

# Neuerscheinung der VDI-Richtlinie 3520 „Oberflächentemperaturmessung mit elektrischen Berührungsthermometern“ – Inhalte und Hintergründe der Erarbeitung

## New publication of the VDI guideline 3520 "Surface temperature measurement with electrical contact thermometers" - contents and background of the development

Dipl.-Ing. Silke Augustin, Dr.-Ing. Marc Schalles, TU Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 98693 Ilmenau, [silke.augustin@tu-ilmenau.de](mailto:silke.augustin@tu-ilmenau.de)

### Kurzfassung

Die Temperaturmessung mit Berührungsthermometern an der Oberfläche von Festkörpern besitzt im Gegensatz zur weit verbreiteten Messung in Fluiden ganz eigene messtechnische Eigenschaften, die die Genauigkeit und die Messunsicherheit der gemessenen Temperatur signifikant beeinflussen. Trotzdem existiert national und international keine Richtlinie, die sich mit dieser Thematik befasst. Im Richtlinienausschuss „VDI/VDE-GMA FA 2.52 Berührungsthermometrie“ wurde deshalb die neue VDI/VDE-Richtlinie 3520 „Oberflächentemperaturmessung mit Berührungsthermometern“ erarbeitet. Diese klassifiziert die berührenden Oberflächenthermometer, beschreibt deren wichtigste Kenngrößen und gibt Hinweise zur Charakterisierung der Thermometer. Es werden Testeinrichtungen zur Bestimmung der Kenngrößen dargestellt, die auch die Bestimmung der statischen und dynamischen Messabweichungen ermöglichen. Es werden typische Messergebnisse für verschiedene Anwendungsfälle gezeigt. Außerdem werden konkrete Beispiele von Datenblattangaben und Datenblättern angegeben, deren Nutzung eine bessere Vergleichbarkeit von Thermometern ermöglichen soll.

### Abstract

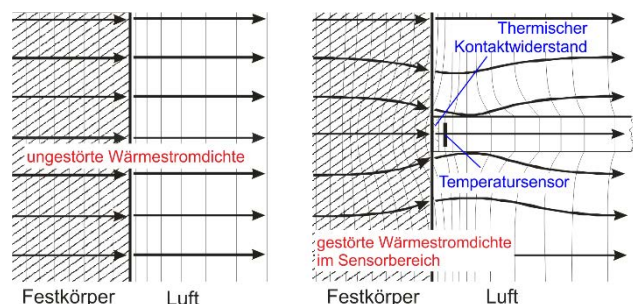
Temperature measurement at the surface of solids by means of contact thermometers has its own metrological characteristics, which is in contrast to the measurement in fluids. From this, follow specific static and dynamic measurement deviations and measurement uncertainty considerations. Up to now, no national or international guideline on this topic exists. Therefore, the committee "VDI/VDE-GMA FA 2.52 Contact Thermometry" has issued the new VDI/VDE guideline 3520 "Surface Temperature Measurement with Contact Thermometers". It classifies surface temperature probes and thermometers, describes the most important characteristic parameters and provides information for the characterization of the probes. Test equipment is described, which enables the estimation of the specific parameters as well as static and dynamic measurement errors. Typical measurement results are shown for various applications. To promote a better comparison of temperature probes by the users, examples of data sheets and indicated parameters are given.

## 1 Einleitung

Die Temperatur an der Oberfläche von Festkörpern kann sowohl berührungslos mit Strahlungsthermometern als auch mit Berührungsthermometern (typischerweise Widerstandsthermometer, Thermolemente) gemessen werden. Der Vorteil der berührungslosen Messungen liegt u.a. darin, dass die Oberflächentemperatur nur in sehr geringem Maß durch das Strahlungsthermometer beeinflusst wird und die Temperaturmessung auch bei hohen Temperaturen und bewegten Oberflächen stattfinden kann. Nachteilig ist die relativ hohe Messunsicherheit.

Bei der Messung mit Berührungsthermometern muss das Thermometer mit der zu messenden Oberfläche in mechanischen Kontakt gebracht werden. Dieses lässt sich durch wieder lösbare Klemmung oder Antasten realisieren. Ausschließlich auf Temperaturmessungen unter diesen Kontaktsituationen bezieht sich die VDI/VDE-Richtlinie 3520

„Oberflächentemperaturmessung mit Berührungsthermometern“. Messungen mit nicht lösbar befestigten Thermometern, wie beispielsweise die Einbettung in eine Oberfläche bzw. Anschweißen werden nicht betrachtet.



