

TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU



Masterarbeit

*Bestimmung der Messunsicherheiten bei der Temperaturmessung
mit Oberflächen-Tasttemperaturfühlern*

vorgelegt der
Fakultät für Informatik und Automatisierung

VON ROSTYSLAV SAMCHENKO

GEBOREN AM 30.05.1988 IN LWIWIW

Hochschulleiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich

Betreuer:

Dipl.-Ing. Silke Augustin

Dipl.-Ing. Helge Mammen

Datum der Ausgabe: 01.02.2010

Datum der Abgabe: 27.07.2010

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011200608

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meines Studiums als Teilstudent am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau.

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig durchgeführt habe. Alle Quellen, Hilfsmittel und Literatur sind als solche gekennzeichnet.

Inhaltverzeichnis

1	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	6
1.1	ALLGEMEINES OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSPRINZIP	6
1.2	PROBLEME DER OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSUNG	7
1.3	BAUFORMEN	9
1.4	HANDMESSUNGEN	9
1.5	KALIBRIEREINRICHTUNG	10
1.6	FEHLEREINFLÜSSE	13
2	PRÜFKÖRPER 15	
2.1	AUFBAU	15
2.2	BESTIMMUNG VON DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR	15
2.3	DAS MESSUNSICHERHEITSBUDGET DER PRÜFKÖRPER	16
3	THERMISCHER MESSFEHLER	20
3.1	ALLGEMEIN	20
3.2	DER ERSTE THERMISCHE TEILFEHLER	21
3.3	DER ZWEITE THERMISCHE TEILFEHLER	24
3.4	DER DRITTE THERMISCHE TEILFEHLER	30
4	WIDERSTANDSTHERMOMETER: PT100 UND NTC	35
4.1	Pt100	35
4.1.1	<i>Allgemein: Anwendungsbereich, Standard-Kennlinie</i>	35
4.1.2	<i>Bauform</i>	36
4.1.3	<i>Beschreibung der Messkette</i>	37
4.1.4	<i>Kalibrierung des Platinwiderstandsthermometers</i>	38
4.1.5	<i>Die Eigenerwärmung des Sensors</i>	42
4.1.6	<i>Einfluss der Leitungswiderstände</i>	47
4.1.7	<i>Einfluss der parasitären Thermospannungen</i>	45
4.1.8	<i>Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung mit Pt100-Fühler</i>	49
4.2	NTC	52
4.2.1	<i>Allgemein</i>	52
4.2.2	<i>Bauform</i>	53
4.2.3	<i>Beschreibung der Messkette</i>	54
4.2.4	<i>Kalibrierung des NTC-Fühlers</i>	51
4.2.5	<i>Berechnung der Kennlinienkoeffizienten</i>	55
4.2.6	<i>Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung mit NTC-Fühler</i>	58
5	DIE THERMOELEMENTE	61
5.1	ALLGEMEIN	61
5.2	BAUFORM	62
5.3	BESCHREIBUNG DER MESSKETTE	63
5.4	KALIBRIERUNG DES KREUZBAND-THERMOELEMENTS VOM TYP K	63
5.5	EINFLUSS DER VERGLEICHSTELLENTemperatur	65
5.6	MESSUNSICHERHEITSBUDGET FÜR DIE OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSUNG MIT KREUZBAND-THERMOELEMENT VON TYP K	67
6	DIE FEHLER DER GERÄTE	70
6.1	WIDERSTANDSMESSUNG	70
6.2	SPANNUNGSMESSUNG	72
7	ZUSAMMENFASSUNG	73
8	LITERATURVERZEICHNIS	74
9	ANHANG	75

Einleitung

Die Temperatur ist in vielen Bereichen der Natur und Technik von großer Bedeutung. Der größte Teil der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Stoffen sind mehr oder weniger temperaturabhängig. Bei Betriebs- und Herstellungsprozessen muss die Temperatur immer kontrolliert werden, auch als eine Einflussgröße oder Störgröße. Deshalb ist sie meist im Vordergrund und muss oft auch sehr genau bestimmt werden. [1]

Die Messung der Oberflächentemperatur kann als Spezialfall der Temperaturmessung in Festkörpern angesehen werden. Man kann die Oberflächentemperatur sowohl berührungslos mit Strahlungsmethoden, als auch mit Berührungsthermometern messen.

Die berührungslosen Methoden benutzt man zur Temperaturmessung von schlecht zugänglichen Objekten, z.B. wegen der Distanz, der Bewegung und ähnliche Faktoren.

Die Oberflächentemperatur bestimmt man meist aber mit der Hilfe von Berührungsthermometern, da sie billig und relativ einfach sind. Man unterteilt sie in Tast-Temperaturfühler und Fühler zur permanenten Befestigung an der Oberfläche.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Gruppe der Tast-Temperaturfühlern.

Durch die Einführung von genormten Qualitätssicherungssystemen entwickelt sich ein starker Bedarf an Prüfungen, Kalibrierungen und Zertifizierungen auch für Tast-Temperaturfühler. Da es bisher keine allgemeingültigen Vorschriften und Methoden gibt, beschränken sich solche Prüfungen meist auf die Bestimmung von Kennlinienfehlern der Temperatursensoren und der angeschlossenen Messgeräte ähnlich denen für Tauchtemperaturfühler [2]

Obwohl die Messung mit Tast-Temperaturfühlern nicht kompliziert scheint, existieren aber nicht zu vernachlässigende Fehler in der gesamten Messkette. Als Problem tritt auch die nicht rückwirkungsfreie Messung auf.

Es ist die Messungen objektiv durchzuführen, die Einflussfaktoren zu erkennen und mit der Hilfe von GUM („Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit der Messung“) in einer genormten Weise diese durch Messunsicherheitsbudget zu beschreiben.

Das richtige Benutzen bzw. Kalibrieren der Temperaturfühler dieser Gruppe gibt die Möglichkeit, billig, schnell und sogar genau die Temperatur an solchen Stellen, wo das Montieren eines permanenten Fühlers teuer, ungünstig oder unmöglich ist, z.B. Stichproben an Produkten, Messen bei den Kontrollgängen, zu bestimmen.

Aufgabestellung der vorliegenden Masterarbeit

Auf der am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau vorhandenen Prüfeinrichtung sind die Einflussgrößen bei der Temperaturmessung mit Tastrtemperaturfühlern verschiedener Bauformen und Sensortypen unter Berücksichtigung von Prüfkörpern aus verschiedenen Materialien zu beschreiben.

Es ist ein Messbudget mit allen zur Messunsicherheit beitragenden Komponenten der gesamten Messkette für manuelles Aufsetzen und mechanische Aufsetzvorrichtung zu erstellen.

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Allgemeines Oberflächentemperaturmessprinzip

Die Temperaturmessung mit Berührungsthermometern erfolgt durch einen direkten thermischen Kontakt mit dem Festkörper. Dabei strebt man das messtechnische Ziel an, dass die Sensortemperatur der zu messenden Temperatur entspricht ($T_S = T_M$).

