

Entwicklung neuartiger thermoelektrischer Module für automotiv und industrielle Anwendungen

Niedermeyer, Lars¹; Augsburg, Klaus¹; Wodtke, Axel¹; Rebenklau, Lars²; Griebmann, Horst²; Gierth, Paul²; Irrgang, Klaus³; Lippmann, Lutz³; Bechtold, Franz⁴

Anschrift: ¹Technische Universität Ilmenau / Gustav-Kirchhoff-Platz 2 / 98693 Ilmenau

²Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme / IKTS / Winterbergstraße 28 / 02177 Dresden

³Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH / TMG / Heydaer Straße 39 / 98693 Martinroda

⁴VIA Electronic GmbH / Robert-Fresen-Straße 3 / 07629 Hermsdorf

E-Mail Adresse: Lars.Niedermeyer@tu-ilmenau.de, Tel.-Nr. +49 3677/69-3845

Zusammenfassung

Das Vorhaben befasst sich mit der Entwicklung neuartiger thermoelektrischer Module aus herkömmlichen, kommerziell verfügbaren Blechen bzw. pastösen metallischen Werkstoffen. Diese Elemente eröffnen neue Freiheitsgrade in der Gestaltung der Temperaturmessstelle und eignen sich für vielfältigste Temperaturmessaufgaben bis in den Hochtemperaturbereich. Die Blechthermoelemente sind im Stande hohe Axialkräfte aufzunehmen und können so als funktionsintegrierte Dichtung mit einer Temperaturmessstelle fungieren. Die Pastenthermoelemente zeichnen durch eine geringe thermische Eigenmasse aus, was eine Temperaturmessung ohne Strömungsbeeinflussung möglich macht.

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen der Blechthermoelemente umfassen Heißgasprüfstands- und Motorenversuche sowie begleitende 3D-CFD Simulationen. Für die Pastenthermoelemente wurden geeignete Materialpaarungen ermittelt und deren Einsatzneigung unter Labor- und Realbedingungen evaluiert.

Keywords: Thermoelemente, Temperaturmesstechnik, Dickschicht, Hochtemperaturanwendung

1 Einleitung

In Folge der immer strengeren Abgasgesetzgebung und der damit einhergehenden Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren rückt der Begriff Downsizing mehr und mehr in den unmittelbaren Fokus der Motorenentwicklung. Diese hochaufgeladenen Motoren weisen jedoch eine nicht unwesentliche Erhöhung der Abgastemperaturen auf. In Abhängigkeit von Konstruktion, Betriebspunkt und Brennstoff können Temperaturen von über 1050 °C im Abgaskrümmern auftreten. Im Zusammenspiel der Temperaturen mit den hochdynamischen Abgaspulsationen der Auslasstakte entsteht eine materialschädliche Umgebung.

Zur Zustands- und Funktionalitätsüberwachung von Abgasstrangelementen, wie zum Beispiel dem Abgasturbolader, werden zunehmend Hochtemperatur-Mantelthermoelemente eingesetzt. Als Problematik ergibt sich, dass diese hochsensiblen Kontrollmittel selbst den Belastungen durch Temperatur, Schwingung und abrasiven Elementen im Abgas ausgesetzt sind, sowie aufgrund der üblichen Einbrin-

gungsweise einen Eingriff in den Strömungsverlauf generieren.

Um dem steigenden Anforderungsprofil der Automobilindustrie gerecht zu werden, wurden neuartige thermoelektrische Module aus Blech bzw. Pastenmaterial entwickelt, welche durch bisher nicht betrachtete Materialformen neue Freiheitsgrade in der Gestaltung der Thermolemente eröffnen.

Während die Blechthermoelemente durch ihre große Eigenstabilität, hohe Axialkräfte aufnehmen und damit als Dichtung fungieren, bieten Pastenthermoelemente die Möglichkeit sich ohne eine nennenswerte Dicke an verschiedenste Oberflächen anzulegen und somit strömungsoptimiert zu agieren.