**Bild 1** Ungestörtes und durch das Thermometer gestörtes Temperaturfeld im Festkörper und der umgebenden Luft [1]

Ein auf eine Oberfläche aufgesetztes Thermometer beeinflusst das dortige Temperaturfeld. (Bild1). Aufgrund der dann lokal veränderten thermischen Kopplung der Oberfläche zur Umgebung und der dadurch veränderten Wärmeströme im Messobjekt resultiert für den Fall, dass Umgebungstemperatur und Messobjekttemperatur verschieden sind, eine gestörte Oberflächentemperatur  $T_{OG}(x,y,z,t)$ . Sie weicht um den Beitrag  $\Delta T_O(x,y,z,t)$  von der ungestörten Oberflächentemperatur ab. Dieser Beitrag ist der aus der thermischen Rückwirkung resultierende Anteil der thermischen Messabweichung bei der Ermittlung der Oberflächentemperatur. Er ist von der Ausführung des Oberflächenthermometers, dessen thermischer Kopplung zum Festkörper und der Kopplung des Festkörpers zu Wärmequellen/-senken abhängig. Bei dünnen Festkörpern wie Folien oder Rohrwandungen und geringer Wärmequellenergiebigkeit des umgebenden Mediums kann auch eine Störung der Temperatur  $T_M$  des zu messenden Mediums selbst erfolgen [2]. Die daraus resultierenden thermischen Messabweichungen hängen von den individuellen Gegebenheiten der Messung ab und werden nachfolgend beschrieben.

## 2 Messung der Oberflächentemperatur mit Berührungsthermometern

Für die Messung der Oberflächentemperatur können sowohl Tast- als auch Anlegethermometer verwendet werden. Tastthermometer werden in einen nicht-permanenten mechanischen Kontakt zum Messobjekt gebracht. Sie besitzen eine spezielle Halterung oder einen Handgriff, um sie auf die Oberfläche aufsetzen oder anpressen zu können. Oberflächenthermometer können auch dauerhaft oder zumindest über einen langen Zeitraum an Oberflächen befestigt sein. Bei diesen Anlegethermometern werden in der Regel an die Messsituation angepasste Befestigungselemente verwendet. Anlegethermometer werden zumeist an Rohrleitungen oder Behältern befestigt. Die Zielgröße dieser Messungen ist die Fluidtemperatur in deren Innerem. In selteneren Fällen erfolgt die Anwendung mit dem Ziel, die Wandtemperatur zu bestimmen [2].

Aufgrund der Differenz zwischen der zu messenden Temperatur (Festkörpertemperatur  $T_K$  bzw. Fluidtemperatur  $T_F$ ) und der Umgebungstemperatur  $T_U$  treten Messabweichungen auf,  $\Delta T_{th} = T_S - T_F$  bzw.  $\Delta T_{th} = T_S - T_K$ . Diese können sowohl statisch,  $\Delta T_{th} = \text{konst.}$ , oder dynamisch  $\Delta T_{th} = f(t)$ , sein.

### 2.1 Einflussgrößen auf die thermischen Messabweichungen

Zur Beschreibung der Wärmetransportbedingungen an der Messstelle dienen thermische Ersatzschaltbilder, die im stationären Fall durch die wirksamen thermischen Widerstände dargestellt werden (Bild 2). Dabei wird vereinfachend von einem eindimensionalen Wärmestrom  $\dot{Q}$  ausgegangen.

