

Prüfstand für temperatursensitive Farben und grundlegende Untersuchungen von Oberflächentemperaturen

Test bench for temperature-sensitive paints and basic investigations of surface temperatures

Dipl.-Ing., Stephan Gehrman, Dr. Ing. h.c F. Porsche AG, Weissach, Deutschland, stephan.gehrmann@porsche.de

M.Sc., Frederik Bartz, Dr. Ing. h.c F. Porsche AG, Weissach, Deutschland, frederik.bartz@porsche.de

Dipl.-Ing., Dirk Skrotzki, Dr. Ing. h.c F. Porsche AG, Weissach, Deutschland, dirk.skrotzki@porsche.de

Dipl.-Ing., Silke Augustin, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, silke.augustin@tu-ilmenau.de

Christian Dresler, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, christian.dresler@tu-ilmenau.de

Kurzfassung

Der Artikel beschreibt den Aufbau und die Zielsetzung einer Prüfeinrichtung für die Untersuchung und Kalibrierung von temperatursensitiven Farben sowie der zugehörigen Messtechnik. Mit Hilfe von temperatursensitiven Farben ist es möglich, zweidimensionale Temperaturverteilungen auf Oberflächen zu messen. Dabei wirken sich die Eigenschaften der Oberfläche nur geringfügig auf das Messergebnis aus, da die Temperaturinformation aus der aufgetragenen Farbe kommt. Auf Grund des Aufbaus kann die Prüfeinrichtung auch für die grundsätzlichen Untersuchungen von weiteren Verfahren zur Messung von Oberflächentemperaturen dienen.

Abstract

The article describes the design and objectives of a test system for the investigation and calibration of temperature-sensitive paints as well as the associated measurement technology. With the help of temperature-sensitive paints, it is possible to measure two-dimensional temperature profiles on surfaces. The properties of the surface have only a minor effect on the measurement result, as the temperature information comes from the applied paint. Due to its design, the test device can also be used for further fundamental investigations of other methods for measuring surface temperatures.

1 Einleitung

Die Oberfläche stellt in der Regel die Systemgrenze vieler technischer Verfahren und Prozesse dar und ist somit maßgeblich an den Wärmetransportprozessen Strahlung und Konvektion beteiligt [1]. Durch den un stetigen Temperaturverlauf an der Oberfläche gehört die Messung der Oberflächentemperatur zu den anspruchsvollsten Teilgebieten der Temperaturmesstechnik. Das Messergebnis an der Oberfläche wird von den Umgebungsgrößen maßgeblich beeinflusst. [2] Zur Charakterisierung der Wärmeübergänge werden in der Fahrzeugentwicklung häufig Temperaturen an Oberflächen gemessen. Die Forschung an neuen Messmethoden, hier die Verwendung temperatursensitiver Farben, im Themengebiet der Temperaturmesstechnik ist deshalb wichtiger Bestandteil.

Ziel der Entwicklung des Prüfstands ist die grundlegende Untersuchung der Messsysteme im Hinblick auf die Güte der Messergebnisse. Des Weiteren dient der Prüfstand der Kalibrierung der temperatursensitiven Farben. Dabei müssen, auf Grund der Kalibrierung, sehr hohe Anforderungen an die Güte und Reproduzierbarkeit aller relevanten Parameter, wie z.B. die Proben temperatur, gelegt werden.

1.1 Temperatursensitive Farben

Mit temperatursensitiven Farben können überall dort zweidimensionale Temperaturfelder auf Oberflächen gemessen werden, wo die thermographischen Verfahren nicht zum

Einsatz kommen können. Dazu zählen beispielsweise Untersuchungen, bei denen die Thermographie-Systeme durch die Umgebungsbedingungen hohen Temperaturgradienten oder hohen Temperaturen ausgesetzt sind oder bei denen durch Atmosphären gemessen wird, die einen hohen Absorptionsgrad für Infrarotstrahlung aufweisen.

Das Funktionsprinzip der temperatursensitiven Farben beruht auf thermischen Prozessen von sogenannten Luminophoren, die in die Farben eingebettet sind [3], [4]. Die Luminophoren werden über Licht mit einer spezifischen Wellenlänge in einen höheren Energiezustand versetzt. Beim Übergang in den Grundzustand senden die Luminophoren Licht mit einer Wellenlänge aus, die sich von der Anregungswellenlänge deutlich unterscheidet. So lässt sich das Signal messtechnisch gut von der Anregung trennen. Ein Teil der Übergänge in den Grundzustand erfolgt allerdings strahlungslos.