Die Messstelle ergibt sich entsprechend des Thermolementprinzips an der Kontaktstelle zweier Metalle und kann in Form und Anzahl so variiert werden, dass Strömungs- und Messverhalten einen optimalen Kompromiss bilden. Eine Erschließung grundlegend neuer Anwendungsbereiche wird durch die Thermolementbildung auf Pastenbasis ermöglicht. Hierbei werden siebdruckfähige metallische Pasten auf deren Kombinationsmöglichkeiten, Einbrenn-

verfahren sowie Ausbildung einer ausreichenden thermoelektrischen Spannung untersucht. Durch die gewonnenen Freiheitsgrade im Herstellungsverfahren und der konstruktiv nutzbaren geometrischen Anordnung können Temperaturen exakt dort gemessen werden, wo sie von Interesse sind.

In diesem Beitrag werden die neu gewonnen Möglichkeiten der Verwendung dieser thermoelektrischen Module, sowie Untersuchungen, welche das Verhalten dieser Module wiedergeben, aufgezeigt. Die Untersuchungen erstrecken sich von Prüfstandsversuchen im Heißgasprüfstand, die Versuche begleitende Simulationen bis hin zu Motorenprüfstandsversuchen.

2 Grundlagen

Thermoelemente basieren auf dem Seebeck-Effekt. Dieser bedingt die Entstehung einer messbaren elektrischen Spannung im Fall einer Temperaturdifferenz zwischen Kontaktstellen zweier verschiedener metallischer Werkstoffe (vgl. Abb. 1).

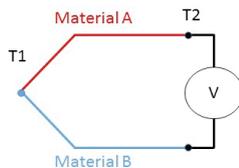


Abb. 1: Messprinzip der realisierten Thermoelemente

Für die hier vorgestellten Blechthermoelemente entstanden verschiedene Ausführungsformen. Die Ausführung der Messnase kann der jeweiligen Messaufgabe angepasst werden. Die Messstelle befindet sich in dem Punkt, in dem die beiden Metalle miteinander verschweißt sind. Zum Einsatz kamen die Legierungen Alloy 201 und Alloy 601, welche ähnlich, jedoch nicht gleich Typ K und daher einer eigenen Kennlinie unterliegen.

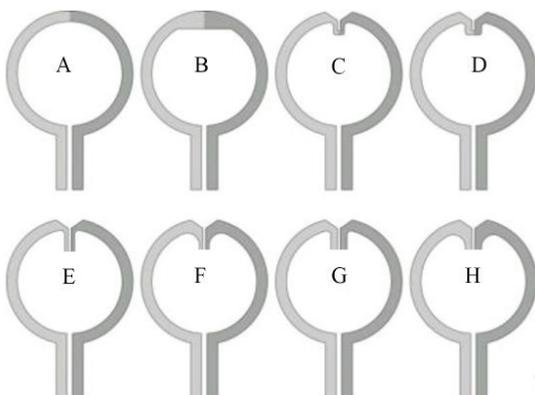


Abb. 2: Ausführungsformen der Blechthermoelemente

Die Formgebung der Blechelemente resultiert aus der Eigenschaft des Thermoelements als Dichtung zu funktionieren.

3 Bestimmung der dynamischen Eigenschaften der Blechthermoelemente

Das dynamische Verhalten der Blechthermoelemente wurde in einem Heißgasprüfstand (tmg) beurteilt. Aufgrund der Ausführung der Blechthermoelemente als Dichtung, können sie nicht sprunghaft in ein Hochtemperaturmedium eingebracht werden. Daher wurde eine Vorrichtung entwickelt, die es ermöglicht im laufenden Betrieb eines Heißgasprüfstands die Temperaturmessstelle mit kalter Luft zu beaufschlagen (vgl. Abb. 3).

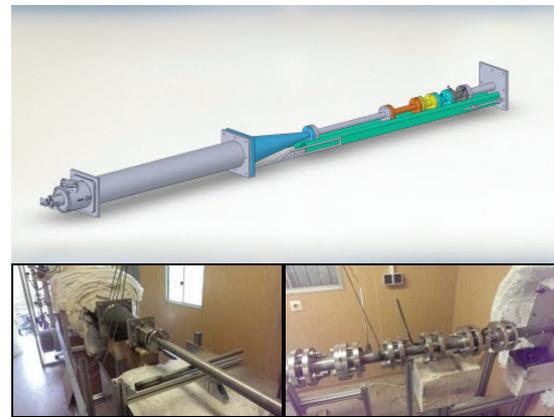


Abb. 3: Messstrecke Heißgasprüfstand

Die Vorrichtung besteht aus verschiedenen Flanschen, die die Messdichtungen zwangsfrei aufnehmen können.

