

Vorstellung des Konzepts eines keramischen Wärmestromsensors

Presentation of the concept of a ceramic heat flux sensor

M. Sc., Frederik Bartz, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach, Deutschland, frederik.bartz1@porsche.de
 Dipl.-Ing., Stephan Gehrmann, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach, Deutschland, stephan.gehrmann@porsche.de
 Dipl.-Ing., Silke Augustin, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, silke.augustin@tu-ilmenau.de
 Dr.-Ing., Sebastian Marin, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, sebastian.marin@tu-ilmenau.de
 Dipl.-Ing., Carolin Lohrberg, Fraunhofer IKTS, Dresden, Deutschland, carolin.lohrberg@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung

Der vorliegende Konferenzbeitrag stellt das Konzept eines neuen keramischen Wärmestromsensors vor. Einleitend wird die Bedeutung für die Messtechnik im Fahrzeugentwicklungsprozess erläutert und warum die Messung der Wärmeströme mit geeigneten Sensoren einen wichtigen Beitrag in der zukünftigen thermischen Abstimmung darstellt. Nachfolgend wird das Grundkonzept des Wärmestromsensors vorgestellt, welcher auf einem keramischen Trägermaterial basiert. Des Weiteren wird auf die Auslegung des Wärmestromsensors eingegangen. Neben der Auslegung werden der Fertigungsprozess und die technischen Herausforderungen thematisiert. Abschließend liefert der Beitrag einen Ausblick in den weiteren Entwicklungsprozess des Wärmestromsensors.

Abstract

This conference paper presents the concept of a new ceramic heat flux sensor. By the way of introduction, the importance for the measurement technology in the automotive development process is explained and why the measurement of the heat flux density with suitable sensors represents an important contribution in the future thermal adjustment. In the following, the basic concept of the heat flux sensor is explained, which is based on a ceramic material. Furthermore, the design of the heat flux sensor will be discussed. In addition to the design, the manufacturing process and the technical challenges are presented. Finally, the article provides an overview of the further development process of the heat flux sensor.

1 Einführung

Der gegenwärtige und zukünftige Fahrzeugentwicklungsprozess unterliegt einem großen Wandel [1]. Konventionelle Antriebsstränge mit Verbrennungsmotoren stehen dem Einzug der Elektromobilität gegenüber. Für die Messtechnik ergeben sich dadurch neue Anwendungsfelder, denn durch das Thermomanagement der Hochvoltbatterien steigen die Anforderungen an die Temperaturmesstechnik. Grund hierfür sind die engen thermischen Arbeitsfenster der Hochvoltbatterien.

1.1 Bedeutung des Thermomanagements für Hochvoltbatterien

Im Wandel der Antriebstechnologie erfolgt gegenwärtig die Speicherung der Energie überwiegend in Hochvoltbatterien [2]. Durch das geringe thermische Arbeitsfenster und eine präzise Temperierung der Batteriezellen gewinnt das zugehörige Thermomanagement zunehmend an Bedeutung [3]. Nur durch ein optimales Temperaturfenster ist es möglich, eine gute Leistungsabgabe zu erzielen. Im Allgemeinen werden die einzelnen Batteriezellen zu Modulleinheiten zusammengefasst. Für die Konditionierung der Batteriemodule werden diese über die sogenannte Gap-Filler Schicht sowohl thermisch als auch mechanisch an das Kühlsystem angebunden, vgl. Bild 1. Der durch Wärmeleitung hervorgerufene Wärmetransport durch die Gap-Filler

Schicht, welche zwischen der Batterie und dem Kühlsystem liegt, ist dabei für die Entwicklung von besonderer Bedeutung. Grund hierfür ist der thermische Widerstand, welcher Einfluss auf die Kühlleistung nimmt. Um die Entwicklung und Auslegung mittels numerischer Berechnungen zu unterstützen, ergeben sich auch für die Temperaturmesstechnik neue Herausforderungen. Diese werden im folgenden Abschnitt erläutert.