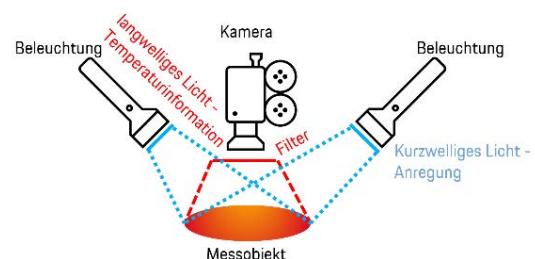


Abbildung 1 Messprinzip temperatursensitive Farben

Dieser Anteil steigt mit zunehmender Wärmeenergie an. Aus dem abnehmenden Signal kann auf die Temperatur geschlossen werden. Kalte Objekte erscheinen im Bild heller als warme Objekte. [4] Über eine geeignete Kalibrierung kann eine Korrelation zwischen der Helligkeit und der Oberflächentemperatur hergestellt werden. Für die Messung werden entsprechende Lichtquellen, Filter und eine Kamera benötigt. Die Proben müssen homogen ausgeleuchtet werden und die Kamera muss das Messfeld störungsfrei erfassen. Die Bilder werden anschließend mit einer Bildanalysesoftware ausgewertet.

2 Konzept des Prüfstands

Wie in Abschnitt 1 beschrieben ist die Oberfläche an den Wärmeübergängen in technischen Systemen beteiligt. Für den Prüfstand soll der Wärmetransport durch Strahlung und Konvektion gezielt gesteuert werden. Damit lassen sich deren Einflüsse auf das Messergebnis untersuchen. Dies und die zum Einsatz kommenden Messverfahren definieren maßgeblich die Anforderungen an den Prüfstand.

Das Grundkonzept des Prüfstands orientiert sich an der in [5] und [6] vorgestellten Prüfeinrichtung für Oberflächen-Tast-Temperaturfühler. Neuerungen ergeben sich durch den Kammeraufbau, die Auslegung für die Verwendung anderer Messmittel und die zeitgleiche Untersuchung mehrerer unterschiedlicher Proben. Für die Untersuchungen der temperatursensitiven Farben wird eine messtechnische Referenz benötigt, mit deren Hilfe auf die Oberflächentemperatur geschlossen werden kann. Die Oberflächentemperatur kann nicht mit der notwendigen Qualität direkt messtechnisch erfasst werden. Grund hierfür ist die Oberfläche selbst, deren Temperatur mit Kontaktthermometern nicht rückwirkungsfrei gemessen werden kann, vgl. [2]. Thermographisch gemessene Temperaturen können auch nicht zuverlässig als Referenz dienen, da sie von der Oberfläche und den aufgetragenen Farben abhängig sind. Zudem muss die Oberfläche für das Messsystem der temperatursensitiven Farben zugänglich bleiben, dies schränkt mögliche Messverfahren weiter ein. Als Referenzverfahren wird deshalb eine Methodik gefordert, die unabhängig von den Proben und Farben zuverlässig eine rückführbare Oberflächentemperatur darstellt. Für die Prüfkammer werden zwei Verfahren genutzt. Diese Verfahren werden in den Abschnitten 2.2 und 2.3 erläutert.

Die Einzelkomponenten des Prüfstands können dem graphischen Anforderungsplan, s. Abb. 2, entnommen werden [7]. Die Kernkomponente des Prüfstands besteht aus einer Heizplatte mit einem Probenhalter. Zusätzlich werden die Messverfahren zur Bestimmung der Referenztemperatur in dieser Komponente untergebracht. Die Heizplatte befindet sich inklusive Probenhalterung in einer geschlossenen Druckkammer. Der Aufbau ermöglicht es, den Prüfstand unabhängig vom Umgebungsdruck zu betreiben. Für die Proben können somit definierte Umgebungsbedingungen reproduzierbar eingestellt werden. Der optische Zugang für

die Untersuchung der temperatursensitiven Farben erfolgt durch ein Borosilikat Schauglas im Deckel der Prüfkammer.