Die Positionierung der Kaltlufteinströmung erfolgte unter Zuhilfenahme einer kompressiblen CFD-Simulation (vgl. Abb. 4). Das CFD Modell umfasst die gesamte Messstrecke. Als Eingangsparameter für das Modell werden die Gaszusammensetzung, die jeweilige Temperatur des Brenners sowie die Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben.

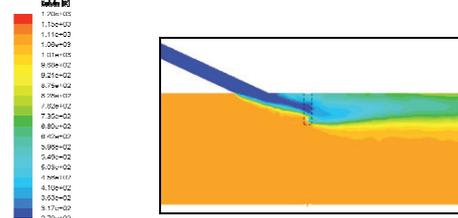


Abb. 4: Anströmung Temperaturmessnase mit Kaltluft

Durch weitere CFD-Untersuchungen wurde die stationäre Aufheizung der Module betrachtet. Der Fokus lag dabei auf der Temperatur an der eigentlichen Messperle. Die Temperaturverteilung bei einer Eingangstemperatur von 1073 K auf den einzelnen Ausführungen der Thermo-

elemente zeigt Abb. 4. Daraus wird ebenfalls der Vorteil einer Messstellenpositionierung im Strömungsgang ersichtlich.

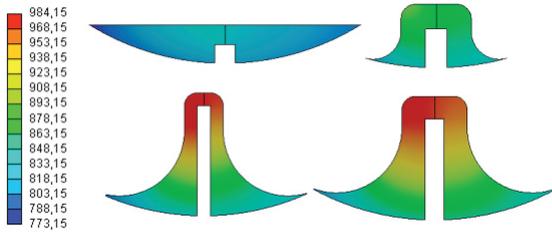


Abb. 5: Temperaturen der Messnasen B, D, F, H

Für die transienten Erwärmungsberechnungen wird aufgrund der hohen Temperaturen zur reinen Temperaturleitung die Temperaturstrahlung mit modelliert. Diese Simulationstechnik ist bereits an Stabthermoelementen erfolgreich validiert worden und generiert vor allem in der Berechnung der dynamischen Eigenschaften der Temperaturelemente sehr gute Ergebnisse. Die Beeinflussung der Geschwindigkeitsverteilung durch das Messelement innerhalb des Strömungsprofils stellt sich in Abb. 6 dar.

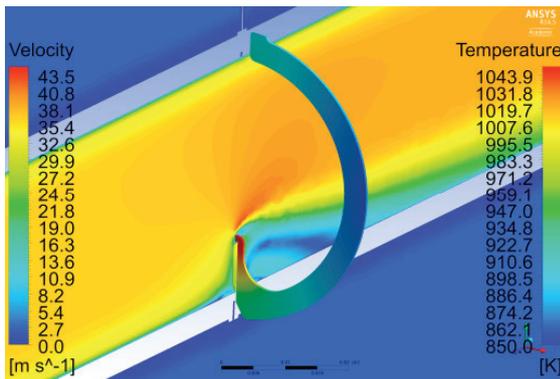


Abb. 6: Strömungszustand um die Messnase

Die Berechnung des transienten Erwärmens geht von einem kalten Grundzustand (282 K) aus. An diesen wird schlagartig die Hochtemperatur (1153 K) des Heißgasprüfstands angelegt. Die verzögerte Temperatur an der Position der Messperle entspricht der Sprungantwort des Sensors im realen Versuch.

In zu vergleichenden Messungen am Heißgasprüfstand mit der Kaltluftanströmung ist ein ΔT von ca. 400 K erreicht worden. Mit diesen Werten ergibt sich für die Messnase F eine t_{63} Zeit von 2,35 s (vgl. Abb. 7).

Der Vergleich von Messung und Simulation zeigt gute Übereinstimmungen, jedoch ist die Simulation noch hinsichtlich der verwendeten Stoffparameter und der Umgebungsvariablen genauer zu detaillieren (vgl. Abb. 8). Deutlich ist zu erkennen, dass bis in den Bereich der t_{63}

Zeit das Modell hinreichend die Realmessung wiedergeben kann.