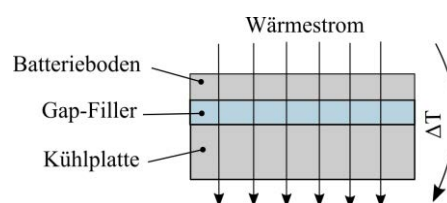


Bild 1 Wärmetransport in einem Batteriesystem

1.2 Anforderungen an die Temperaturmesstechnik

Für die Temperaturmesstechnik ergeben sich für die Versuche an Hochvoltbatterien neue Anforderungen. Neben der Ausführung als hochvoltsicheres Messelement, vgl. [4], sind für die Messungen weitere Bedingungen zu beachten. In der Entwicklung ergibt sich der Anspruch, die Temperaturdifferenz zwischen der Unterseite der Batterie und der Oberseite des Kühlsystems zu erfassen. In diesem Bereich sind, im Rahmen des Energiemanagements, Temperaturdifferenzen ($< 2 \text{ K}$) zu messen. Die Messung der

einzelnen Temperaturen mit entsprechenden Thermometern, wie zum Beispiel Thermoelementen oder Widerstandsthermometern, ist aufgrund der geometrischen Vorgaben innerhalb der Batterie umständlich und teilweise nicht realisierbar. Die Ursache ist der Verbau von zwei Temperatursensoren zur Erfassung der Differenz in der Hauptachse des Wärmestroms. Zusätzlich ergeben sich Probleme durch die hohen Messunsicherheiten der verbauten Thermoelemente. Gegenüber den klassischen Temperaturmessverfahren bietet sich für die Quantifizierung von Temperaturdifferenzen bzw. den proportionalen Wärmeströmen der Einsatz von Wärmestromsensoren an. Auf diese Weise kann der Informationsgehalt, welcher durch Thermometer nicht abgedeckt wird, erweitert werden. Kenntnisse über die auftretenden Wärmeströme bilden also eine weitere mögliche Zielgröße für die Entwicklung im Bereich des Thermomanagements.

2 Konzept - Wärmestromsensor

In den nachfolgenden Abschnitten wird das Konzept des Wärmestromsensors vorgestellt, welcher für Messungen im Bereich des Kühlsystems und der Hochvoltbatterie genutzt werden soll. Der Wärmestromsensor wird zusammen mit dem Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS) entwickelt. Das Fraunhofer IKTS bietet das Knowhow sowie die notwendigen Fertigungsprozesse an, um den Wärmestromsensor herzustellen. Parallel wird zusammen mit der TU Ilmenau an dem Sensorkonzept und einer geeigneten Kalibriereinrichtung geforscht [5]. Der Abschnitt 2.1 beschäftigt sich mit dem Messprinzip des Sensors. Des Weiteren wird auf die Herausforderungen bei der Umsetzung des genutzten Prinzips eingegangen. Der folgende Abschnitt 2.2 beschreibt den grundlegenden Aufbau des Wärmestromsensors. Ausgehend vom Grundaufbau wird in Kapitel 2.3 die Modellbildung erläutert. Diese ermöglicht es, den Sensor, hinsichtlich seiner geometrischen und thermophysikalischen Größen, mathematisch zu beschreiben.

2.1 Messprinzip

Für die Messung von Wärmeströmen bzw. für die Messung von Wärmestromdichten, sofern diese auf eine Fläche bezogen werden, existieren bereits zahlreiche Konzepte [6 - 10]. Den meisten Messprinzipien liegt dabei zugrunde, dass die abfallende Temperaturdifferenz gemessen wird, welche dem Wärmestrom proportional ist. Zur Erfassung der Temperaturdifferenz werden unterschiedliche Messanordnungen genutzt. Verschiedene Möglichkeiten ergeben sich durch die Anordnung von zwei Messwiderständen, vgl. [10], oder auch der Nutzung des Seebeck-Effekts, vgl. [7, 9]. Eine weitere Option wird durch die Nutzung des Spin-Seebeck Effekts aufgezeigt [8].

Das Konzept des vorgestellten Wärmestromsensors basiert auf dem Seebeck-Effekt. In diesem Fall werden, wie bei gängigen Thermoelementen auch, zwei unterschiedliche Metalle genutzt. Jedoch entfällt die für Thermoelemente

übliche Vergleichsstelle, weil die Temperaturdifferenz gemessen wird. Zur Steigerung der späteren Empfindlichkeit werden mehrere einzelne Thermopaare zu einer Thermokette zusammengeschaltet. Die Verbesserung der Empfindlichkeit resultiert aus der elektrischen Reihenschaltung der einzelnen Thermopaare. Im Pfad des Wärmestroms sind die einzelnen Messelemente parallel angeordnet, sodass diese alle der gleichen Temperaturdifferenz ausgesetzt sind.