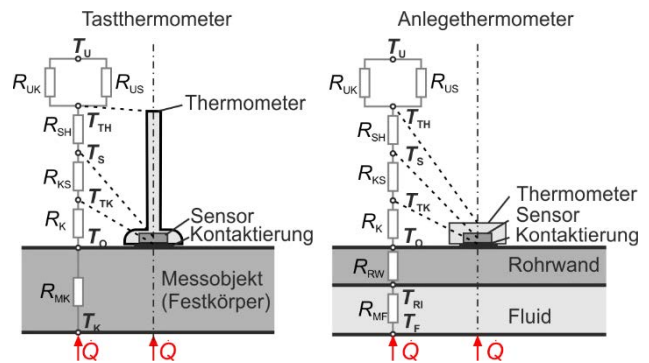


Bild 2 Thermische Ersatzschaltbilder

Die Größe der thermischen Widerstände hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab, die in [2] ausführlich beschrieben werden. Beispielsweise werden die Widerstände im Festkörper  $R_{MK}$  sowie der Rohrwand  $R_{RW}$  u.a. durch deren Abmessungen und die Wärmeleitfähigkeit ihrer Materialien beeinflusst. Beim thermischen Widerstand zwischen der Rohrwand und dem Fluid  $R_{MF}$  spielen u.a. die Strömungsbedingungen sowie die Abmessungen der Rohrleitung eine entscheidende Rolle.

Auch die Widerstände im Thermometer  $R_{SH}$  (zwischen Sensor und Thermometeroberfläche) und  $R_{KS}$  (zwischen Kontaktfläche des Thermometers und dem Sensor) hängen von Materialeigenschaften und Abmessungen ab. Sie sind bauartbedingt und können durch den Anwender nicht beeinflusst werden. Die Widerstände zur Umgebung  $R_{UK}$  (Wärmeübergangswiderstand durch Konvektion) und  $R_{US}$  (Wärmeübergangswiderstand durch Strahlung) können durch Isolation der Messstelle durch den Anwender verändert werden.

Der Kontaktwiderstand  $R_K$  zwischen der zu messenden und der Thermometeroberfläche beeinflusst die Messabweichung in der Regel am stärksten. Wesentliche Einflussfaktoren sind hier die Größe und die Rauheit der Kontaktflächen, Formabweichungen, der Anpressdruck bzw. -winkel, die Materialeigenschaften des Zwischenmediums, eventuelle thermische Abschirmungen der Kontaktfläche sowie das Temperaturfeld im Bereich der Kontaktfläche.

### 2.2 Auswirkung verschiedener Einflussgrößen auf Messungen

Das Zusammenspiel der Einflussgrößen bei einer Oberflächentemperaturmessung und damit deren Einfluss auf das Messergebnis hängt von der individuellen Messsituation und dem verwendeten Thermometer ab. Nachfolgend werden deshalb nur exemplarisch Messergebnisse gezeigt, die Einblicke in die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen bieten.

#### 2.2.1 Kontaktwiderstand

Messungen mit verschiedenen Rohranlegethermometern (A1 – A3) gleicher Bauform auf einem metallblanken Rohr (DN½", Heißdampf,  $T_F \approx 150^\circ\text{C}$ ) zeigten, dass sich die Messabweichung beim Einsatz von Wärmeleitpaste oder -folie als Zwischenmedium gegenüber den Messungen ohne

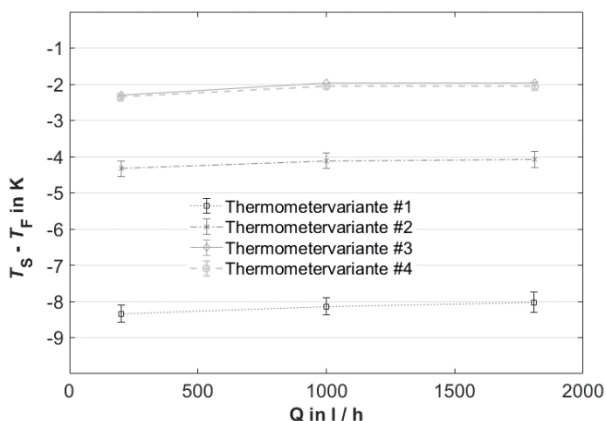
Zwischenmedium deutlich verringert (Tabelle 1). Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Verwendung von Wärmeleitpaste nicht immer eine günstige Lösung darstellt, da sie im Laufe der Einsatzzeit beispielsweise aushärtet und damit ihre messtechnischen Eigenschaften und somit die Messabweichung verschlechtern kann.

Wärmeleitpaste/-folie	$\Delta T_{A1}$ , K	$\Delta T_{A2}$ , K	$\Delta T_{A3}$ , K
ohne	-5,2	-4,7	-4,8
Folie	-3,0	-2,8	-3,2
Paste	-2,5	-3,1	-2,5

**Tabelle 1** Messabweichungen der Rohranlegethermometer A1 – A3 [3]

### 2.2.2 Thermometerbauform

Die statisch-thermische Messabweichung zwischen der Sensor- und der Fluidtemperatur bei Messungen mit Anlegethermometern unterschiedlicher Bauform ist in Bild 3 dargestellt. Sie wurden an einem mit Wasser durchströmten Rohr (s. Bild 7) verwendet. Deutlich zu erkennen sind die bauformbedingt unterschiedlichen thermischen Messabweichungen, die sich zusätzlich mit dem Volumenstrom  $Q$  des Wassers in der Rohrleitung verändern.



