, z. B. zur Überwachung des Energieverlustes von Gebäuden [3], [4], in der Textilindustrie, u. a. zur Untersuchung von Stoffen für Sport- oder Schutzkleidung [5] und in der Medizin, z. B. zur Intraoperativen Überwachung der Körpertemperatur mit einer nicht invasiven Methode während einer Anästhesie [6], [7], bewährt. Der Vorteil von WSS für die

Messung geringer Temperaturdifferenzen gegenüber anderen Messverfahren besteht darin, dass der Wärmestrom als Vektor eine Richtung impliziert und deswegen die Realisierung einer vorausschauenden Regelung erlaubt [8]. Darüber hinaus kann die Drift eines einzelnen Sensors besser nachvollzogen werden, als wenn zwei oder mehrere einzelne Temperaturmessstellen verwendet werden [9].

Ein neues Einsatzgebiet für WSS wird durch die zunehmende Bedeutung der Elektromobilität eröffnet [10] [11]. Die Messung von Temperaturdifferenzen zwischen ausgedehnten Flächen wie der Hochvoltbatterie und dem Kühlsystem kann mittels geeigneter Wärmestromsensoren realisiert werden. Das geringe thermische Arbeitsfenster der Hochvoltbatterie verlangt eine große Empfindlichkeit und eine kleine Messunsicherheit dieser Sensoren im gesamten Einsatztemperaturbereich. Aus diesem Grund ist die Bestimmung der Kennlinie des WSS durch eine Kalibrierung im selben Temperaturbereich unabdingbar.

Die Kennlinie stellt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Ausgangssignal des WSS und dem Wärmestrom bzw. der Temperaturdifferenz dar. Die Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für die Kalibrierung von WSS im Temperaturbereich von  $-30\text{ °C}$  bis  $60\text{ °C}$  wird in diesem Beitrag vorgestellt. Die Anforderung für die zu entwickelnde Kalibriereinrichtung war aufgrund der angestrebten Sensorempfindlichkeit die Möglichkeit zur Einstellung geringer Temperaturgradienten an den Oberflä-



**Abbildung 1** Schematische Darstellung des Wärmetransports über Wärmeleitung unter Berücksichtigung des thermischen Kontaktwiderstands  $R_{th,c}$  (angelehnt an [2] und [13]).

chen des WSS.

Eine der größten Herausforderungen ist neben der Bereitstellung von homogenen Temperaturen an den Oberflächen des WSS die Ermittlung bzw. die Möglichkeit zur Korrektur der thermischen Kontaktwiderstände an den Sensoroberflächen.

Eine nicht genormte aber weite Klassifizierung von Sensoren zur Ermittlung von Wärmeströmen wurde im Jahr 1960 von Gerashchenko vorgeschlagen. Die hier vorgestellte Kalibriereinrichtung wurde ausschließlich für WSS nach der „Gradienten Methode“, wobei die Sensordicke  $d$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  aus der Gleichung (1) bekannt sind [8], entwickelt.

## 2 Kalibriereinrichtung

Wärmestromsensoren nach der „Gradienten Methode“ werden i. d. R. nach der sogenannten absoluten Methode kalibriert. Dabei wird der WSS auf eine Isolationsplatte (Senke) positioniert. Die andere Oberfläche wird über eine andere Platte mittels eines elektrischen Heizers [1], [8] oder über Konvektion [10] einer bekannten Wärme (-quelle) eingepreßt. Eine Variante, bei der die Senke über freie Konvektion realisiert wird, wird in [12] beschrieben. Die Probleme dieser Kalibrationsmethode bestehen darin, die Wärmeleitfähigkeit der benutzten Platten und den thermischen Kontaktwiderstand ( $R_{th,c}$  in Abbildung 1) zu den Oberflächen des Wärmestromsensors zu kennen. Durch den thermischen Kontaktwiderstand erfolgt eine Verringerung der auf der Oberfläche des Wärmestromsensors anliegenden Temperatur ( $\Delta v_{2/2}$  in Abbildung 1).