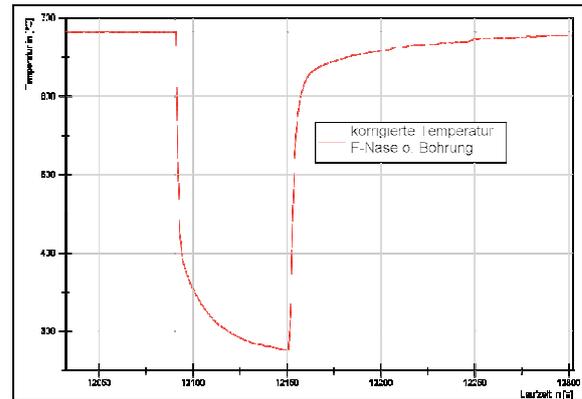


Abb. 7: Dynamikmessung F-Nase

Im Hochtemperaturbereich kommt es aber aufgrund idealisierter Simulationsbedingungen zu einer zunehmenden Differenz zwischen Messung und Simulation. In den Simulationen ergibt sich eine t_{63} Zeit von 1,75 s.

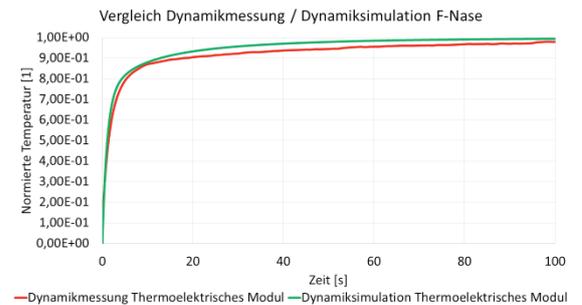


Abb. 8: Vergleich Dynamikmessung und Dynamiksimulation der F-Nase

Abschließend wurde die Dynamik des thermoelektrischen Moduls mit einem herkömmlichen Mantelthermoelement verglichen (vgl. Abb. 9).

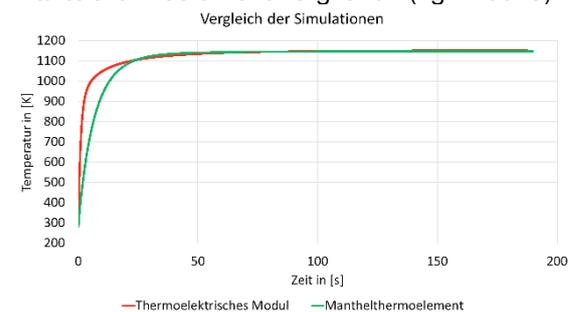


Abb. 9: Vergleich Dynamiksimulation Mantelthermoelement / thermoelektrisches Modul

Die Mess- und Simulationsergebnisse verdeutlichen die Verbesserung der Messdynamik durch die neuartige Ausgestaltungsform der Thermolemente im unisolierten Zustand.

4 Untersuchungen am Motorenprüfstand

Die Untersuchungen am Motorenprüfstand haben vor allem das Ziel die grundsätzliche Eignung der entwickelten thermoelektrischen Module zu zeigen. Hierfür wurden die Elemente in den Abgastrakt eines herkömmlichen Otto-Motors mit einer zweiflutigen Abgasanlage eingebracht (vgl. Abb. 10).

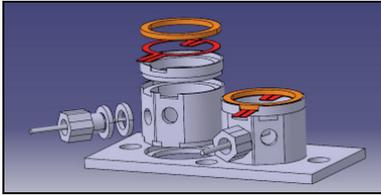


Abb. 10: Messaufbau am Motorenprüfstand

Dieser Aufbau ermöglicht das gleichzeitige Messen zweier thermoelektrischer Module sowie das Einbringen zweier Referenzmantelthermoelemente. Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 11. Darüber hinaus ermöglicht der Aufbau eine variable Positionierung der thermoelektrischen Module, so dass verschiedene Bereiche der Rohrströmung gemessen werden können. Die bei Blechthermoelementen notwendige elektrische Isolierung wird mittels einer Glimmerschicht zwischen dem Blech und dem Abgaskrümmen realisiert.



Abb. 11: Messaufbau am Motor sowie Einbauszustand der Elemente

Die Positionierung der Messnasen wurde in Voruntersuchungen mit offenen Messperlen, welche das Temperaturprofil in der Abgasströmung zeigen, untersucht. Abb. 12 zeigt die gewonnenen Ergebnisse für beide Rohre der Abgasanlage.