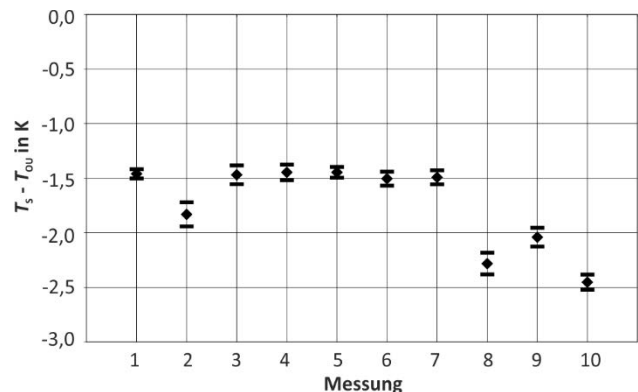
**Bild 3** Messabweichung in Abhängigkeit von der Thermometerbauform und dem Volumenstrom

### 2.2.3 Reproduzierbarkeit der Messungen

Mit der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Prüfeinrichtung wurden mit einem Tastthermometer und einem Prüfkörper aus Edelstahl Wiederholungsmessungen bei einer Kerntemperatur des Prüfkörpers von  $T_K = 200$  °C durchgeführt. Bild 4 zeigt das Ergebnis dieser Messungen [4]. Die mittlere Sensortemperatur  $T_S$  wurde nach dem Erreichen des stationären Zustandes ermittelt. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung als Maß der Schwankung der Messwerte während des stationären Zustands um diesen Mittelwert an. Trotz der guten Reproduzierbarkeit innerhalb der Einzelmessungen schwanken jedoch deren Mittelwerte beträchtlich in einem Intervall der Breite von ca. 1 K. Die Ursache hierfür liegt in der mit dieser Thermometer-

bauform und unter diesen Messbedingungen schlecht reproduzierbaren thermischen Kontaktierung und deren Auswirkung auf das Messergebnis.

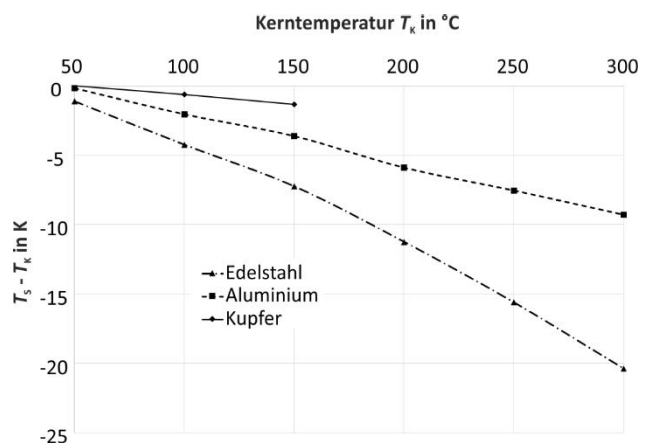
Auch bei Messungen mit Rohranlegethermometern treten vergleichbare Effekte auf. [4].



**Bild 4** Messabweichung bei mehrmaligem Antasten an eine Edelstahloberfläche

### 2.2.4 Material und Temperatur der Oberfläche des Festkörpers

Bei der stationären Messung an Festkörpern wird der Widerstand  $R_{MK}$  von der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers beeinflusst [2]. Je höher diese ist, umso besser kann Wärme aus dem Kern des Festkörpers zur Oberfläche geleitet werden. Dadurch verringert sich die Differenz  $T_O - T_K$  und bei gleichbleibenden Messbedingungen auch die Differenz  $T_S - T_K$ , also die thermische Messabweichung (Bild 5).