Der Sensor wandelt seine eigene Temperatur T_S in eine weiter verarbeitbare Abbildungsgröße, z.B. den elektrischen Widerstand bei Widerstandsthermometern oder die Spannung für die Messung mit Thermoelementen.[1]

Die Erfassung der Oberflächentemperatur mit Tasttemperaturfühlern ist ein Sonderfall der Messungen mittels Berührungsthermometern. Zwar scheint diese Methode sehr einfach zu sein, aber das Ergebnis ist sehr fehlerbehaftet, weil der Fühler sich im Bereich von großen Temperaturgradienten befindet, wo die Wärmeableitung eine große Rolle spielt. Dazu kommen auch ungenügend reproduzierbare thermische Widerstände zwischen Sensor und Messobjekt und die Verfälschung des ursprünglichen Temperaturfeldes vom Messobjekt wegen der Änderung von Wärmetransportbedingungen nach dem Aufsetzen des Fühlers.

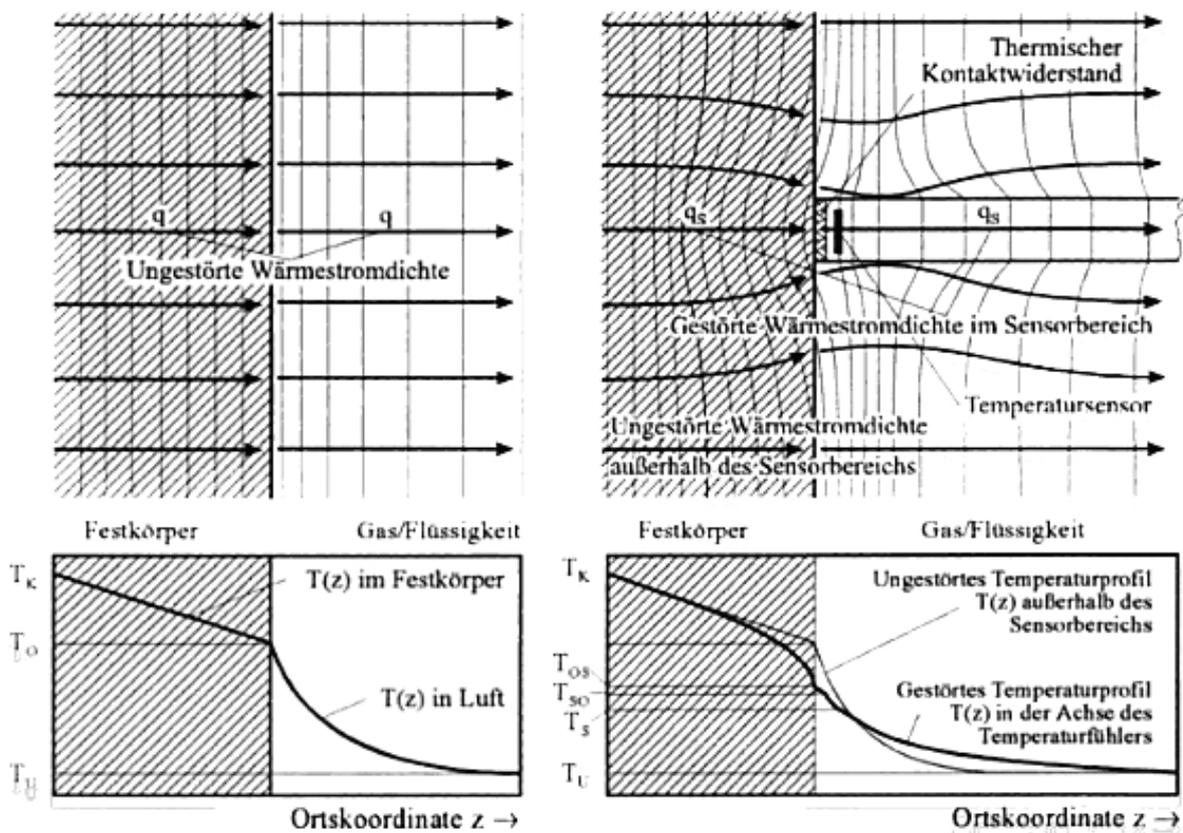


Abbildung 1.1.1 Schematische Darstellung der Wärmeströme, Isothermen, und Temperaturverläufe $T(z)$, ohne (links) und mit (rechts) aufgesetztem Tasttemperaturfühler [Quelle: [2]]

Die ungestörte Oberflächentemperatur T_O des Körpers ist von der Differenz der Kerntemperatur T_K und der Umgebungstemperatur T_U sowie von dem Wärmeübergangskoeffizienten α_M , der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ_M des Messobjekts und der Schichtdicke zwischen Kern und Oberfläche des Messobjekts d_M abhängig:

$$T_O = \frac{\lambda_M T_K + \alpha_M d_M T_U}{\lambda_M + \alpha_M d_M}$$

Die durch den aufgesetzten Temperaturfühler gestörte Oberflächentemperatur T_{OS} unterscheidet sich im Allgemeinen von der ungestörten Oberflächentemperatur ohne Sensor T_O .

Die Differenz zwischen Sensortemperatur T_S und der ungestörten Oberflächentemperatur T_O ist der **thermische Messfehler** (Rückwirkungsfehler)

$$\Delta T_{th} = T_S - T_O$$

Der Temperaturmessfehler ΔT_{th} ist annähernd proportional der ihn verursachenden Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebung, solange diese nicht sehr groß ist bzw. ihre Änderungen gegenüber einem Ausgangszustand klein bleiben:

$$\Delta T_{th} = T_S - T_O = B_S (T_U - T_O)$$

Für die Sensortemperatur ergibt sich daraus analog:

$$T_S = (1 - B_S) T_O + B_S T_U$$

Der Kopplungsfaktor B_S ist ein Verhältnis von thermischen Widerständen: [1]

$$B_S = \frac{T_S - T_O}{T_U - T_O}$$

Neben dem statisch-thermischen Messfehler ist auch das dynamische Verhalten, d.h. die notwendige Einstellzeit nach dem Aufsetzen des Tasters zu beachten.

1.2 Probleme der Oberflächentemperaturmessung

Die wichtigsten Faktoren, die bei der Oberflächentemperaturmessungen große Fehler verursachen, sind:

- Eine Änderung der thermischen Energiebilanz des Messobjektes durch das Berührungsthermometer (Rückwirkung);

- Die thermische Kopplung des Temperatursensors nicht nur mit dem Messobjekt, sondern auch mit einer Umgebung, deren Temperatur T_U von der Temperatur des Messobjekts T_M abweicht;
- Eigenerwärmung bei den Widerstandsthermometern durch eine im Sensor umgesetzte Leistung;

Vorzeichen und zeitlicher Verlauf thermischer Messfehler werden beeinflusst von:

- Der Wärmebilanz und Wärmetransportbedingungen innerhalb des Messobjektes;
- Wärmetransportbedingungen zwischen Messobjekt und Berührungsthermometer;
- Den Wärmetransportbedingungen innerhalb des Berührungsthermometers;
- Den Wärmetransportbedingungen zwischen dem Berührungsthermometer bzw. dem Temperatursensor und seiner Umgebung;
- Der im Sensor umgesetzten Leistung;
- Der Differenz zwischen den Temperaturen des Messobjektes und der Umgebung.

Mit der Hilfe des elektrothermischen Modells kann der Prozess vor und nach dem Aufsetzen veranschaulicht werden.