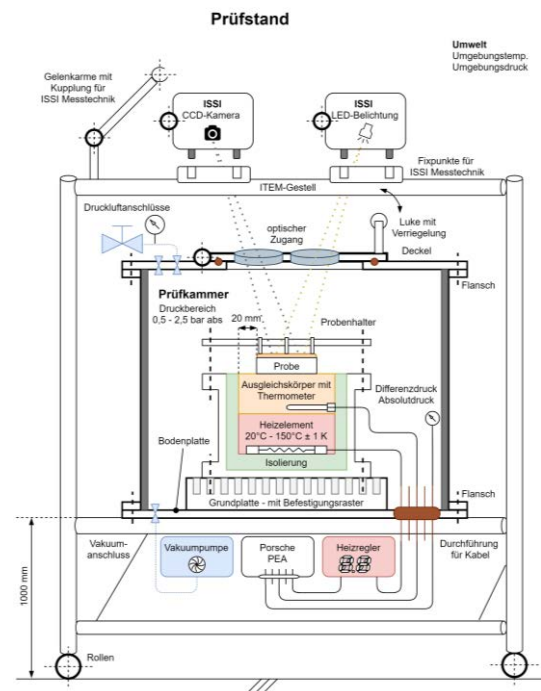


Abbildung 2 Graphischer Anforderungsplan des Prüfstands

2.1 Prüfkammer

Die Prüfkammer dient zur Abschirmung gegen Umgebungseinflüsse. Für eine gezielte Beeinflussung der konvektiven Wärmetransportprozesse lässt sich die Prüfkammer evakuieren oder mit Druck beaufschlagen. Auch ein von Luft abweichendes Medium kann in die Kammer eingebracht werden. Die Kammer ist für einen absoluten Systemdruck von $p_{\max} = 2$ bar und den Betrieb im Grobvakuumbereich ($p < 300$ mbar) ausgelegt. Der Überdruck lässt sich dabei mit Hilfe eines Druckreglers einstellen. Über weitere Sicherheitsmaßnahmen wird die Kammer zusätzlich vor unzulässiger Druckbeaufschlagung geschützt. Für den Betrieb unter Vakuum wird das Fluid aus der Prüfkammer kontinuierlich mit einer Vakuumpumpe abgepumpt. Der Kammerinnendruck wird in beiden Anwendungsfällen dauerhaft mit Drucksensoren überwacht. Für den Austausch der Atmosphäre kann die Kammer erst evakuiert und anschließend mit dem gewünschten Gas gefüllt werden.

Zur Reduzierung des Strahlungsaustauschs zwischen Probe und Kammer kann die Kammer- auf Proben-temperatur eingeregelt werden. Für die Messung der Kammer-temperatur sind mehrere Thermoelemente verbaut. Damit wird eine gleichmäßige Temperierung sichergestellt. Die Prüfkammer besteht aus einem zylindrischen Edelstahl-Korpus mit einem Boden- und Deckelflansch, vgl. Abbildung 3. Im Bodenflansch sind alle, für den Betrieb notwendigen Durchführungen für Medien und elektrische Signale vorgesehen. Auf dem Flansch ist innen eine Grundplatte angeordnet, auf der die Heizplatte inklusive

Probenhalter befestigt wird. Der Deckelflansch ist schwenkbar ausgeführt und kann für die Arbeiten im Inneren der Kammer angehoben und seitlich ausgeschwenkt werden. Im Deckel ist auch der optische Zugang integriert, der für die Untersuchung und Kalibrierung der temperatursensitiven Farben benötigt wird. Die optischen Eigenschaften des Borosilikatglases haben auf die Transmission der Anregungs- und Messsignale einen vernachlässigbaren Einfluss. Der optische Durchgang ist so dimensioniert, dass das Messsystem inklusive der Beleuchtung eine direkte Sicht auf die Proben hat. Auf diese Weise werden eine homogene und schattenfreie Ausleuchtung und der ungehinderte Transfer der Messsignale der temperatursensitiven Farbe möglich.