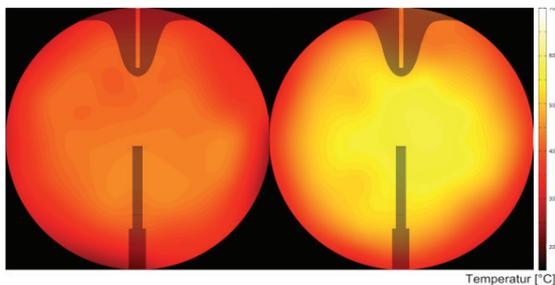


Abb. 12: Temperaturfeld der Abgasströmung in beiden Abgasrohren

Die Messungen am Motorprüfstand wurden bei verschiedenen Drehzahlstufen von 500 1/min

bis zu 3000 1/min, mit einer Haltezeit von 30 s, durchgeführt. Zusätzlich wurden die Messungen bei 3000 1/min mit Lasten von 25 Nm bzw. 50 Nm durchgeführt.

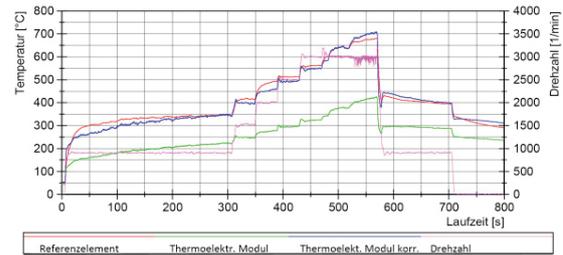


Abb. 13: Ergebnisse Messnasen F auf dem Motorenprüfstand

Da die verwendeten Materialien nicht exakt Typ K entsprechen, erfolgte eine Kennlinienkorrektur. In den Ergebnissen der Motorenversuche zeigen sich die Messnasenformen E und F im Vergleich zu den Referenzelementen als am besten geeignet. Durch die noch offen ausgeführte Messperle zeigen sich auch Vorteile der thermoelektrischen Module gegenüber den Referenzelementen.

Auf Grundlage der Motorversuche konnte die grundsätzliche Eignung der neuartigen Thermolemente auf Blechbasis nachgewiesen werden. Insbesondere die messtechnische Funktionalisierung von Dichtungselementen im Abgasstrang konnte aufgezeigt werden.

5 Probenaufbau Pastenthermolemente

Neben den Blechthermoelementen entstanden Thermolemente auf Basis pastöser metallischer Werkstoffe. Die Einsatzfähigkeit dieser Thermolemente wurde auf keramischen Substraten ermittelt. Dazu erfolgte der Siebdruck kommerziell verfügbarer Dickschichtpasten auf Al_2O_3 -Substrate. Als pastöser Werkstoff verfügbare Metalle und deren Thermospannung unter Bezug auf Platin [1] sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Kommerziell in pastöser Form verfügbare metallische Werkstoffe

| Werkstoff | Thermospannung U_{th} in $\mu\text{V}/100\text{ K}$ |
|-----------|---|
| Nickel | -19 ... -12 |
| Palladium | -2,8 |
| Platin | 0 |
| Aluminium | 4,0 |
| Silber | 6,7 ... 7,9 |
| Kupfer | 7,2 ... 7,7 |
| Gold | 5,6 ... 8,0 |
| Wolfram | 6,5 ... 9,0 |

Eingesetzt wurden hochtemperaturstabile Metallpasten auf Basis von Au, Ag, Ni und Pt. Aufgrund der geringen Abscheidungsstärke von

< 20 μm und der Möglichkeit zur Nutzenherstellung ist für diese Herstellungsmethode mit geringen Fertigungskosten im Vergleich zu Stabthermoelementen zu rechnen. Die resultierenden Materialkombinationen entsprechen keiner Standardisierung von Thermoelementen. Die Temperaturmessstelle wird durch Überlappung der metallischen Schicht erzeugt und kann beliebig auf der zu bedruckenden Oberfläche positioniert werden. Die Schichtabscheidungsreihenfolge wird definiert durch die benötigten Prozesstemperaturen der einzelnen Dickschichtpasten. So benötigen platinbasierte Pasten eine Sinter Temperatur von 1400 °C zur Schichtausbildung, aber silberbasierte Pasten lediglich 850 °C. Es erfolgte somit die Schichtabscheidung und thermische Behandlung von der höchsten zur niedrigsten Prozesstemperatur. Ausgeführt wurden die pastösen Thermoelemente zur grundlegenden Evaluierung als einsteckbare Stabthermoelemente. Die Produktion erfolgte im entsprechend Abb. 14 im Mehrfachnutzen.