Auf der Abbildung 1.2.1 wird die Rückwirkung des aufgesetzten Temperaturfühlers auf das Messobjekt durch Ersatz des Teilwiderstandes R_{AZ} für den Wärmeübergang des Messobjektes an die Umgebung durch die thermischen Widerstände des aufgesetzten Fühlers dargestellt. Zu diesen gehört der Kontaktwiderstand R_K zwischen Oberfläche und Temperaturfühler, ein Widerstand R_S zwischen Kontaktfläche des Temperaturfühlers und dem Temperatursensor, ein Wärmeleitwiderstand R_{SF} zwischen Temperatursensor und Halterung bzw. Handgriff des Temperaturfühlers und ein Übergangswiderstand von Halterung und Handgriff zur Umgebung – beide zunächst zu R_F zusammengefasst. [1]

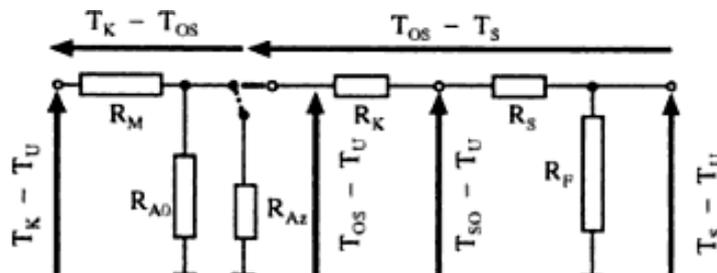


Abbildung 1.2.1 Thermisches Modell der Oberflächentemperaturmessung [Quelle:[1]]

Der Kontaktwiderstand kann durch solche Maßnahmen, wie die Auswahl der passenden Aufsetzkraft und des -winkels, Füllung der Luftzwischen-schicht zwischen der Fühlerkontaktfläche und der Messobjektoberfläche mit einem gut wärmeleitenden Material (Wärmeleitpaste, Graphitpulver), kleiner gemacht werden. Auch die Verringerung des Einflusses der Wärmeableitung bzw.

Wärmezufuhr durch die Auswahl der passenden thermischen Isolation des Fühlers hilft, den thermischen Messfehler deutlich kleiner zu machen.

1.3 Bauformen

Tast-Temperaturfühler teilt man nach der Bauform in drei Gruppen:

1. gefederte und ungefederte Ausführungen und mit starrem Kontaktplättchen (meist für glatte Oberflächen);
2. bandförmige federnde Temperatursensoren (am häufigsten Thermoelemente), die sich auch leicht unebenen Oberflächen anpassen;
3. federnde dünne Thermoelement-Blätter, die flach und relativ großflächig an die Oberfläche gedrückt werden können[[1] S.129]

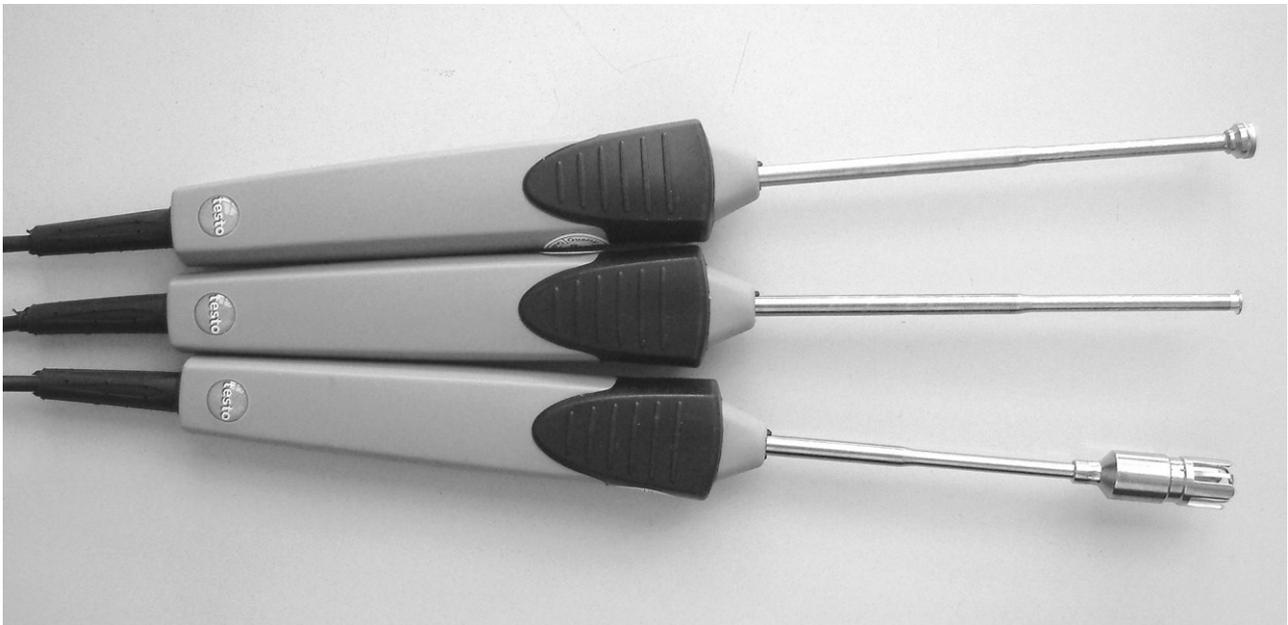


Abbildung 1.3.1 Die Bauformen der untersuchten Fühler: oben – Pt100, mitten – NTC, unten – Typ K

In dieser Arbeit werden zwei Tastfühler der ersten Gruppe (Pt100- und NTC-Sensor) und ein Typ K Kreuzband-Thermoelement aus der zweiten Gruppe untersucht. Diese sind auf der Abbildung 1.3.1 dargestellt.

1.4 Handmessungen

Typische Messaufgaben, die mit Oberflächen-Tasttemperaturfühlern gelöst werden sollen, sind technologisch erforderliche Stichproben an Produkten, an Werkstücken zur Temperaturkorrektur in der Fertigungsmesstechnik, an Maschinen und Armaturen bei Kontrollgängen sowie Kontrollmessungen für Strahlungsthermometer.[[1] S.128]

Bei den oben genannten Anwendungen erfolgt in der Regel ein manuelles Aufsetzen des Fühlers durch den Anwender auf die zu messende Oberfläche. Dabei kann man ein „Wackeln“ des Messwerts wegen der unvermeidlichen Verkippungen, Änderungen der Anpresskraft und des Anpresswinkels des aufgesetzten Fühlers feststellen, welches durch die ständige Änderung des Kontaktwiderstandes zwischen Sensor und Messobjektsoberfläche verursacht wird. Die Größe dieser Temperaturschwankungen ist auch von dem konstruktiven Aufbau des Fühlers abhängig.