Damit aus der gemessenen Temperaturdifferenz der Wärmestrom bestimmt werden kann, muss das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung für den geometrisch eindimensionalen Fall betrachtet werden [11].

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot \Delta T \rightarrow \dot{q} = \frac{\lambda}{l} \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 1})$$

Neben der über die Thermokette erfassten Temperaturdifferenz ΔT ist es notwendig, die geometrischen Parameter Fläche A und Länge l zu bestimmen. Zudem muss die mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_{ges} des Wärmestromsensors bekannt sein. Die Wärmeleitfähigkeit stellt dabei neben der Empfindlichkeit des Sensors einen Kernpunkt der Entwicklung dar. Für die Messung des Wärmestroms ist eine Anpassung der Wärmeleitfähigkeit an das Messobjekt notwendig, damit der Sensor die gleichen thermischen Eigenschaften wie die Gap-Filler Schicht besitzt. Bei Abweichungen der Wärmeleitfähigkeit entstehen sonst unterschiedliche thermische Widerstände, welche erhebliche Messabweichungen hervorrufen. Heutige Gap-Filler Werkstoffe besitzen eine Wärmeleitfähigkeit von ungefähr $3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [12]. Für diese Wärmeleitfähigkeit existieren zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine geeigneten Wärmestromsensoren. Daraus resultiert der Anspruch, entsprechende Wärmestromsensoren zu entwickeln.

2.2 Sensoraufbau

Der Sensoraufbau ergibt sich vorrangig aus dem Messprinzip. Die genutzte Thermokette muss in einem Trägermaterial eingebettet werden, welches elektrisch nicht leitet. Zusätzlich müssen die Ober- und Unterseite einen guten thermischen Kontakt zum Messobjekt gewährleisten. Der in Bild 2 dargestellte Grundaufbau geht auf [13] zurück. Hier wird bereits die Verwendung einer Thermokette, welche in einem keramischen Material eingebettet ist, vorgestellt.

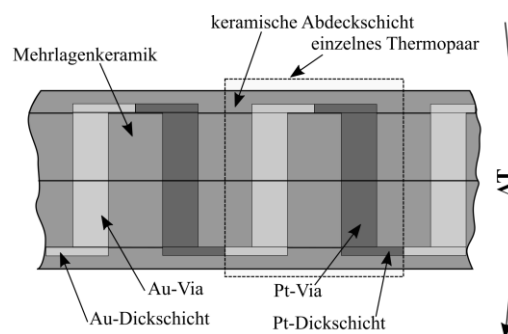


Bild 2 Schematischer Aufbau des Wärmestromsensors

Für den neu entwickelten Wärmestromsensor wird ebenfalls ein keramisches Trägermaterial genutzt. Gegenüber [13] ergeben sich jedoch signifikante Unterschiede. So wird der Sensor als keramischer Multilayer aufgebaut. Das Fertigungsverfahren des Fraunhofer IKTS bietet die Möglichkeit, den Fertigungsmaßstab erheblich zu reduzieren. Zudem kann so ein höherer Prozessstandard umgesetzt werden. Der Fertigungsprozess wird in Kapitel 3 näher erläutert. Die Thermokette besteht aus einer Gold – Platin (Au / Pt) Paarung und besitzt im Temperaturbereich von 50 °C bis 300 °C einen Seebeck-Koeffizienten von $S_{Au/Pt} = 10,7 \mu\text{VK}^{-1}$. Die Paarung ist bereits durch [14] im Rahmen der Entwicklung von keramischen Thermoelementen näher charakterisiert worden. Zur Auslegung des Wärmestromsensors muss vor allem die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bestandteile bekannt sein. Sofern diese bekannt sind, kann der Sensoraufbau hinsichtlich seiner Geometrie so optimiert werden, dass dieser für Messungen in Hochvoltbatterien geeignet ist.