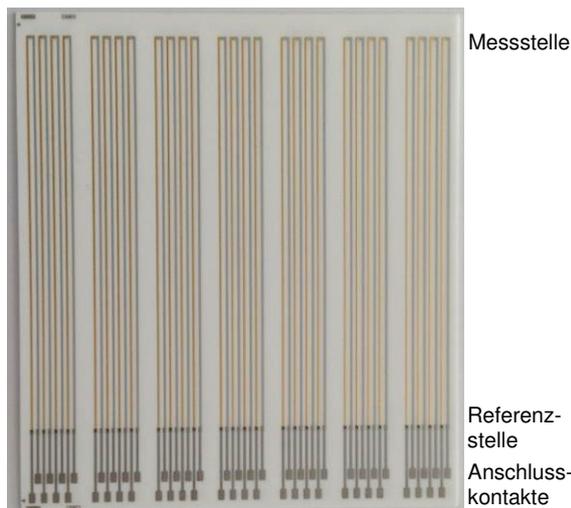


Abb. 14: Mehrfachnutzen zur Herstellung von Thermoelementen auf pastöser Basis

Rückseitig erfolgte entsprechend Abb. 15 die Abscheidung temperaturempfindlicher Platinwiderstände zur Temperaturvalidierung an der Messstelle und Referenzstelle.

Durch die ausschließliche Positionierung der Messstellenbereiche im erhitzten Medium entsteht über das keramische Substrat zur Referenzstelle ein Temperaturgradient. Durch diesen kommt es zur Ausbildung der thermoelektrischen Spannung entlang des Leiterzuges.

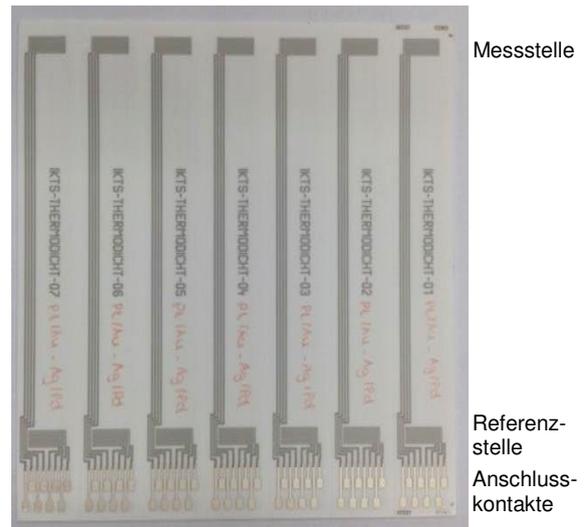


Abb. 15: Pt-Widerstand zur Temperaturevaluierung an Mess- / Referenzstelle

Die abgreifbare Temperaturspannung entsteht zwischen dem Materialübergang an der Messstelle und dem Materialübergang zum Kontaktierungsmaterial an der Referenzstelle.

4 Messungen keramischer Module

Zur Evaluierung der pastösen Thermoelemente erfolgte die Erwärmung des Messstellenbereiches mittels Konduktion. Dazu wurden keramische Heizelemente an die Sensoren montiert und diese um bis zu 500 K lokal erwärmt (vgl. Abb. 16).

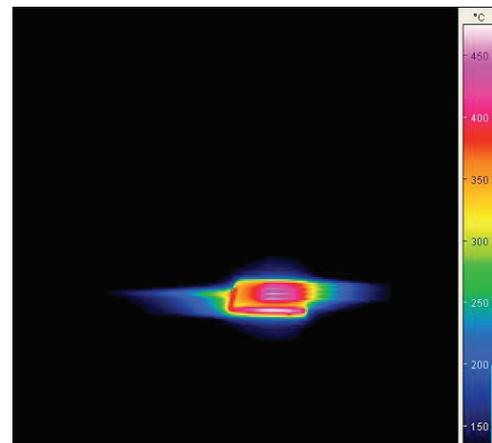


Abb. 16: Selektive Erwärmung der Sensoren mittels keramischer Heizelemente

Die aus der Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Referenzstelle resultierende Thermospannung über den pastösen Werkstoffen ist in Abb. 17 dargestellt.