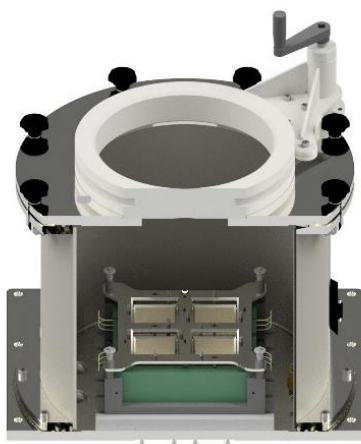


Abbildung 3 Prüfkammer mit Heizplatte, Probenhalter und optischen Zugang

2.2 Heiz- und Zwischenplatte

Die Heizplatte dient zur Temperierung der Proben. Für ein definiertes Regelverhalten sowie ein homogenes Temperaturfeld und die damit resultierender geringe Wärmeableitung, ist die Heizplatte in einen Isolationskörper aus Calciumsilikat eingebettet. Die Probentemperatur ist von Raumtemperatur bis zu 150 °C einstellbar und wird über einen externen Temperaturregler geregelt. Die Ankopplung der Heizplatte an den Ausgleichskörper erfolgt über eine Zwischenplatte, siehe Abb. 4. In dieser sind vier Wärmestromsensoren unter den jeweiligen Proben angeordnet. Da die Wärmestromsensoren eine geringere Wärmeleitfähigkeit als die Zwischenplatte aus Aluminium aufweisen, müssen diese wegen der Forderung nach einem möglichst eindimensionalen Wärmestrom in eine ausreichend geometrisch ausgedehnte Zwischenschicht mit passender Wärmeleitfähigkeit eingebettet werden. Damit kann für den Ort des Sensors jeweils von einem ungestörten Temperaturfeld ausgegangen werden. Die Oberflächentemperatur der Proben wird unter der Annahme der geometrisch eindimensionalen Wärmeleitung aus der gemessenen Wärmestromdichte und einer weiteren Bezugstemperatur im Ausgleichsblock, siehe Abschnitt. 2.3, bestimmt. Der mathematische Zusammenhang ist in Gleichung 1 dargestellt [8]. Neben den gemessenen Größen müssen die Längen l ,

und die Wärmeleitfähigkeiten λ der einzelnen Bauteile bekannt sein.

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{l} \cdot \Delta T \rightarrow T_1 - \left(\frac{\dot{q} \cdot l}{\lambda} \right) = T_2 \quad (\text{Gl. 1})$$

Zusätzlich zur Bestimmung der Oberflächentemperatur aus dem gemessenen Wärmestrom wird in Abschnitt 2.3 eine weitere Referenzmethode erläutert. Diese basiert auf den Erkenntnissen aus [2], [5] und [6].

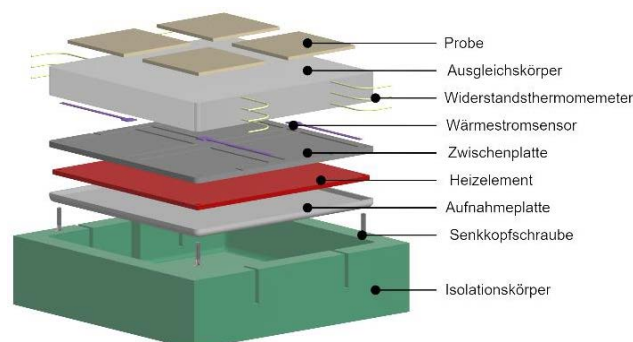


Abbildung 4 Aufbau der Probentemperierung mit Heiz-, Zwischen- und Ausgleichsplatte und Sensorik

2.3 Ausgleichsplatte und Probenhalter

Der Probenhalter besteht aus einem Ausgleichskörper und dem aufgesetzten Niederhalter, vgl. Abb. 5. Diese werden kraftschlüssig mit der Heizplatte verbunden. Mit dem passend dimensionierten Ausgleichskörper wird ein homogenes Temperaturfeld gewährleistet. Eine ebene parallele Oberfläche sorgt für eine gleichbleibende und reproduzierbare thermische Kopplung zwischen Heizplatte und Probe.