Hohmann [14] stellte eine Kalibriereinrichtung für Wärmestromsensoren im Temperaturbereich von 50 °C bis 200 °C nach einer für Oberflächentastthermometer entwickelten Kalibriereinrichtung [15] vor. Dabei wird ein passiver zylindrischer metallischer Prüfkörper auf eine Referenzplatte mit höher Wärmeleitfähigkeit und Oberflächen-

güte platziert. Über die Referenzplatte wird die Temperatur des Prüfkörpers mit einem elektrischen Heizer geregelt. Drei bis zur Mitte des Prüfkörpers an unterschiedlichen axialen Höhen eingesteckten Thermometer werden benutzt, um den axialen Temperaturgradienten des Prüfkörpers zu messen und daraus seine Oberflächentemperatur durch Extrapolation zu ermitteln. Es wird von eindimensionalem Wärmetransport in axialer Richtung ausgegangen. Nach diesem Prinzip und nach Optimierung eines Modells mittels der Methoden der Finiten Elementen (FEM) wurde die hier vorgestellte Kalibriereinrichtung konzipiert.

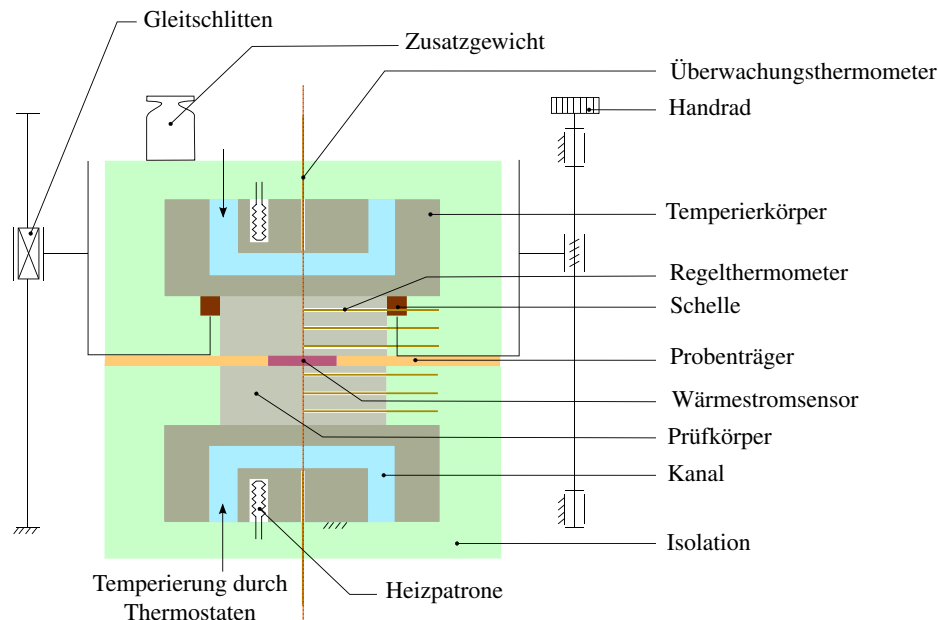
### 2.1 FEM-Simulationen

Der Temperierkörper hat einen Kanal, durch den eine Temperierflüssigkeit geleitet wird. Diese wird benutzt, um die Temperatur des Prüfkörpers grob einzustellen. Eine feinere Temperatureinstellung erfolgt über drei um 120° voneinander gedrehte, im Temperierblock eingesteckte elektrische Heizpatronen. Ein unterer und ein oberer Prüfkörper erlauben die Einstellung eines Temperaturgradienten zwischen den Oberflächen des zu kalibrierenden WSS. Der WSS wird für die Kalibrierung in einem Probenträger zwischen den Prüfkörpern abgelegt. Der Temperier- und der Prüfkörper sind von der Umgebung mittels Isolationsmaterial thermisch entkoppelt. Kalibrierungen von WSS im Bereich von –30 °C bis 60 °C sollten mit der Einrichtung möglich sein.