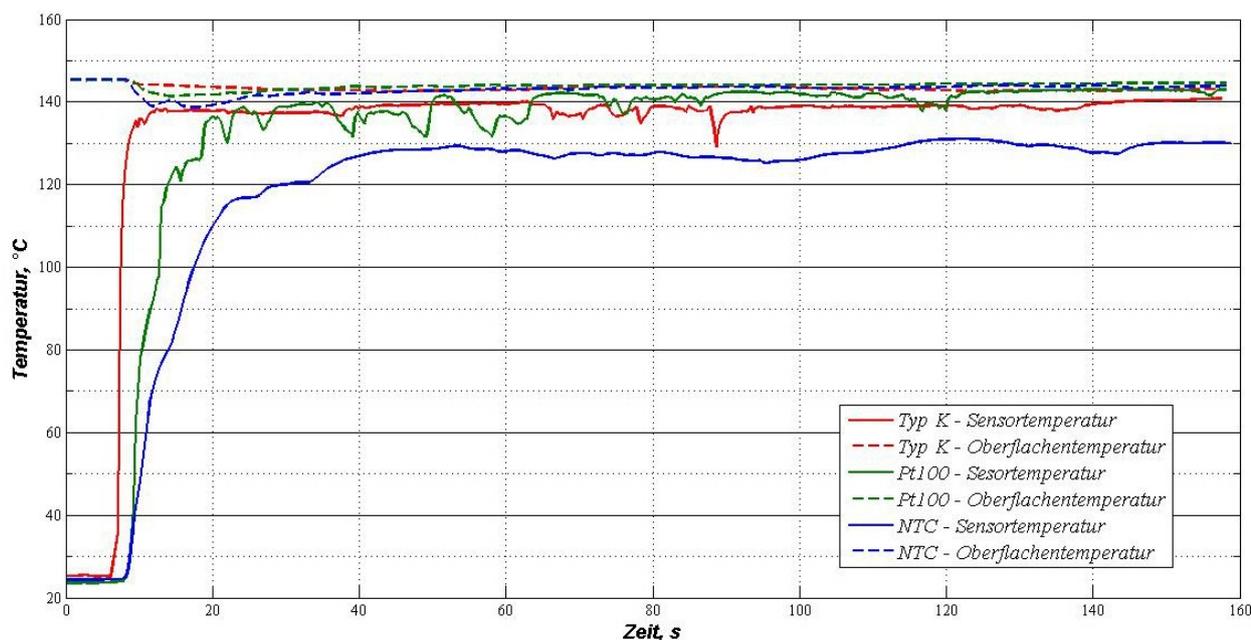


Abbildung 1.4.1 Handmessungen mit unterschiedlichen Fühlerbauformen

Man sieht auf der Abbildung 1.4.1, dass die Handmessung mit Oberflächen-Tasttemperaturfühlern wenig reproduzierbar und subjektiv ist. Für den Messwert nimmt man oft den Maximalwert der Messung. Das dynamische Verhalten kann dabei überhaupt nicht reproduziert werden.

Selbstverständlich ist auch, dass bei solcher schlechten Reproduzierbarkeit mit den Handmessungen keine Kalibrierung der Fühler durchgeführt werden kann.

In den Anhängen Abbildung A. 2 und Abbildung A. 3 sind die Messabweichungen bei der Handmessung mit den Messungen mit der Hilfe von der Anpressvorrichtung verglichen.

1.5 Kalibriereinrichtung

Das Ziel der Kalibrierung besteht darin, unter weitergehend bekannten oder reproduzierbaren Bedingungen wie z.B.:

- Einstellbare Oberflächen- bzw. Kerntemperatur;
- Umgebungstemperatur, Umgebungsbedingungen (Prüflabor);
- Senkrechte Einspannung und Führung;
- Aufsetzkraft;

- Abmessungen, Material und Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes

vergleichbare Kennwerte für den statischen Gesamtfehler bzw. den thermischen Messfehler von senkrecht aufgesetzten Tastfühlern zur Oberflächentemperaturmessung experimentell zu bestimmen.

In dieser Arbeit werden die Messunsicherheiten bei der Temperaturmessung mit Oberflächen-Tasttemperaturfühler mit der Hilfe einer speziellen Prüfeinrichtung, die für die Bestimmung der thermischen Messfehler von solchen Fühlern für verschiedene Einsatzbedingungen geeignet ist, untersucht.

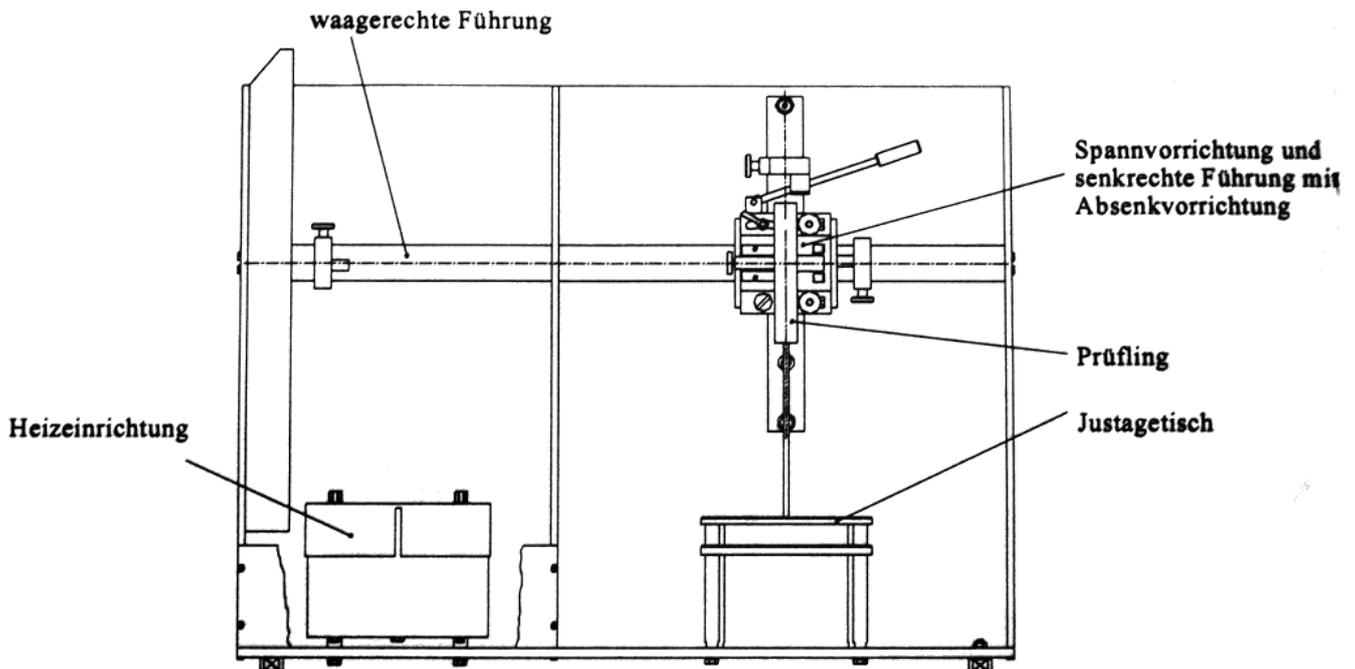


Abbildung 1.5.1 Aufbau der Prüfeinrichtung [Quelle: [2]]

Auf der linken Seite der Prüfeinrichtung (Abbildung 1.5.1) befindet sich die Heizeinrichtung, mit der die Kalibrierung der Temperaturfühler erfolgt.

Auf der rechten Seite werden die zu prüfenden Temperaturfühler eingespannt und in der entsprechenden Höhe der Heizeinrichtung positioniert. Je nach Anforderungen können die Fühler mit einem Aufsetzwinkel im Bereich von $0 \dots 10^\circ$ bzw. mit definierten Massestücken für eine Aufsetzkraft von 5 bzw. 10 N montiert werden.

Die gesamte Prüfeinrichtung ist durch ein Gehäuse von störenden Umgebungseinflüssen nach drei Seiten abgeschirmt. Nur der vordere Teil ist offen, um eine gute Montagemöglichkeit zu gewährleisten. Die Heizeinrichtung kann auch durch Einschieben einer zusätzlichen Platte von vorn geschlossen werden.

An der linken Seitenwand sind die drei Thermoelemente, die sich in den Heizeinrichtung befinden, befestigt und abgeschirmt zum Schutz vor Strahlung bei hohen Temperaturen.