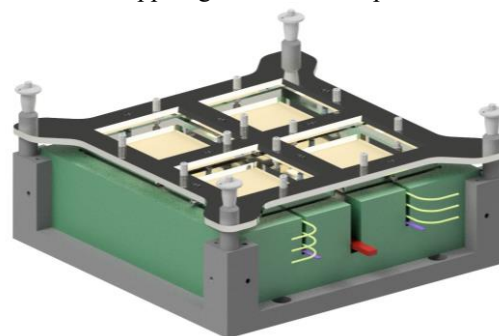


Abbildung 5 Heizsystem mit Probenhalterung

Im Ausgleichskörper ist auch die Sensorik für das zweite Referenzmessverfahren zur Ermittlung der Oberflächentemperatur implementiert. Bei dieser Methode wird die Oberflächentemperatur durch Extrapolation bestimmt. Die Berechnung erfolgt durch die Messung von drei Temperaturen im Ausgleichsblock. Für die Extrapolation muss neben der gemessenen Temperatur der Abstand zwischen den einzelnen Thermometern bekannt sein. Zur mathematischen Beschreibung wird ein Polynom zweiter Ordnung genutzt. [2] Für die Messung der drei Temperaturen kommen pro Probe drei Pt100 Widerstandsthermometer zum Einsatz. Diese werden vor dem Einbau gealtert, vgl. Absatz

3.1. Da von einer eindimensionalen Wärmeleitung ausgegangen werden kann, sind die Thermometer axial und äquidistant zueinander angeordnet, siehe Abb. 6. In numerischen Berechnungen wurde sowohl das Aufheizverhalten als auch die Temperaturverteilung untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Die gewählte Heizleistung von $P = 800 \text{ W}$ sorgt dafür, dass die Zieltemperatur in $t = 20 \text{ min}$ erreicht wird. Der Ausgleichskörper wurde anhand der Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen auf eine Höhe von $h = 25 \text{ mm}$ ausgelegt. Die Höhe und Grundfläche ermöglichen es, die geforderte homogene Temperaturverteilung zu erreichen.

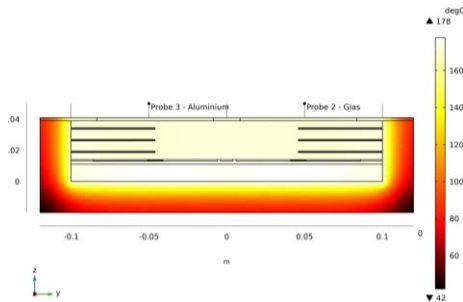


Abbildung 6 Simulation der Heiz- mit Ausgleichsplatte

Die Konzeptionierung des Probenhalters gewährleistet einen schnellen Wechsel der Proben. Dieser ist so gestaltet, dass die Probengeometrie und die Anordnung der Proben maßgeblich vorgegeben werden. Ein Wechsel des Probenhalters ermöglicht es, Proben unterschiedlicher Geometrie auf der gleichen Ausgleichsplatte zu untersuchen. Bei einem Wechsel der Geometrie muss deshalb ausschließlich der Probenhalter gewechselt werden. Vorgabe ist, dass eine große oder bis zu vier kleine Proben gleichzeitig untersucht werden können. Der Probenhalter ist so ausgelegt, dass dieser die Proben durch vorgespannte Federn auf die Ausgleichsplatte drückt. Somit gewährleistet der Probenhalter einen gleichmäßigen Anpressdruck der Proben. Der thermische Widerstand wird damit hinsichtlich der Kontaktkräfte reproduzierbar. Die Proben können sich gleichzeitig in alle Richtungen frei ausdehnen. Damit wird ein Durchbiegen oder Aufstellen der Proben vermieden. Die Aussparungen für die Proben sind, zur weiteren Reduzierung einer möglichen Abschattung, zusätzlich angeschragt.

2.4 Mess- und Automatisierungssystem

Der Prüfstand wird über ein Mess- und Automatisierungssystem gesteuert. Dabei ist auch eine Vollautomatisierung möglich, die eine vollständige Messreihe ohne Eingriff abarbeitet.

Alle Sensoren des Prüfstands werden über das Messsystem erfasst. Die erfassten Messwerte werden für die Automatisierung, Grenzwertüberwachung und die Darstellung verwendet. Es ist möglich, direkt im Messsystem alle notwendigen Analysen und Berechnungen vorzunehmen. Die Regelung der Heizplatte und der Kammer erfolgt über separate Temperaturregler, die über das Messsystem mit den Sollwerten versorgt werden. Die Regelventile für den

Druck lassen sich ebenfalls über das Messsystem ansteuern.