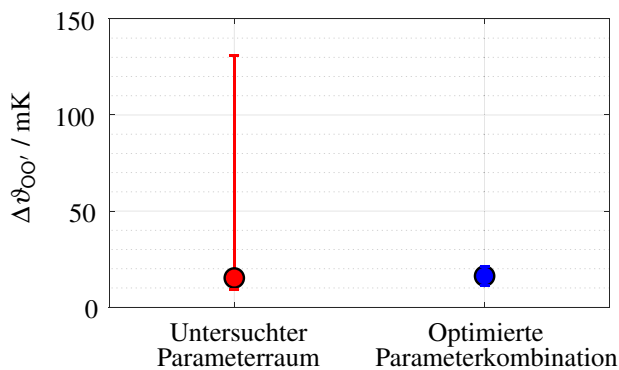
Die approximierte Geometrie der Kalibriereinrichtung für Wärmestromsensoren (siehe Abbildung 2) wurde parametrisch in der Software COMSOL [16] erstellt. Dabei wurden die Durchmesser und Höhen der Temperier- und der Prüfkörper sowie des Kanals für die Temperierflüssigkeit und außerdem die Eintauchtiefe der Heizpatronen und die Breite des Isolationsmaterials als geometrische Parameter definiert. Die Wärmeleitfähigkeiten des Temperier- und des Prüfkörpers sowie die des Probenträgers wurden als Stoffparameter festgelegt. Im Rahmen einer Parametervariation und einer anschließenden Optimierung sollte die Kombination gefunden werden, die die Einstellung des geringsten Temperaturgradienten zwischen den Oberflächen der Prüfkörpern  $\Delta v_{OO'}$  (siehe Abbildung 3) bzw. des Wärmestromsensors  $\Delta v_{WSS}$  über den gesamten Einsatztemperaturbereich von –30 °C bis 60 °C erlaubt. Dabei sollte außerdem eine homogene Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Prüfkörper erreicht werden. Die Parametervariation bzw. der Parameterraum wurden nach der systematischen Sampling-Methode ALHS [17] mit der Software optiSLang [18] generiert und ausgewertet. Entsprechend des optimierten FEM-Modells sollte es mit der Kalibriereinrichtung möglich sein, Temperaturgradienten von 10 mK bis 20 mK einzustellen.

### 2.2 Aufbau

Sowohl die Temperier- als auch die Prüfkörper wurden nach der Optimierung aus Kupfer hergestellt. Für eine hohe Oberflächengüte wurden die Oberflächen der Körper, die beim Einsatz in Kontakt kommen, mit einer Schleifpaste geschliffen. Die Körper wurden zum Korrosionsschutz



**Abbildung 2** Prinzipskizze der Kalibriereinrichtung für Wärmestromsensoren.



**Abbildung 3** Vergleich des optimierten geringsten Temperaturgradienten zum gesamten untersuchten Parameterraum im Temperaturbereich von  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Marker zeigen den Median der jeweiligen Verteilungen.

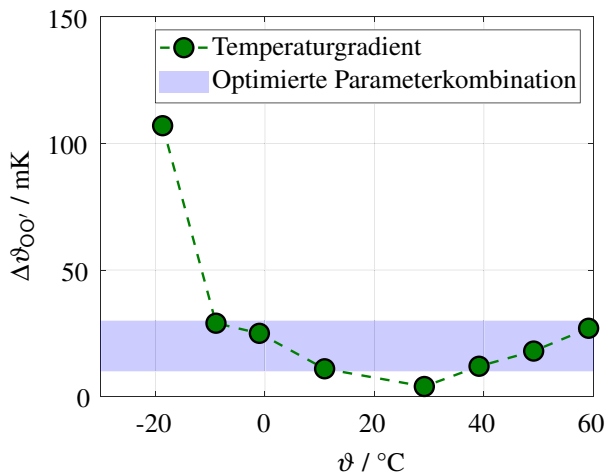
[19] mit einer Nickelschicht mit einer Dicke von ca.  $30\text{ }\mu\text{m}$  beschichtet. Diese Schicht sollte auch helfen, die Qualität der Oberflächen zu erhöhen. Die Rauheit der Oberfläche der Prüfkörper wurde mit einem transportablen Rauheitsmessgerät Surftest SJ-210 von Mitutoyo [20] an 6 verschiedenen Stellen gemessen. Der Mittenrauwert  $R_a$  [21] liegt im Schnitt bei  $0,4\text{ }\mu\text{m}$ , was der mechanische Bearbeitung und dem Schleifen entspricht. Die Rautiefe  $R_z$  liegt im Schnitt bei  $3\text{ }\mu\text{m}$ .