Zur Prüfeinrichtung gehört ein externes Gerät (Elektronikbaugruppe), darin befinden sich u.a.:

- Zwei Trennstelltransformatoren, die die Spannung für die Heizeinrichtung (0...60 V, in Stufen von 15 V einstellbar) zur Verfügung stellen;
- Ein Grenzwertmelder, mit dem eine maximale Einsatztemperatur begrenzt werden kann;
- Ein Regler für die Heizeinrichtung.

Zusätzlich werden verschiedene Geräte zur Messung und Verarbeitung der Ausgangssignale der Temperatursensoren benötigt (ggf. Digitalmultimeter, Messstellenumschalter, Vergleichsstelle für Thermoelemente, PC). [[2] S. 10-11]

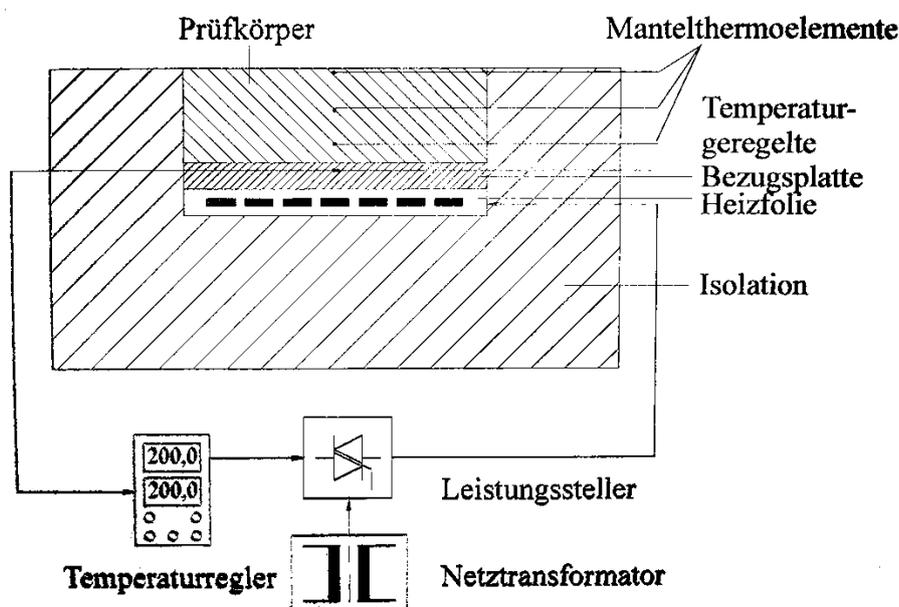


Abbildung 1.5.2 Aufbau der Heizeinrichtung [Quelle: [2] S. 13]

Der Aufbau der Heizeinrichtung ist in der Abbildung 1.5.2 dargestellt. Der Temperaturbereich beträgt 50...500 °C. Die dazu notwendige Heizleistung wird durch eine industrielle Heizfolie, mit der eine maximale Temperatur von 600 °C erreicht werden kann, bereitgestellt. Die Temperatur wird mit einem industriellen Regler geregelt. In der Heizfolie befindet sich ein Thermoelement zur Überwachung der Grenztemperatur der Prüfeinrichtung (550 °C).

Über der Heizfolie liegt die temperaturgeregelte Bezugsplatte. Beide Teile sind von unten und seitlich durch Keramik isoliert. In der Bezugsplatte befinden sich zwei Thermoelemente im Winkel 90° zueinander angeordnet, die Spitzen liegen in der Mitte der Bezugsplatte. Ein Fühler dient als Reglerthermoelement, der zweite erfasst die Temperatur der Bezugsplatte. [[2] S 13]

Durch die Heizung der Bezugsplatte von 75 mm Durchmesser und durch eine unten und außen angeordnete thermische Isolation wird erreicht, dass in einer Messzone mit einem Durchmesser von ca. 20 mm keine störenden radialen Temperaturgradienten auftreten.

Auf die Bezugsplatte können passive Prüfkörper aus unterschiedlichen Materialien und mit einem Durchmesser von 75 mm und bis zu einer Dicke von 25 mm angebracht werden. In eingebautem Zustand sind die passiven Prüfkörper seitlich von einer aufsetzbaren Keramikisolation umgeben.

Dadurch kann zusätzlich zu Aufsetzwinkel, Anpressdruck u.ä. auch die Abhängigkeit der thermischen Messfehler von Wärmeleitfähigkeit λ_M und Dicke d_M des Messobjektes bestimmt werden, sowohl an vereinbarten Standardprüfkörpern z. B. aus Kupfer, Aluminium oder Stahl als auch an Prüfkörpern, die nach Material, Aufbau und Oberflächenrauigkeit einem realen Messobjekt entsprechen. [[2] S. 13]

Die Standardprüfkörper haben unterschiedliche Einsatztemperaturen, diese sind aus der Tabelle 1.5.1 zu entnehmen:

Tabelle 1.5.1 Arbeits- und Maximaltemperaturen der Prüfkörper [Quelle: KfürOT S 14]

Material des Prüfkörpers	Maximale Einsatztemperatur [°C]	Oberer Grenzwert [°C]
Bezugsplatte	500	550
Edelstahl	500	550
Aluminium	300	450
Kupfer	200	250

1.6 Fehlereinflüsse

Der gesamte systematische Messfehler setzt sich zusammen aus dem thermischen Messfehler ΔT_{th} , dem eigentlichen Messfehler des Sensors ΔT_S und dem Messfehler der verwendeten Messgeräte ΔT_M :

$$\Delta T = \Delta T_{th} + \Delta T_S + \Delta T_M$$

Wie oben schon erwähnt wurde, ist der **thermische Fehler** ΔT_{th} gleich der Differenz zwischen Sensortemperatur T_S und ungestörten Oberflächentemperatur T_O :

$$\Delta T_{th} = T_S - T_O$$

Laut der Verfahrensbeschreibung „Kalibrierung von Oberflächen-Tasttemperaturfühlern“ kann der thermische Messfehler nur dann bestimmt werden, wenn die Summe von anderen Fehlern deutlich weniger als ΔT_{th} ist:

$$\Delta T_S + \Delta T_M \ll \Delta T_{th}$$

Der **eigentliche Messfehler des Sensors** ΔT_S beinhaltet die Sensorkalibrierfehler und die Messfehler, die hauptsächlich von dem Sensortyp abhängig sind. Das kann z.B. bei der Messung mit Widerstandsthermometern der für ihn typische Eigenerwärmungsfehler sein.

Der **Messfehler der verwendeten Messgeräte** ΔT_M hängt von der Auswahl des Messdatenerfassungssystems ab und setzt sich zusammen aus den eigenen Fehlern des Messgerätes, wie z.B. sein Kalibrierfehler und den Fehlern durch begrenzte Auflösung u.ä.

2 Prüfkörper

2.1 Aufbau

Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau stehen homogene Prüfkörper aus Edelstahl ($\lambda_{20^\circ\text{C}} \approx 15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), Aluminium ($\lambda_{20^\circ\text{C}} \approx 220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) und Kupfer ($\lambda_{20^\circ\text{C}} \approx 390 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) mit einem Durchmesser von 75 mm und einer Dicke von 25 mm zur Verfügung. Die Oberflächenrauigkeit entspricht $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$.