2.3 Modellbildung

Durch die Modellbildung ist es möglich, den zuvor gezeigten Sensoraufbau, s. Bild 2, mathematisch zu beschreiben. Die Modellbildung unterstützt dabei, die mittlere Wärmeleitfähigkeit sowie die Empfindlichkeit des Sensors abzuschätzen. Als Ansatz wird die elektro-thermische Analogie genutzt. Dieser Ansatz eignet sich besonders gut, um stationäre und instationäre Wärmetransportprozesse zu beschreiben. [15]

Für die Modellierung wird ein einzelnes Thermopaar mit entsprechender keramischer Struktur betrachtet, vgl. Bild 2. Diese Annahme wird getroffen, da sich die einzelnen Thermopaare der gesamten Thermokette geometrisch gleichen. Das einzelne Thermopaar wird zudem in mehrere Bereiche unterteilt. Die Unterteilung erfolgt anhand der geometrischen und thermophysikalischen Eigenschaften. Im jeweiligen Bereich werden homogene und isotrope Materialeigenschaften sowie ein gradientenfreies Temperaturfeld angenommen. Zwischen den einzelnen Bereichen, welche als Massepunkte betrachtet werden, gilt die geometrisch eindimensionale Wärmeleitung. Damit kann das Fourier'sche Gesetz angewendet und wie folgt formuliert werden. [13]

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Der Wärmestrom \dot{Q} wird durch den Quotienten aus Temperaturdifferenz ΔT und thermischen Widerstand R_{th} ausgedrückt. Der thermische Widerstand wird rein durch die geometrischen Eigenschaften A und l sowie die Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben. Mit Hilfe der elektro-thermischen Analogie kann der Sensoraufbau analytisch durch ein Widerstandsnetzwerk aus Reihen- und Parallelschaltungen beschrieben werden. Für den Grundaufbau des Wärmestromsensors ist dieses in Bild 3 dargestellt. Die keramischen Abdeckschichten werden durch die thermischen

Widerstände R_{Di} ausgedrückt. Das Au / Pt Thermopaar wird in den Widerständen $R_{Au i}$ bzw. $R_{Pt i}$ zusammengefasst. Der keramische Grundträger kann durch den Widerstand R_{Gt} ausgedrückt werden.

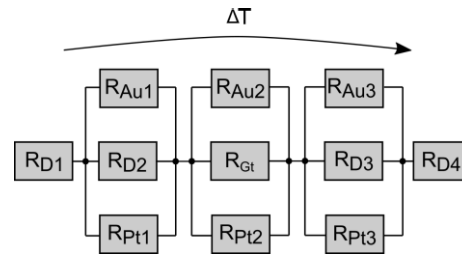


Bild 3 Elektro-thermisches Ersatzschaltbild für den Aufbau des Wärmestromsensors

Durch das Ersatzschaltbild können die thermischen Widerstände der einzelnen Bereiche berechnet werden. Daraus resultiert der thermische Gesamtwiderstand R_{ges} , welcher in Gl. 2 zusammen mit der Temperaturdifferenz den Wärmestrom ausdrückt. Für das in Bild 3 gezeigte Widerstandsnetzwerk ergibt sich folgender thermischer Gesamtwiderstand.

$$R_{ges} = R_{D1} + (R_{Au1} \parallel R_{D2} \parallel R_{Pt1}) + (R_{Au2} \parallel R_{Gt} \parallel R_{Pt2}) + (R_{Au3} \parallel R_{D3} \parallel R_{Pt3}) + R_{D4} \quad (\text{Gl. 3})$$

2.3.1 Optimierungsansatz

Damit der Wärmestromsensor in seinen späteren Eigenschaften zum Messobjekt, in diesem Fall die Gap-Filler Schicht, s. Abschnitt 1.1, passt, muss dieser entsprechend angepasst werden. Die Anpassungen betreffen dabei sowohl die Geometrie als auch die Wärmeleitfähigkeit.

Auf Basis des elektro-thermischen Ersatzschaltbildes können entsprechende Optimierungen vorgenommen werden. Als wichtigstes Kriterium wird die mittlere Wärmeleitfähigkeit definiert. Unter Betrachtung des Fertigungsprozess kommen weitere Kriterien hinzu, wie z. B. die Anzahl an keramischen Lagen, die Sensorhöhe oder der elektrische Widerstand der Thermokette. Als Eingangsgrößen dienen die geometrischen Fertigungsvorgaben des Fraunhofer IKTS und die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Komponenten wie dem Au / Pt Thermopaar oder der keramischen Bestandteile [16]. Jeder Parameter besitzt einen definierten Wertebereich innerhalb der Vorgaben. Während die Wärmeleitfähigkeit der keramischen Anteile bekannt ist, ist dies für die Thermopaarung nicht der Fall, sodass diese zu Beginn als Schätzgröße mit definierter Ober- und Untergrenze eingeht. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur ist aktueller Gegenstand der Forschung.