Der obere Prüfkörper wird durch eine Schelle aus Edelstahl auf dem Isolationsmaterial gehalten (siehe Abbildung 2). Edelstahl ( $\lambda_{\text{Edelstahl}} = 15\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$  [22]) hat bezüglich Kupfer ( $\lambda_{\text{Kupfer}} \approx 400\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$  [23]) eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und sollte deshalb die Temperaturverteilung im oberen Prüfkörper wenig beeinflussen. Der Probenträger wird aus einer ausgestanzten Matte mit einer ähnlich großen Wärmeleitfähigkeit wie der WSS hergestellt. Bei allen Kalibriereinrichtungen wird versucht, den thermischen Kontaktwiderstand durch Verwen-

dung einer Wärmeleitpaste oder einer Wärmeleitfolie zur Unterdrückung von Lufteinschlüssen zu reduzieren. Bei der hier vorgestellten Einrichtung wird durch den mechanischen Aufbau mittels Spindelantrieb mit Handrad und Gleitschlittenführung eine reproduzierbare Positionierung des oberen Prüfkörpers sowie die reproduzierbare Beeinflussung des thermischen Kontaktwiderstands  $R_{\text{th,c}}$  ermöglicht. Zusätzliche Maßnahmen sind die Verwendung einer gut wärmeleitenden Flüssigkeit zwischen den Prüfkörpern sowie Zusatzgewichte (siehe Abbildung 2).

In der Kalibriereinrichtung werden drei Widerstandsthermometer Pt100 mit  $\varnothing 1\text{ mm}$  in Vierleiterschaltung in den Prüfkörper für die Ermittlung bzw. Einstellung der Oberflächentemperatur durch Extrapolation und ein zusätzliches Widerstandsthermometer der gleichen Art im Temperierkörper zur Temperaturüberwachung eingebaut. Sowohl die Kalibriereinrichtungen für Oberflächentastthermometer [15] als auch die bestehende Kalibriereinrichtung für Wärmestromsensoren [14] nach dem Extrapolationsprinzip auf die Oberflächentemperatur des Prüfkörpers nutzen Thermoelemente aufgrund der punktuellen Temperaturmessung. Damit sollte die Messung des axialen Temperaturgradienten genau entlang der Mitte des Prüfkörpers erfolgen.

Eine Vorbetrachtung der relativen Messunsicherheit der Temperaturmessung für die zu entwickelnde Kalibriereinrichtung hat Vorteile der Benutzung von Widerstandsthermometern gezeigt. Der Einfluss der Positionierung aufgrund der integralen und nicht punktuellen Temperaturmessung der Widerstandsthermometer wird mit der Benutzung von Kupfer und seiner große Wärmeleitfähigkeit von ca.  $400\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$  [23] kompensiert. Als Messgerät der Kalibriereinrichtung wird ein Multimeter Keysight 34970A [24] mit einer 16-Kanal Multiplexer Einschubkarte Keysight 34902A verwendet. Daran werden die 6 Thermometer in den Prüfkörpern angeschlossen. Die Überwachungsthermometer werden mit Temperaturanzeigeein-



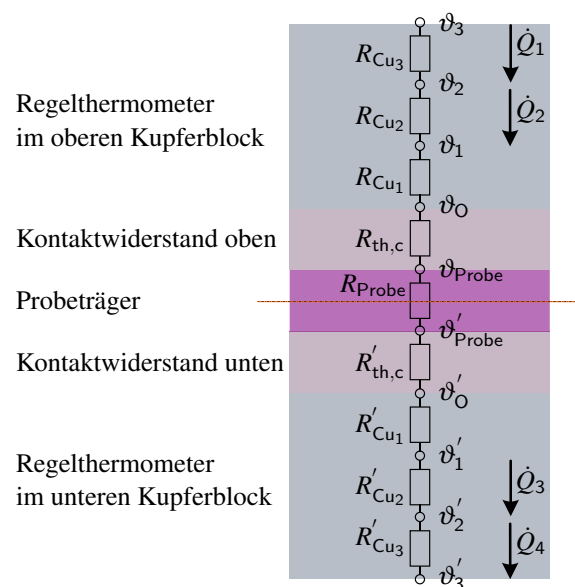
**Abbildung 4** Temperaturgradient der Prüfkörperoberflächen über den Einsatztemperaturbereich der Kalibriereinrichtung. Schattiert werden die Temperaturgradienten der optimierten Parameterkombination.

strumenten verbunden, die den Strom der Einrichtung bei Überhitzen oder Unterkühlen nach vordefinierten Grenztemperaturwerten ausschalten können.