Zur Oberflächentemperaturbestimmung sind in den Prüfkörpern von der Seite bis zur Mittelachse drei Mantelthermoelemente Typ J mit 1 mm Durchmesser, in einem Abstand zur Prüfkörperoberfläche von 1,5; 11 und 20,5 mm sowie einer Einbaulänge von 38 mm eingebaut.

Mit der Prüfeinrichtung und der Messmethodik können auch kunden- bzw. anwendungsspezifische Prüfkörper mit gleichem Durchmesser benutzt werden. [[2] S. 6,13]

Als Vergleichsstelle für die Thermoelemente kann eine Eispunkt-Vergleichsstelle oder ein elektronischer Vergleichstellenthermostat verwendet werden.

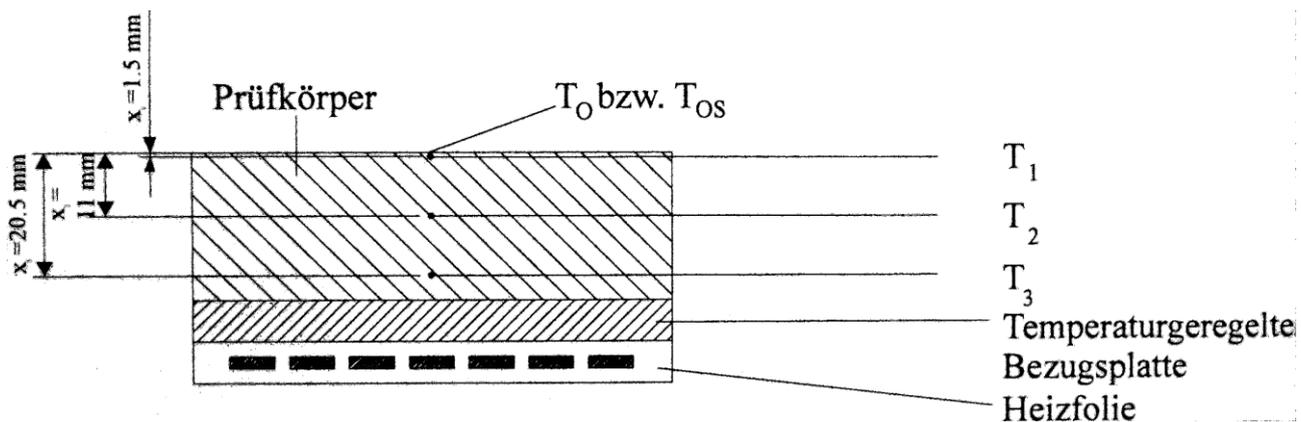


Abbildung 2.1.1 Lage der Thermoelemente im Prüfkörper [Quelle: [2] S. 13]

2.2 Bestimmung von der Oberflächentemperatur

Für vorhandene Prüfkörper kann die ungestörte bzw. gestörte Oberflächentemperatur (T_o bzw. T_{os}) mit Hilfe der Extrapolation aus den Temperaturen T_1 , T_2 und T_3 von den drei im Prüfkörper angeordneten Thermoelementen bestimmt werden. Die Information ist aus der Verfahrensbeschreibung „Kalibriereinrichtung für Oberflächen-Tasttemperaturfühlern“ entnommen. [2]

Die Extrapolation wird nach einer quadratischen Gleichung durchgeführt, um durch die Bestimmung des nichtlinearen Anteils ein Maß für die Güte der Extrapolation zu haben. Die Größen x_1 , x_2 und x_3 entsprechen den Abständen der Thermoelemente von der Oberfläche.

$$T = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2$$

mit: $T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}$ sowie: $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$

Aus der **Grundgleichung** können die Gleichungen zur Bestimmung der Oberflächentemperatur (T_O entspricht Koeffizient a_1), des Anstieges (k entspricht Koeffizient a_1) sowie des nichtlinearen Anteils (N entspricht a_3) abgeleitet werden.

- **Bestimmung der Oberflächentemperatur T_O [K]:**

$$T_O = T_1 \cdot A_1 + T_2 \cdot B_1 + T_3 \cdot C_1 \quad (2-1)$$

mit: $A_1 = 1,2493$ $B_1 = -3,4072 \cdot 10^{-1}$ $C_1 = 9,1413 \cdot 10^{-2}$

für die oben angegebene Position der Thermoelemente.

- **Bestimmung der Anstieges k [K/mm]:**

$$k = T_1 \cdot A_2 + T_2 \cdot B_2 + T_3 \cdot C_2 \quad (2-2)$$

mit: $A_2 = -1,7452 \cdot 10^{-1} 1/mm$ $B_2 = 2,4377 \cdot 10^{-1} 1/mm$ $C_2 = -6,9252 \cdot 10^{-2} 1/mm$

für die oben angegebene Position der Thermoelemente

- **Bestimmung der Nichtlinearität N [K/mm²]:**

$$N = T_1 \cdot A_3 + T_2 \cdot B_3 + T_3 \cdot C_3 \quad (2-3)$$

mit: $A_3 = 5,5402 \cdot 10^{-3} 1/mm^2$ $B_3 = -1,108 \cdot 10^{-2} 1/mm^2$ $C_3 = 5,5402 \cdot 10^{-3} 1/mm^2$

für die oben angegebene Position der Thermoelemente. [[2] S. 21-22]

2.3 Das Messunsicherheitsbudget der Prüfkörper

Die Unsicherheit δT_O der berechneten ungestörten Oberflächentemperatur setzt sich zusammen aus:

- der Messunsicherheit δT_i der drei Temperaturen T_1 , T_2 und T_3 ;
- einem Anteil δT_Z von zeitlichen Temperaturänderungen;
- einem Anteil δT_U aus Änderungen der Umgebungstemperatur und der Umgebungsbedingungen;
- sowie δT_{NL} aus Nichtlinearitäten im Temperaturprofil.

Die Messunsicherheit der Temperatur δT_i kann wie folgt berechnet werden:

$$\delta T_O = \delta T_i + \delta T_Z + \delta T_U + \delta T_{NL} \quad (2-4)$$

$$\delta T_{i,i} = \delta T_{Kal,i} + \delta T_{M,i} + \delta T_{VS,i} + \delta T_{th} \quad (2-5)$$

δT_{Kal} - die Messunsicherheit aus der Kalibrierung der Thermoelemente wird mit [[2] S.7]:

$$\delta T_{Kal} = 0,3K \quad \text{für} \quad T_i < 100^\circ C \quad (2-6)$$

$$\delta T_{Kal} = 0,003 \cdot T_i \quad \text{für} \quad 100^\circ C < T_i < 333,3^\circ C$$

angenommen. Dabei sind auch die Inhomogenitäten der Thermoelemente berücksichtigt (Biegung der Thermoelemente im Bereich von großen Temperaturgradienten)

$\delta T_{M,i}$ - setzt sich zusammen aus den Messunsicherheiten der Thermospannungsmessung mit dem Digitalmultimeter Agilent34970A mit 20-Kanal Multiplexereinschub HP34901A:

- die Unsicherheit aufgrund begrenzter Auflösung des Multimeters;
- die Unsicherheit der Kalibrierung des Multimeters;

δT_{th} - Unsicherheit durch bei der Kalibrierung nicht berücksichtigte thermische Messfehler zwischen der „ungestörten“ Temperatur T_i im Prüfkörper und der entsprechenden Temperatur des Thermoelements. Dieser Anteil wird wie folgt abgeschätzt:

$$\delta T_{th} = 0,001 \cdot (T_i - T_U) \quad (2-7)$$

Den Beitrag der 3 Thermoelemente zur Unsicherheit der extrapolierten Oberflächentemperatur enthält man durch die Multiplikation mit [vgl. [1] S.7]:

$$\delta T_i = |A_1| \cdot T_{i,1} + |B_1| \cdot T_{i,2} + |C_1| \cdot T_{i,3}$$

wobei $\delta T_{i,i}$ die Messunsicherheit der Temperatur von jedem einzelnen Thermoelement ist.