Für den Optimierungsansatz wird der thermische Gesamtwiderstand aus Gl. 3 genutzt, sodass sich folgende Gleichung für die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit ergibt.

$$\lambda_{ges} = \frac{l_{ges}}{A_{ges} \cdot R_{ges}} \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Gesamtfläche A_{ges} kann anhand der einzelnen Flächen berechnet werden, ebenso die Gesamthöhe l_{ges} . Die bisherigen Optimierungsdurchläufe zeigen, dass die größten Abhängigkeiten zwischen der Wärmeleitfähigkeit λ_{ges} , dem Durchmesser der Thermoschenkel (d_{via}) sowie der Höhe der keramischen Deckschicht (h_{dec}) bestehen. Das Bild 4 zeigt den Zusammenhang der Parameter λ_{ges} , d_{via} und h_{dec} . Mit den bisherigen Informationen kann eine minimale Gesamt-Wärmeleitfähigkeit von etwa $3,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreicht werden. Die dargestellten Ergebnisse sind bereits um die Datenpunkte reduziert, welche die Grenzwertvorgaben verletzen. Die geforderte Wärmeleitfähigkeit wird damit noch nicht erreicht. Für genauere Abschätzungen müssen die noch fehlenden Wärmeleitfähigkeiten der Au / Pt Thermopaarung berücksichtigt werden.

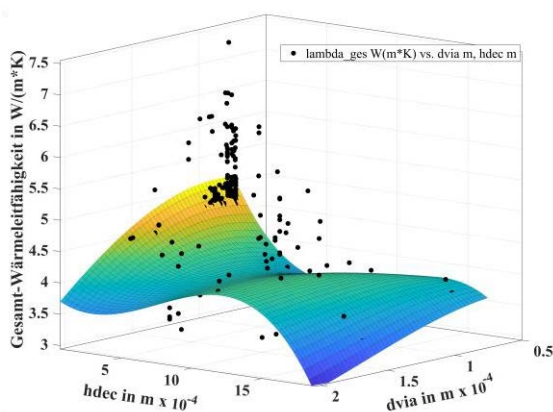


Bild 4 Ergebnisse eines Optimierungsdurchlaufs für die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit des Wärmestromsensors

3 Fertigungstechnologie

Das vorgestellte Konzept des keramischen Wärmestromsensors wird in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme umgesetzt. Der Fertigungsprozess des beschriebenen Sensoraufbaus, vgl. Bild 2, wird nachfolgend näher erläutert.

3.1 LTCC – Verfahren

Der Aufbau des Wärmestromsensors erfolgt mit der Mehrlagenkeramiktechnologie, im speziellen der LTCC-Technologie (Low Temperature Co-fired Ceramics) und darin eingebetteten Au / Pt Thermoketten. Ausgangsbasis für die Fertigung des Wärmestromsensors sind keramische Grünfolien, siehe Bild 5. Diese werden in einem ersten Prozessschritt strukturiert, um die elektrischen Durchkontaktierungen der Au / Pt Thermoschenkel zwischen den einzelnen Lagen herzustellen. Die so entstandenen Durchgänge (Vias) werden durch ein Schichtabscheidungsverfahren, z. B. Maskendruck, mit den leitfähigen Au / Pt Viafill-Pasten gefüllt. Nach einer anschließenden Trocknung können weitere Schichten zur Bildung der Au / Pt Thermokette sequenziell im Dickschichtverfahren wie Siebdruck aufgebracht werden. Im Anschluss an die Schichtabscheidung werden die einzelnen Grünfolien gestapelt. Auf die Weise

ergibt sich die mehrlagige Struktur des Wärmestromsensors. Durch Temperatur- und Druckbeaufschlagung werden die Lagen im Laminier-Prozess zu einem Verbund laminiert. Im nachfolgenden Sinterprozess mit einer Maximaltemperatur von ca. 850°C verbrennen die organischen Bestandteile und die Keramik wird verdichtet. Durch nachgelagerte Prozesse können weitere Schritte wie die Oberflächenbearbeitung folgen.