**Bild 5** Abweichung  $T_S - T_K$  bei Messung mit einem senkrecht auf Prüfkörper unterschiedlicher Materialien und Temperaturen aufgesetzten Kreuzbandthermoelement

## 3 VDI/VDE Richtlinie 3520 „Oberflächentemperaturmessung mit Berührungsthermometern“

Datenblätter der Hersteller von Oberflächenthermometern enthalten zumeist wenig Informationen zu den in Abschnitt 2 beschriebenen Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf das Messergebnis und die erreichbare Unsicherheit. Den Anwendern wird deshalb nicht immer klar, wie groß

die Messabweichungen sein können und welche Messunsicherheit bei welcher Thermometerausführung zu erwarten ist.

Aus diesem Grund wurde im Richtlinienausschuss „VDI/VDE-GMA FA 2.52 Berührungsthermometrie“ die Notwendigkeit gesehen, eine entsprechende Richtlinie zu erarbeiten, zumal keine nationalen oder internationalen Richtlinien, die auf die Messung der Oberflächentemperatur mit Berührungsthermometern eingehen, existieren.

Diese Richtlinie ergänzt Richtlinien des VDI/VDE zur Technischen Temperaturmessung mit elektrischen Berührungsthermometern. Ihr Inhalt hilft Anwendern von Oberflächenthermometern bei der Konzeption der Messstelle und bei der Auswahl und dem Vergleich von Thermometern. Hersteller von Oberflächenthermometern oder auch Kalibrierlabore werden bei der Ermittlung der Kennwerte von Oberflächenthermometern, bei der Konzeption von Messanordnungen zu deren Charakterisierung und Validierung und bei der Erstellung transparenter Datenblattangaben unterstützt.

Dafür wird im Dokument zunächst auf die Grundlagen der Temperaturmessung mit Berührungsthermometern eingegangen. Die Unterschiede der Bestimmung der Oberflächentemperatur gegenüber eintauchenden Messungen in Fluiden werden herausgearbeitet und die in Abschnitt 2 beispielhaft dargestellten Einflussgrößen ausführlich und anhand verschiedener Beispiele erläutert. Dabei wird auf die Spezifika von Tast- und Anlegethermometern eingegangen.

Für beide Thermometertypen werden die spezifischen Kenngrößen herausgearbeitet, die in die Thermometer charakterisierenden Dokumenten wie Datenblättern angegeben werden sollten. Außerdem werden die anzugebenden Messbedingungen für die Ermittlung dieser Kennwerte festgelegt.

Mögliche Prüf- bzw. Kalibriereinrichtungen für die Bestimmung der Kennwerte sind in der Richtlinie ebenfalls beschrieben. Im Anhang befinden sich Beispiele für Datenblätter entsprechend den Festlegungen der Richtlinie.

## 4 Prüf- und Kalibriereinrichtungen für Oberflächenthermometer

Die Kennwerte, die mit den in der Richtlinie beschriebenen Einrichtungen bestimmt werden, ermöglichen dem Anwender einen transparenten Vergleich der messtechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Oberflächenthermometer. Die Prüfeinrichtungen selbst stellen typische Anwendungsfälle der Oberflächentemperaturmessungen nach. Sie sollen dabei so aufgebaut werden, dass sie den Anforderungen der Richtlinie entsprechen.

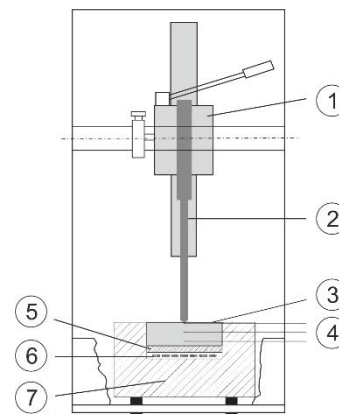
Unterschieden wird zwischen Einrichtungen mit planen oder gekrümmten Oberflächen.

### 4.1 Einrichtungen zur Messung an planen Oberflächen

Die Temperaturmessung an Festkörpern mit planen Oberflächen wird in der Regel mit Oberflächentastthermometern durchgeführt. Diese werden meist manuell auf die Oberfläche aufgesetzt – dadurch können Aufsetzkraft und –winkel und daraus abgeleitet der Kontaktwiderstand variieren. Auch der Temperaturverlauf im Festkörper wird je nach Material und Abmessungen durch das aufgesetzte Thermometer unterschiedlich beeinflusst. In der Richtlinie werden deshalb Prüfeinrichtungen zur Thermometercharakterisierung und Anforderungen an diese Einrichtungen, z.B. die Erzeugung eines möglichst eindimensionalen Wärmestroms, die Sicherstellung eines reproduzierbaren Aufsetzens des Thermometers und die Möglichkeiten zur Bestimmung der Referenztemperatur  $T_O$  an der Oberfläche, beschrieben.