Der Beitrag der Nichtlinearität des Temperaturprofils wird nach der Formel (2-3) berechnet.

$$\delta T_{NL} = |N| \cdot x_{1_i}^2$$

Messunsicherheitsbudget für den Aluminiumprüfkörper

Für alle untersuchten Temperaturen des Messobjektes $T_K = 85^\circ C$, $150^\circ C$ und $300^\circ C$ wurden die Messunsicherheitsbudgets aufgestellt. Das Prinzip der Unsicherheitsberechnung ist in allen Fällen gleich. Als Beispiel wird Messunsicherheitsbudget für Aluminiumprüfkörper bei der Kerntemperatur des Messobjektes $T_K = 150^\circ C$ detailliert betrachtet.

Durch die oben genannte Formel (2-4) und (2-5) wird das Model zur Darstellung von Oberflächentemperatur definiert.

$$T_O = T_{OExtr} + \delta T_i + \delta T_Z + \delta T_U + \delta T_{NL}$$

T_O ist die tatsächliche Oberflächentemperatur.

T_{OExtr} ist die mit Hilfe der Formel (2-1) bestimmte Oberflächentemperatur.

Die gesamte Messunsicherheit umfasst auch die Unsicherheiten von den drei im Prüfkörper montierten Mantelthermoelementen.

Der Mittelwert der Temperatur von Thermoelementen wurde aus 4 Messreihen je 20 Messungen bestimmt. Unter Annahme der Normalverteilung wird der Schätzwert T_i und die Unsicherheit $u(T_i)$ für $i = 3$ Thermoelemente berechnet und in der Tabelle unten angegeben:

i	T_i	$u(T_i)$
1	147.155	0.007
2	147.359	0.006
3	147.464	0.010

Laut der Verfahrenbeschreibung „Kalibriereinrichtung für Oberflächen-Tasttemperaturfühler“ wurde die Messunsicherheit aus der Kalibrierung der Thermoelemente δT_{Kal} für den Messbereich $T_i < 100^\circ C$ für Mantelthermoelemente unter Annahme von Normalverteilung der Mittelwert $\delta T_{Kal, i}$ und die Unsicherheit als $u(\delta T_{Kal, i})$ definiert:

i	$\delta T_{Kal, i}$	$u(\delta T_{Kal, i})$
1	0.000	0.441
2	0.000	0.442
3	0.000	0.442

Durch die Vergleichsstellentemperaturkontrolle im Abschnitt 5.5 wurde festgestellt, dass die Vergleichsstellentemperatur nicht Null ($T_{VS} = 0.07^\circ C$) ist. Dabei muss eine Korrektur aufgrund des Einflusses der Vergleichsstellentemperatur beachtet werden. Es wird eine Rechteckverteilung angenommen. Der Mittelwert beträgt für **alle drei** Mantelthermoelemente $\delta U_{VS, i} = 3,5268 \mu V$. Die maximale Abweichung von dem tatsächlichen Wert beträgt $0,2519 \mu V$ und somit wurde die Unsicherheit als $u(\delta U_{VS, i}) = 0,145 \mu V$ definiert. Der Thermospannungswert kann danach durch die Multiplikation mit einem Sensitivitätskoeffizienten $S(U) = 0,019 K/\mu V$ in die Temperatur umgerechnet werden.

Die Unsicherheit, die als Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters δT_{MKal} zu berücksichtigen ist, ist im dazugehörigen Datenblatt angegeben. Diese Unsicherheit wurde im Abschnitt 6.2 als Spannungswert bestimmt. Diese ist in einen Temperaturwert durch die Multiplikation mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten $S(U)$ umzurechnen. Es wurde eine Rechteckverteilung angenommen. Der Schätzwert für jedes Mantelthermoelement beträgt $\delta U_{MKal} = 0 \mu V$. Ihm entspricht eine Unsicherheit $u(\delta U_{MKal}) = 2,802 \mu V$ und ein Empfindlichkeitskoeffizient $S(U) = 0.019 K/\mu V$.

Unsicherheit durch bei der Kalibrierung nicht berücksichtigte thermische Messfehler zwischen der „ungestörten“ Temperatur T_i im Prüfkörper und der entsprechenden Temperatur des Thermoelements δT_{Th} wird durch eine Formel (2-7) oben beschrieben. Der Schätzwert beträgt dabei für jedes Mantelthermoelement $\delta T_{Th} = 0 \text{ K}$. Unter Annahme der Rechteckverteilung ist die Unsicherheit entsprechend $u(\delta T_{Th}) = 0,071 \text{ K}$.

Für die Unsicherheit der zeitlichen Instabilität wird $u(\delta T_t) = 0,05 \text{ K}$ vorgeschlagen. Es wurde Rechteckverteilung angenommen.

Für den Unsicherheitsanteil durch sich zeitlich ändernde Umgebungsbedingung wird mit der Annahme der Rechteckverteilung $u(\delta T_U) = 0,05 \text{ K}$ angenommen.

Tabelle 2.3.1 Messunsicherheitsbudget für den Aluminiumprüfkörper bei der Kerntemperatur von $T_K=150 \text{ °C}$

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{3,M}$	147.464	0.010	Normal	1	0.010
δT_{Kal}	0.000	0.442	Normal	1	0.442
δU_{MKal}	0.000	2.802	Normal	0.019	0.052
δT_{Th}	0.000	0.071	Rechteck	1	0.000
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_3	147.502				0.445

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{2,M}$	147.359	0.006	Normal	1	0.006
δT_{Kal}	0.000	0.442	Normal	1	0.442
δU_{MKal}	0.000	2.802	Normal	0.019	0.052
δT_{Th}	0.000	0.071	Rechteck	1	0.071
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	147.424				0.451

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{1,M}$	147.155	0.007	Normal	1	0.007
δT_{Kal}	0.000	0.441	Normal	1	0.441
δU_{MKal}	0.000	2.802	Normal	0.019	0.052
δT_{Th}	0.000	0.071	Rechteck	1	0.071
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	147.220				0.450

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{O,M}$	147.1129	0.0091	Normal	1	0.009
δT_1	0.0810	0.6992	Normal	1	0.699
δT_1	-0.0223	0.1924	Normal	1	0.192
δT_1	0.0060	0.0516	Normal	1	0.052
δT_t	0.0000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_U	0.0000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_{NL}	0.0000	0.0004	Rechteck	1	0.0004
T_O	147.178				0.728

Weiteren Messunsicherheitsbudgets für Stahl und Aluminiumprüfkörper befinden sich im Anhang 2-6.