### 3 Messtechnische Untersuchungen

Für die Messungen des kleinstmöglichen Temperaturgradienten ( $\Delta\vartheta_{00'} = \vartheta_0 - \vartheta_0'$  in Abbildung 5) über den Einsatztemperaturbereich der Kalibriereinrichtung wurde ein Probeträger aus PTFE mit Silikonöl als Kontaktmedium zu den Prüfkörpern und ohne ausgestanzten Platzhalter für den WSS verwendet. Aus den ermittelten extrapolierten Oberflächentemperaturen wurden die in der Abbildung 4 gezeigten Temperaturdifferenzen berechnet. Diese liegen zwischen ca.  $-10\text{ °C}$  bis  $60\text{ °C}$  im Bereich der Temperaturgradienten der optimierten Geometrie des FEM-Modells (siehe Abbildung 3). Damit konnten die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen bzgl. der verwendeten Geometrie und des Materials für den Temperier- und den Prüfkörper der Kalibriereinrichtung bestätigt werden. Unterhalb von  $-10\text{ °C}$  werden die Temperaturgradienten größer. Weitere Untersuchungen zur möglichen Wasser- bzw. Eisbildung an den Oberflächen der Prüfkörper und zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dauern noch an. Die Messunsicherheit wird bei den hier gezeigten Ergebnissen noch nicht betrachtet.

Eine erste Untersuchung zum eindimensionalen Wärmetransport in der Kalibriereinrichtung wurde nach einer Wärmebilanz entsprechend des Ersatzschaltbildes in Abbildung 5 gemacht. Bei einer Oberflächentemperatur  $\vartheta_0 \approx \vartheta_0' \approx 0\text{ °C}$  wurden die Wärmeströme  $\dot{Q}_1 = 260\text{ mW}$  und  $\dot{Q}_2 = 230\text{ mW}$  aus den gemessenen Temperaturen  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  und  $\vartheta_3$  im oberen Prüfkörper berechnet. Die Differenz  $\Delta\dot{Q}_{21} = 30\text{ mW}$  der beiden Wärmeströme entspricht die radialen Abgabe von Wärme an die Umgebung bzw. das Isolationsmaterial. Dieser Wert sagt aus, dass ca. 90 % der Wärme eindimensional in der axialen Richtung transportiert wird.



**Abbildung 5** Ersatzschaltbild der Kalibriereinrichtung mit eindimensionalem Wärmetransport in axialer Richtung.  $R_{Cu_x}$ : Ersatzwiderstände im Prüfkörper,  $R_{th,c}$ : thermischer Kontaktwiderstand,  $R_{Probe}$ : Ersatzwiderstand der Probe,  $\vartheta_x$ : gemessene Temperaturen mit den Regelthermometern,  $\vartheta_0$ : extrapolierte Oberflächentemperatur,  $\vartheta_{Probe}$ : Oberflächentemperatur der Probe,  $\dot{Q}_x$ : berechnete Wärmeströme aus den jeweiligen gemessenen Temperaturen.

tiert wird.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Kalibriereinrichtung für WSS nach einem bekannten Extrapolationsprinzip der Oberflächentemperatur eines Prüfkörpers wurde nach thermischen Optimierungen eines FEM-Modells entwickelt. Die Einrichtung wurde bereits gebaut und teilweise messtechnisch untersucht. WSS können im Temperaturbereich von  $-30\text{ °C}$  bis  $60\text{ °C}$  mit der Einrichtung kalibriert werden. Die Möglichkeit zur Einstellung geringer Temperaturgradienten an den Prüfkörperoberflächen war Ziel der Optimierung und dies wurde messtechnisch im Einsatztemperaturbereich bereits belegt. Es sind noch die Reproduzierbarkeit der Messungen sowie Messunsicherheiten der Kalibriereinrichtung zu untersuchen. Eine Auseinandersetzung mit der Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes bei der Benutzung von unterschiedlichen Kontaktmedien, Probeträgern und Zusatzgewichten sowie die Berechnung der radialen Wärmeverluste im gesamten Einsatztemperaturbereich werden gegenwärtig gemacht.

### 5 Literatur

- [1] Peter Childs. *Practical temperature measurement*. Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, May 2001.