Ein möglicher und international an metrologischen Instituten etablierter Aufbau einer solchen Prüf- und Kalibriereinrichtung ist in Bild 6 dargestellt [2].

Ähnliche Untersuchungsbedingungen können auch mit Hilfe spezieller Einsätze in Blockkalibratoren erreicht werden. Hier wird anstelle des üblichen, mit Bohrungen versehenen Kalibriereinsatzes, ein spezieller Einsatz mit freiliegende Oberfläche verwendet, auf die das zu prüfende Oberflächenthermometer aufgesetzt wird.



**Bild 6** Prüf- und Kalibriereinrichtung für Tastthermometer mit (1) senkrechter Führung mit Spann- und Absenkvorrichtung, (2) Prüfling (Oberflächentastthermometer), (3) Prüfkörper, (4) Mantelthermoelemente zur Bestimmung der Referenztemperatur, (5) Ausgleichsplatte, (6) Heizfolie, (7) Isolation

### 4.2 Einrichtungen zur Messung an gekrümmten Oberflächen

Für die Bestimmung der Kennwerte von Oberflächenthermometern, die für die Messung an gekrümmten Oberflächen vorgesehen sind (vor allem Rohranlegethermometer), eignen sich z.B. fluiddurchströmte Rohre, bei denen das Fluid die Rohrwand temperiert und die Fluidtemperatur die Referenztemperatur der Messung ist. Um hier eine möglichst homogene Temperatur im Rohrquerschnitt zu erzeugen, müssen turbulente Strömungsbedingungen vorliegen.



Beispielhaft zeigt Bild 7 eine Prüfeinrichtung für Anlegethermometer mit einer an einem Thermostaten angeschlossenen Rohrstrecke. Der Durchmesser der Rohrstrecke kann variiert werden, die Referenztemperatur im Fluid wird mit Hilfe eingebauter Widerstandsthermometer vor und nach der Prüfstrecke bestimmt.

Alternativ zu durchströmten Rohren können auch zylindrische Festkörper zur Bereitstellung einer Referenztemperatur verwendet werden [2].



**Bild 7** Prüfeinrichtung für Oberflächenthermometer zur Messung an gekrümmter Oberfläche

## 5 Ausblick

Die VDI/VDE Richtlinie 3520 wird im Jahr 2022 erscheinen. In ihr werden den Anwendern zunächst die Besonderheiten der berührenden Messung der Oberflächentemperatur an Festkörpern erläutert. Die Richtlinie beschreibt Kennwerte zur Charakterisierung von Oberflächenthermometern sowie Prüfeinrichtungen zur Bestimmung dieser Kennwerte. Sie bietet somit die Grundlage die messtechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Oberflächenthermometer miteinander vergleichen, Datenblätter zu Oberflächenthermometern erstellen und geeignete Messanordnungen konzipieren bzw. validieren zu können.

Bewusst wurde in der Richtlinie darauf verzichtet, Kalibriervorschriften für die Kalibrierung von Oberflächenthermometern zu erarbeiten. Diese Aufgabe hat seit Ende 2021 eine Untergruppe des DKD Fachausschusses „Temperatur und Feuchte“ übernommen.

## 6 Literatur

- [1] Bernhard, F. (Hrsg.): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2014
- [2] Entwurf VDI/VDE Richtlinie 3520: „Oberflächentemperaturmessung mit Berührungsthermometern“, VDI-Verlag GmbH, 2021
- [3] Pufke, M.; Fröhlich, T.: Einflussfaktoren auf die Messung mit Rohranlegethermometern. tm – Technisches Messen 2019; 86(S1): S67–S71, DE GRUYTER Oldenbourg, DOI 10.1515/teme-2019-0033
- [4] Bernhard, F. et.al: Calibration of contacting sensors for temperature measurements on surfaces. The 7<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements, Tempmeko 99, Proceedings I, S. 257-263, Juni 1999
- [5] Pufke, M.: Messtechnische Untersuchung von Rohranlegethermometern. Dissertation, TU Ilmenau, 2019. urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000255