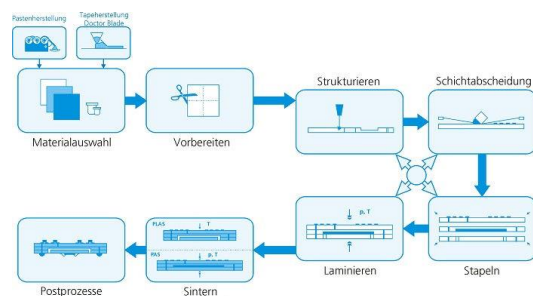


Bild 5 LTCC Prozess zur Fertigung von mehrlagigen keramischen Sensoren

3.2 Adaption Materialsystem

Aktuell stehen im Zielmaterialsystem, bestehend aus LTCC und integrierten Au / Pt Thermoelementen, Dickschichtpasten zur Erzeugung von Leitbahnen in Gold und Platin sowie eine Gold-Viafill-Paste zur Verfügung. Durch die unterschiedlichen Abscheidungsverfahren, Maskendruck zur Füllung von Vias und Siebdruck zur Erzeugung leitfähiger Schichten, existieren unterschiedliche Anforderungen (u. a. Viskosität und Feststoffgehalt) an die jeweiligen Pasten. Für das Zielmaterialsystem existiert allerdings keine angepasste, platinbasierte, Viafill-Paste. Für den Platin Thermoschenkel (Pt-Via), vgl. Bild 1, muss die entsprechende Pt-Viafill-Paste speziell für das LTCC Materialsystem adaptiert werden. Die Anpassung beinhaltet vor allem die Optimierung der Masseverhältnisse der einzelnen Komponenten wie Lösungsmittel, Bindemittel sowie Additiven.

Zur Charakterisierung der adaptierten Pt-Viafill-Paste werden unterschiedliche Eigenschaften analysiert. Einerseits erfolgt eine Analyse der Parameter Viskosität, Schwindungs- und Sinterverhalten, welche für den Dickschichtprozess relevant sind, insbesondere für Viafill-Pasten. Andererseits werden die für den Wärmestromsensor wichtigen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Erst nach einer vollständigen Analyse, können die aus der Modellbildung gewonnenen Erkenntnisse im Fertigungsprozess umgesetzt werden.

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass sich durch Einführung von neuen Energiespeichern auch für die Temperaturmesstechnik neue Herausforderungen und Anwendungsfelder ergeben. Neben der Messung von absoluten Temperaturen steigt das Interesse, auch thermische Verluste in Form von Wärmeströmen zu charakterisieren. Der Einsatz von Wär-

mestromsensoren könnte zukünftig diesen Informationsgehalt abdecken und somit das Feld der Temperaturmessung ergänzen. Das vorgestellte Konzept basiert auf einer Gold-Platin Thermokette, welche in einem keramischen Trägermaterial eingebettet ist. Durch das elektro-thermische Ersatzmodell lassen sich die wichtigsten Eigenschaften des Sensors analytisch abschätzen. Zudem kann durch den aufgezeigten Optimierungsansatz der Wärmestromsensor hinsichtlich seiner Geometrie und Wärmeleitfähigkeit angepasst werden. Vor allem die Wärmeleitfähigkeit ist eine wichtige Zielgröße zur Messung des Wärmestroms innerhalb der Gap-Filler Schicht von Batteriesystemen. Nur durch entsprechende Anpassungen können die Messabweichungen reduziert werden. Die Realisierung des Sensors erfolgt in der LTCC Technologie. Durch die kleinen Fertigungsmaßstäbe ergibt sich die Einsatzmöglichkeit im Fahrzeugentwicklungsprozess. Das bestehende Materialsystem wird gegenwärtig adaptiert, um die verwendeten Au / Pt Pasten auf das verwendete LTCC-Materialsystem abzustimmen. Durch die fortschreitende Entwicklung wird das Modell des Wärmestromsensors stetig angepasst.