3 Aufbau und Inbetriebnahme der Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung wurde nach den Vorgaben des Konzepts gefertigt. Sie wird zurzeit montiert und soll in weiteren Untersuchungen vollständig messtechnisch beschrieben werden. Die Abbildung 7 zeigt den Aufbau der Prüfkammer. Neben der Druckkammer sind bereits das Heizsystem, die Messtechnik sowie die Vakuumtechnik installiert.

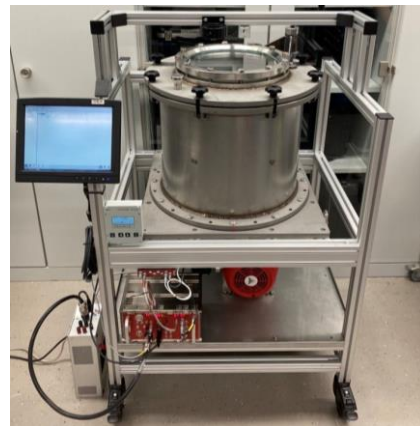


Abbildung 7 Aufbau des Prüfstandes mit Messtechnik, optischem Zugang und Vakuumpumpe

3.1 Dichtheitsprüfung - Vakuumtest

In ersten Untersuchungen wurde die Kammer auf Druckdichtigkeit untersucht. Dafür wurde die Kammer evakuiert. Die Messsignale für Druck und Temperatur wurden mit einem Absolut- und Differenzdrucksensor bzw. Widerstandsthermometern aufgezeichnet. Die Signalverläufe sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Druckkammer erreicht den geforderten Bereich des Grobvakuum und hält diesen Druckbereich konstant. Zudem ist der Einfluss auf die Temperatur während der Evakuierung und der anschließenden Druckbeaufschlagung zu erkennen. Die Prüfung der Dichtheit im Unterdruckbereich ist damit erfolgreich.

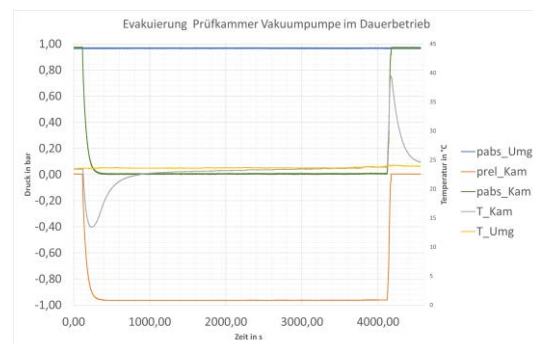


Abbildung 8 Druckverlauf in der Kammer für den Vakuumtest

3.2 Temperatursensoren

Für die unter Absatz 2.3 erläuterte Extrapolation zur Berechnung der Oberflächentemperatur kommen gealterte Widerstandsthermometer zum Einsatz. Der Alterungsprozess soll die Drift der Sensoren reduzieren und die Qualität der Referenztemperatur verbessern. Die Thermometer wurden dafür über 76 Zyklen, mit einer Haltezeit der Endtemperaturen von je einer Stunde, zwischen 50 und 200°C gealtert. Die obere Grenze wurde so gewählt, dass sie oberhalb der maximalen Arbeitstemperatur der Heizplatte (150°C) und unterhalb der maximalen Einsatztemperatur liegt. Somit werden die Sensoren beim Altern thermisch mehr gestresst als im Regelbetrieb [2]. Damit wird von keiner weiteren Drift im Arbeitsbereich ausgegangen. In den beiden Haltepunkten 50°C und 200°C wurde anschließend eine Auswertung der Temperaturdrift vorgenommen. Alle Sensoren weisen ein grundsätzlich sehr ähnliches Driftverhalten auf. Das Driftverhalten für den 200 °C Haltepunkt ist in Abbildung 9 dargestellt.