- [2] Frank R. Incropera and David P. de Witt. *Fundamentos de Transferencia de Calor (Spanish Edition)*. Prentice Hall, México, 4<sup>th</sup> edition, 2000.
- [3] H. Trethowen. Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors. *Build. Environ.*, 21(1):41–56, 1986.
- [4] Mario Cucumo, Vittorio Ferraro, Dimitrios Kaliakatos, and Marilena Mele. On the distortion of thermal flux and of surface temperature induced by heat flux sensors positioned on the inner surface of buildings. *Energy Build.*, 158:677–683, 2018.
- [5] Teodor-Cezar Codau, Elena Onofrei, Gauthier Bedek, Daniel Dupont, and Cedric Cochrane. Embedded textile heat flow sensor characterization and application. *Sens. Actuators A Phys.*, 235:131–139, 2015.
- [6] Elena Morettini, Francesca Turchini, Lorenzo Tofani, Gianluca Villa, Zaccaria Ricci, and Stefano Romagnoli. Intraoperative core temperature monitoring: accuracy and precision of zero-heat flux heated controlled servo sensor compared with esophageal temperature during major surgery; the ESOSPOT study. *J. Clin. Monit. Comput.*, 34(5):1111–1119, 2020.
- [7] Sirkka-Liisa Lauronen, Maija-Liisa Kalliomäki, Jarkko Kalliovalkama, Antti Aho, Heini Huhtala, Arvi M Yli-Hankala, and Marja-Tellervo Mäkinen. Comparison of zero heat flux and double sensor thermometers during spinal anaesthesia: a prospective observational study. *J. Clin. Monit. Comput.*, 2022.
- [8] Sergey Z. Sapozhnikov, Vladimir Yu Mityakov, and Andrey V. Mityakov. *Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement*. Heat and Mass Transfer. Springer Nature, 1 edition, 2020.
- [9] Michael Hohmann, Sebastian Marin, Marc Schalles, and Thomas Fröhlich. Dry block calibrator with improved temperature field and integrated fixed-point cells. *Int. J. Thermophys.*, 38(2), 2017.
- [10] Clayton A. Pullins and Tom E. Diller. In situ high temperature heat flux sensor calibration. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 53(17-18):3429–3438, 2010.
- [11] Frederik Bartz, Stephan Gehrman, and Sebastian Marin. Messunsicherheitsbetrachtung für die kalibrierung von keramischen wärmestromsensoren. In *10. VDI-Fachtagung Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen - Prüfprozesse in der industriellen Praxis 2021 : der Weg zum sicheren Messen und Prüfen : Erfurt, 10. und 11. November 2021 / VDI VDE Mess- und Automatisierungstechnik*, Düsseldorf, 2021. VDI Verlag GmbH.
- [12] D. J. Rossouw. Point temperature measurements. In *Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques*, pages 169–190. Elsevier, 2016.
- [13] Peter Böckh and Thomas Wetzel. *Wärmeübertragung*. Springer, Wiesbaden, Germany, 7 edition, 2018.
- [14] Michael Hohmann, Marc Schalles, and Thomas Fröhlich. Kalibrierung von wärmestromsensoren zur detektion von kleinen wärmeströmen. *tm - Tech. Mess.*, 83(7-8):393–401, 2016.
- [15] Frank Bernhard, editor. *Handbuch der Technischen Temperaturmessung 2. Auflage (VDI-Buch)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [16] COMSOL Inc. Comsol multiphysics, 2022.
- [17] Matthias Voigt. *Probabilistische Simulation des strukturellen Verhaltens von Turbinenschaufeln*. PhD thesis, Universität Dresden, Dresden, 2009.
- [18] Dynardo GmbH. Methods for multidisciplinary optimization and robustness analysis, 2012.
- [19] Francois Cardarelli. *Materials handbook*. Springer, London, England, 2 edition, 2008.
- [20] Mitutoyo Deutschland GmbH. SurfTest sj-210, 2022.
- [21] DIN EN ISO 4287:2010-07. Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - benennungen, definitionen und kenngrößen der oberflächenbeschaffenheit, July 2010.
- [22] Deutsche Edelstahlwerke GmbH. Acidur 4541: Werkstoffdatenblatt X6CRNiTi18-10 1.4541, 2015.
- [23] Deutsches Kupferinstitut. Werkstoff-Datenblätter: Cu-ETP, 2005.
- [24] Keysight Technologies. *Keysight 34970A Data Acquisition/ Switch Unit Family - Technical Overview*, 2018.