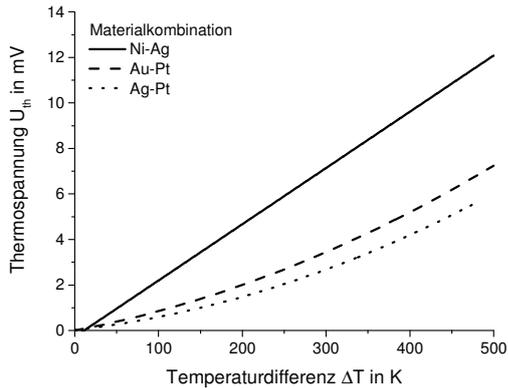


Abb. 17: Thermospannung Pastenthermoelemente über Temperaturdifferenz

Für alle betrachteten Materialkombinationen konnte ein positiver Thermospannungsgradient über der Temperaturdifferenz ermittelt werden. Dieser zeigte an Kombinationen mit Nickel überwiegend einen linearen Anstieg und an Kombinationen mit Platin einen, oberhalb 200 K Temperaturdifferenz, quadratischen Anstieg. Als Ursache für das nicht durchgängig lineare Verhalten einiger Materialkombinationen wird das zum Teil poröse bzw. mit Glasphase gefüllte Mikrogefüge der Dickschichten angesehen. Zur Gegenüberstellung von pastösen und Vollmaterialien erfolgte die Ermittlung der Thermospannung an Thermoelementen bestehend aus gedrucktem Metall und entsprechendem Drahtmaterial des identischen Werkstoffes. Die Ergebnisse sind in Abb. 18 dargestellt.

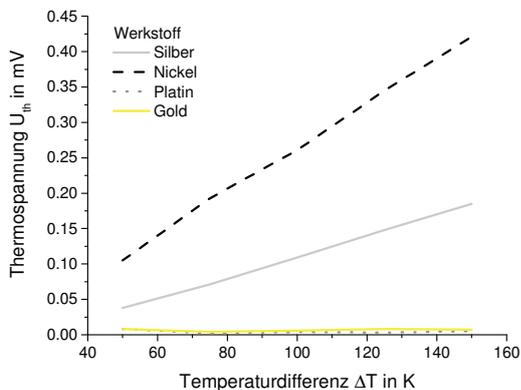
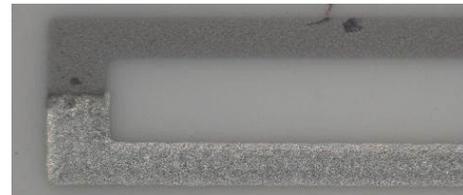


Abb. 18: Thermospannung zwischen pastösem und Vollmetall

An den Edelmetallen Platin und Gold konnte entsprechend den Ergebnissen keine Thermospannung gemessen werden. Die Werkstoffe verhalten sich folglich im betrachteten Temperaturbereich identisch zu Vollmaterialien. Die silberbasierte Dickschicht erzeugt eine geringe Thermospannung bedingt durch Zulegierung von 1 % Palladium. Dies wird im Bereich der Dickschichttechnik zur Erhöhung der Migrationsstabilität von Silberschichten zugegeben.

Der starke Anstieg der Thermospannung an Thermoelementen bestehend aus Nickeldickschicht und Nickeldraht wird gegenwärtig weiter untersucht.

Zur Erfassung der Langzeitstabilität von Pastenthermoelementen erfolgte die isotherme Langzeitauslagerung bei 500 °C. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 19 dargestellt.



(a) Ag-Pt nach 168 h bei 500 °C



(b) Ni-Pt nach 168 h bei 500 °C

Abb. 19: Optische Inspektion nach Hochtemperaturauslagerung

Auf Edelmetallpulvern basierende Schichten zeigten bei dieser Untersuchung keine Degradation der Haftfestigkeit oder elektrischen Eigenschaften. Die nickelbasierte Dickschicht zeigte verstärkte Abplatzungserscheinungen. Diese resultieren aus der geringeren Prozess-temperatur zur Schichterzeugung nach Siebdruck von lediglich 580 °C unter reduzierender Atmosphäre. Durch die isotherme Auslagerung bei 500 °C unter Luft kommt es zu einer partiellen Erweichung der haftvermittelnden Glas-schicht innerhalb der Dickschicht und zu einer starken Oxidation des Nickelpulvers. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde die Nickelpaste zur Herstellung von Thermo-elementen im automotive Bereich zum gegenwärtigen Zeitpunkt ausgeschlossen.