5 Ausblick

Die gegenwärtige Adaption der Pt-Viafill-Paste stellt einen wichtigen Abschnitt im Entwicklungsprozess des Wärmestromsensors dar. Nach einer erfolgreichen Adaption erfolgt die Charakterisierung der metallischen Pasten. Vor allem die für die Auslegung relevanten Wärmeleitfähigkeiten der Au / Pt Pasten sind noch nicht analysiert, sodass diese im Anschluss ermittelt werden. Sobald diese bekannt sind, werden diese als wichtigste Eingangsgröße die Optimierung des Sensorsaufbaus ergänzen und somit zum finalen Design beitragen. Im Anschluss wird auf Basis der bereits gezeigten elektro-thermischen Analogie die Empfindlichkeit des Wärmestromsensors berechnet. Da die Analogie auf starken Vereinfachungen aufbaut, wird im Weiteren der Sensoraufbau und das Sensorverhalten durch numerische Berechnungen gestützt. Gängige FEM-Programme unterstützen die Berechnungen von Thermospannungen unterschiedlicher Materialkombinationen, sodass die Empfindlichkeit des Sensors simuliert werden kann. Parallel zum Konzept des Wärmestromsensors wird der notwendige Fertigungsprozess weiterentwickelt. Das LTCC Verfahren wird durch spezielle Pastentestmuster validiert, sodass weitere Parameter, wie das Sinterverhalten, optimiert werden können.

6 Literatur

- [1] Stierle, T.: Elektrifizierung boomt. ATZextra, Ausgabe Sonderheft 5/2021. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. <https://doi.org/10.1007/s35778-021-0481-4>
- [2] Sauer, D. U., u.a.: Speicherung der elektrischen Energie. Elektrifizierung des Antriebsstrangs. 1. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Seite 60-98, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60356-7>
- [3] Deser, S.; Gall, M.; Seidl, S.; Hofman, J.: Effizientes Thermomanagement bei Hochvoltbatterien. ATZelektronik, Ausgabe 04/2020. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. <https://doi.org/10.1007/s35658-020-0178-2>
- [4] Koch, I.: CSM HV-Messsysteme. Themenheft, Version 2.2.0. CSM GmbH Computer-Systeme-Messtechnik, 2022.
- [5] Bartz, F.; Gehrmann, S.; Marin, S.: Messunsicherheitsbetrachtung für die Kalibrierung von keramischen Wärmestromsensoren. VDI-Berichte Nr. 2390. VDI Wissensforum GmbH, Seite 23-34, 2021. ISBN: 978-3-18-092390-1
- [6] Childs, P.R.N.; Greenwood, J.R.; Long, C.A.: Heat flux measurement techniques. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Seite 655-677- Bd. 213, Nr.7, 1999.
- [7] Hendrichs, H.: gSKIN® Heat Flux Sensors for R&D. Datenblatt Version 4.1. greenTEG AG, 2018.
- [8] Kirihaara, A; u.a.: Flexible heat-flow sensing sheets based on the longitudinal spin Seebeck effect using one-dimensional spin-current conducting films. Nature Scientific Reports, 6:23114, 2016. doi: 10.1038/srep23114.
- [9] Gifford, A.R.; u.a.: Durable Heat Flux Sensor for Extreme Temperature and Heat Flux Environments. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 24, Nr. 1, Seite 69-76, 2010. doi: 10.2514/1.42298.
- [10] Zribi, A.; u.a.: Design, fabrication and characterization of thin film resistance for heat flux sensing application. Sensors and Actuators A: Physical, Seite 26-39, 2016doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016>.
- [11] Baehr, H.D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Berlin Heidelberg, 9. Auflage, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49677-0
- [12] Frauenhofer, M.; u.a.: Optimierte Wärmeableitung aus Energiespeichern für Serien-Elektrofahrzeuge. adhäsion KLEBEN & DICHTEN, Sonderheft 03/2020. Springer Fachmedien Wiesbaden, Seite 38-43, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s35145-020-0459-1>
- [13] Hohmann, M.: Realisierung eines Blockkalibrators mit Wärmestromsensoren und integrierten Fixpunktzellen. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2016. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000671>
- [14] Gierth, P.; u.a.: Novel thermocouples for automotive applications. J. Sens. Sens. Syst., 7, Seite 43-49, 2018. <https://doi.org/10.5194/jsss-7-43-2018>.
- [15] Bernhard, F.: Handbuch der technischen Temperaturmessung. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Seite 67-76, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-24506-0
- [16] Fraunhofer IKTS: Public Material- & Designrules for Working Group Microsystems, LTCC and HTCC. Firmenschrift Fraunhofer IKTS, 2021