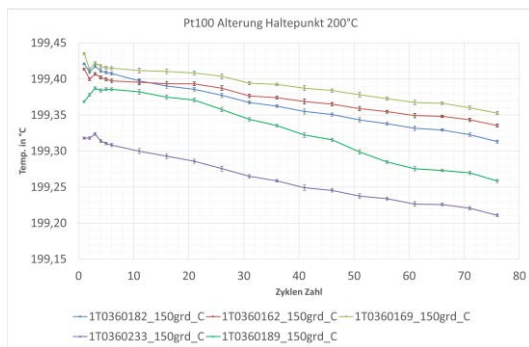


Abbildung 9 Drift der Sensoren beim Altern am Haltepunkt 200°C

Es ist eine kontinuierliche Drift zu erkennen, die auch nach 76 Zyklen nicht in Beharrung übergeht. In vergangenen Untersuchungen wurde ein ähnliches Driftverhalten, bei baugleichen Sensoren, nicht beobachtet. Die Ursache und wichtige Einflussfaktoren werden gegenwärtig analysiert. Im Hinblick auf die Differenztemperaturen und der daraus extrapolierten Referenztemperatur spielt dies nur eine untergeordnete Rolle, da durch eine gezielte Kombination der Sensoren die Differenz des Driftverhalten konstant gehalten werden kann, siehe Abb. 10.

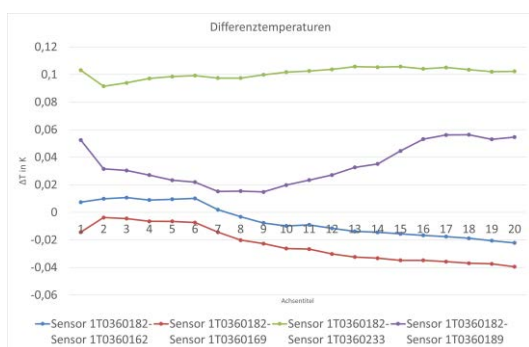


Abbildung 10 Differenztemperaturen am Haltepunkt 200°C

4 Ausblick

Der Prüfstand wird in weiteren Schritten in Betrieb genommen. Erste Untersuchungen sind bereits durchgeführt worden. Die Sensorik zur Bestimmung der Referenztemperatur wurde gealtert und wird nach den vorgestellten Ergebnissen weiter untersucht. Sofern sich keine Änderungen im Driftverhalten ergeben, werden die Sensoren in die Ausgleichsplatte geklebt. Nach der Inbetriebnahme des Prüfstands wird in weiteren Untersuchungen eine vollständige messtechnische Beschreibung des Prüfstands erfolgen. Dazu zählen vor allem die Prüfung der Dichtheit für den Überdruckbereich und die Validierung der beiden Referenzverfahren zur Ermittlung der Oberflächentemperatur. Des Weiteren wird thermographisch die Temperaturverteilung der Ausgleichsplatte untersucht. Auf die Weise lassen sich die durchgeführten numerischen Berechnungen plausibilisieren. Nach erfolgreicher Charakterisierung der Prüfstandseigenschaften kann dieser für die Grundsatzuntersuchungen zur Messung mittels temperatursensitiver Farben verwendet werden.

5 Literatur

- [1] Böckh, P.; Wetzel, T.: Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis. Springer Berlin Heidelberg, 7. Auflage, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55480-7>
- [2] Bernhard, F.: Handbuch der technischen Temperaturmessung. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-24506-0
- [3] U. Henne, C. Klein. Temperatursensitive Farbe (TSP) - Eine Methode zur Bestimmung des laminar-turbulenten Strömungsumschlags, Online-Artikel, DLR Institut für Aerodynamik und Strömungsmesstechnik. https://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-183/251_read-10575/ abgerufen am 08.10.2021
- [4] T. Liu, J. P. Sullivan, K. Asai, C. Klein, Y. Egami. Pressure and Temperature Sensitive Paints. In Buchreihe: Experimental Fluid Mechanics. 2. Auflage. Springer Verlag 2021
- [5] Bernhard, F.; Augustin, S.; u.a.: Kalibrierung von Tastfühlern für Temperaturmessungen an Oberflächen. In: PTB-Mitteilungen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Seite 347-355, Bd. 109, 1999. ISSN: 0030-834X
- [6] Bernhard, F.; Augustin, S., Lange, D.; Mammen, H.: Prüfeinrichtung für die statischen und dynamischen thermischen Messfehler von Oberflächen-Tast-Temperaturfühlern. In: Sensor; Vol. 4, Sensor-Kongress 8, Nürnberg, S. 219-224, 1997.
- [7] Dresler, C.: Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung von temperatur- und drucksensitiven Farben. Masterarbeit, Technische Universität Ilmenau, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach, 2021.
- [8] Baehr, H.D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Springer Berlin Heidelberg, 9. Auflage, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49677-0