Bei der Probencharakterisierung mit selektiver Erwärmung wurde verstärkt der Bruch der keramischen Substratmaterialien als kritischer Stabilitätsfaktor bestimmt. In Folge dessen wurde das Substratlayout optimiert (vgl. Abb. 20).

Durch die Abrundung der Substratgeometrie kommt es zu einer verbesserten Verteilung der, durch thermische Ausdehnung induzierten, mechanischen Spannungen innerhalb der Substrate. Die Substratstabilität wurde dadurch soweit erhöht, dass eine Substratcharakterisierung auch im Motorenprüfstand unter Realbedingungen ermöglicht werden konnte.



Abb. 20: Pastenthermoelement mit mechanisch optimierten Keramiksubstrat

Die Elemente auf Metallpastenbasis mit keramischem Trägermaterial wurden ebenfalls auf dem Motorenprüfstand mit dem gleichen Belastungszyklus wie die Blechthermoelemente vermessen. Dadurch wurde die grundlegende Einsatzfähigkeit dieser Gestaltungsform von Thermoelementen unter Realbedingungen bewiesen. Vermessen wurden mittels keramischen Vergussmassenisolierte und unisolierte Thermoelemente.

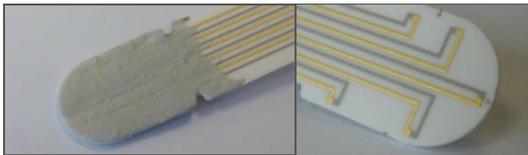


Abb. 21: Thermoelektrische Module auf Metallpastenbasis mit keramischem Träger

Für die Messungen wurde das gleiche Motorlastprofil gefahren, wie mit den Blechelementen. Die Materialstabilität der im Dickschichtprozess erzeugten Thermoelemente konnte unter diesen Bedingungen nachgewiesen werden. Jedoch zeigten die keramischen Isolationsmaterialien Degradationseffekte (Blasenbildung, Abplatzung vgl. Abb. 22). Unbeschichtete Thermoelemente zeigten eine hohe Resistenz gegenüber der abrasiven Abgasströmung.



Abb. 22: Keramikelemente nach der Motormessung

In der Betrachtung der Messergebnisse zeigen sich gute Übereinstimmungen der gemessenen Temperaturen mit dem Referenzelement (vgl. Abb. 23). Die reduzierte Dynamik der pastösen Thermoelemente resultiert aus dem hohen Eigenvolumen des verwendeten keramischen Trägersubstrates. Es wird erwartet, dass dieser Effekt bei Applikation der pastösen

Thermoelemente auf Oberflächen des Abgasstrangs reduziert wird.

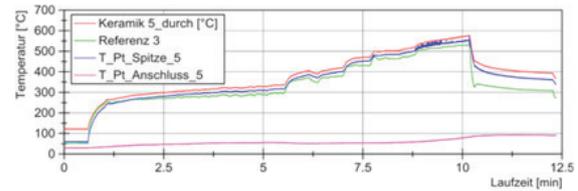


Abb. 23: Messergebnisse Keramikelemente

Auf Grundlage dieser abschließenden Versuche konnte die grundsätzliche Eignung der neuartigen Thermoelemente auf pastöser Basis nachgewiesen werden.

5 Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Vorhaben hat Möglichkeiten zur neuartigen Temperaturbestimmung in Abgasanlagen demonstriert.

Die Einsatzfähigkeit der thermoelektrischen Module aus Blechmaterial bzw. aus metallischen Pasten zur Messung der Abgastemperaturen konnte unter Labor- und Realbedingungen im Hochtemperaturbereich nachgewiesen werden.

Hierbei erfüllten die Module alle Ansprüche die an sie gestellt wurden.

Im Zusammenspiel von 3D-CFD Simulationen und dem Heißgasprüfstand konnten auch die dynamischen Eigenschaften der Elemente mit plausiblen Ergebnissen evaluiert werden.

Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen KF2184733DF3 „Thermoelektrische Module für automotiv und industrielle Anwendungen“ durch die AiF-GmbH gefördert.

Literaturnachweis

- [1] Karl Nietzsche, et al.: „Funktionswerkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik,“ Deutscher Verlag für Grundstoffenergie Leipzig-Stuttgart, 1993, ISBN 3-342-00524, pp 423