3 Thermischer Messfehler

3.1 Allgemein

Wie schon erwähnt wurde, ist der gesamte systematische Messfehler die Summe der drei Fehler: dem thermischen Messfehler ΔT_{th} , dem eigentlichen Messfehler des Sensors ΔT_S , dem Messfehler der verwendeten Messgeräte ΔT_M :

$$\Delta T = \Delta T_{th} + \Delta T_S + \Delta T_M$$

Der gesamte thermische Messfehler besteht aus den drei Teilfehlern $\Delta T_{th,1}$, $\Delta T_{th,2}$ und $\Delta T_{th,3}$.

$$\Delta T_{th} = \Delta T_{th,1} + \Delta T_{th,2} + \Delta T_{th,3}$$

Der **erste thermische Teilfehler** $\Delta T_{th,1}$ ist die Differenz zwischen ungestörter und gestörter Oberflächentemperatur:

$$\Delta T_{th,1} = T_{OS} - T_O$$

Der **zweite thermische Teilfehler** wird durch den Kontaktwiderstand zwischen der Kontaktfläche des Fühlers und der zu messenden Oberfläche R_K verursacht und ist neben der Aufsetzkraft und dem -winkel auch von der Oberflächenrauigkeit, den Wärmeleitfähigkeiten der Kontaktfläche des Fühlers, des Messobjekts und der Zwischenschicht abhängig. Diesen Teilfehler bestimmt man als die Temperaturdifferenz zwischen gestörter Oberflächentemperatur und der Temperatur der Kontaktfläche des Fühlers:

$$\Delta T_{th,2} = T_{SO} - T_{OS}$$

Der **dritte thermische Teilfehler** $\Delta T_{th,3}$ ist eine Temperaturdifferenz zwischen der Kontaktfläche des Temperaturfühlers T_{SO} und der eigentlichen Sensortemperatur T_S durch einen materialabhängigen inneren und von den Umgebungsbedingungen abhängigen äußeren thermischen Widerstand entsprechend $R_{S,th}$ und $R_{F,th}$ des Temperaturfühlers.

$$\Delta T_{th,3} = T_{SO} - T_S$$

Da die Temperatur der Kontaktfläche T_{SO} sehr schwer zu schätzen ist, ist es sinnvoll, den zweiten und dritten thermischen Messfehler $\Delta T_{th,2+3}$ zusammen zu betrachten und als Summe besser bestimmbarer Fehler darzustellen.

$$\Delta T_{th,2+3} = \Delta T_{th,2} + \Delta T_{th,3} = T_S - T_{OS} = \Delta T_{th,2} + \delta T_{RS} + \delta T_{WA}$$

δT_{WA} - ist der Korrekturwert aufgrund der Wärmeableitung von dem Sensor an die Umgebung

δT_{RS} - ist der Korrekturwert wegen des thermischen Widerstandes zwischen Sensor und seiner Kontaktfläche

3.2 Der erste thermische Teilfehler

Das Aufsetzen des Fühlers auf die zu messende Oberfläche bewirkt eine Störung des Temperaturfeldes vom Messkörper. In der Abbildung 1.2.1 ist mit der Hilfe eines elektrothermischen Modells dieser Prozess veranschaulicht. Der ursprüngliche äußere thermische Widerstand des Aufsetzpunktes R_{Az} wird ersetzt durch einen thermischen Widerstand des Fühlers, der sich aus einem thermischen Kontaktwiderstand R_K , dem Sensorwiderstand R_S und dem thermischen Widerstand zwischen Sensor und Umgebung R_F zusammensetzt. Abhängig davon, ob dadurch der Fühler die ursprüngliche Wärmeabgabe an die Umgebung vergrößert oder verkleinert, ändert sich das Vorzeichen des ersten thermischen Messfehlers.

$$\begin{aligned} (R_K + R_S + R_F) \leq R_{Az} & \Rightarrow T_{OS} \leq T_O \quad \text{bzw.} \quad \Delta T_{th,1} \leq 0 \\ (R_K + R_S + R_F) \geq R_{Az} & \Rightarrow T_{OS} \geq T_O \quad \text{bzw.} \quad \Delta T_{th,1} \geq 0 \end{aligned}$$

Die Rückwirkungsfreiheit $T_{OS} = T_O$ kann bei $(R_K + R_S + R_F) = R_{Az}$ erreicht werden. [vgl. TechTemp 108]

Mit Wiederholungsmessungen auf dem Aluminium- und Stahlprüfkörper mittels Prüfeinrichtung bei den Temperaturen von 85 °C, 150 °C und 300 °C wurde der thermische Fehler geschätzt. Bei 300°C wurde der NTC-Fühler nicht untersucht, weil die Messungen bei dieser Temperatur nicht erlaubt sind.



Abbildung 3.2.1 Die Libelle für die Einstellung des senkrechten Aufsetzwinkels des Fühlers

Für die Darstellung der Reproduzierbarkeit der Prüfeinrichtung wurde der zu untersuchende Fühler bei jeder Messung neu eingespannt. Dabei wurde der senkrechte Aufsetzwinkel mit der Hilfe der speziellen Libelle (Abbildung 3.2.1) eingestellt. Um das Messergebnis statistisch verarbeiten zu können bzw. den Mittelwert und die Standardunsicherheit zu bilden, wurden mindestens 4 Messungen bei jeder der oben genannten Temperaturen durchgeführt.

Nach der Messung wurde der erste thermische Messfehler als die Differenz zwischen ungestörte und gestörte Oberflächentemperatur nach der Formel bestimmt:

$$\Delta T_{th,1} = T_{OS} - T_O$$

Tabelle 3.2.1 Erster thermische Teilfehler der untersuchten Thermometer auf einem Stahlprüfkörper und Aluminiumprüfkörper bei Temperaturen von 85 °C, 150 °C und 300 °C

Pt100						
St	T_K =85°C		T_K =150°C		T_K =300°C	
Zusätzliche Anpresskraft	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K
keine	-0.4895	0.0481	-1.1163	0.1032	-2.3658	0.0916
5 N					-2.3724	0.0860
10 N	-0.4327	0.0903	-1.0541	0.1264	-2.0267	0.2403

Typ K						
St	T_K =85°C		T_K =150°C		T_K =300°C	
Zusätzliche Anpresskraft	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K
keine	-0.7632	0.0502	-1.4124	0.1043	-2.9933	0.5374
10 N	-0.6662	0.0746	-1.4711	0.1802	-3.2942	0.2398

NTC				
St	T_K =85°C		T_K =150°C	
Zusätzliche Anpresskraft	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K
keine	-0.8857	0.0645	-1.3887	0.2599
10 N	-0.8769	0.1101	-1.8863	0.4749

Pt100						
Alu	T_K =85°C		T_K =150°C		T_K =300°C	
Zusätzliche Anpresskraft	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K
keine	-0.0581	0.0319	-0.1738	0.0367	-0.3581	0.0636
5 N					-0.3771	0.0406
10 N	-0.0493	0.0584	-0.1285	0.0385	-0.3771	0.0251

Typ K						
Alu	T=85°C		T=150°C		T=300°C	
Zusätzliche Anpresskraft	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K	$\Delta T_{th,1}$,K	s($\Delta T_{th,1}$),K
keine	-0.2423	0.0176	-0.3989	0.0528	-0.8668	0.1076
10 N	-0.2492	0.0420	-0.4857	0.0204	-0.9496	0.0611

NTC		
St	T=85°C	T=150°C

Zusätzliche Anpresskraft	$\Delta T_{th,1}$, K	$s(\Delta T_{th,1})$, K	$\Delta T_{th,1}$, K	$s(\Delta T_{th,1})$, K
keine	-0.1623	0.0408	-0.3433	0.0374
10 N	-0.1786	0.0257	-0.4182	0.0292

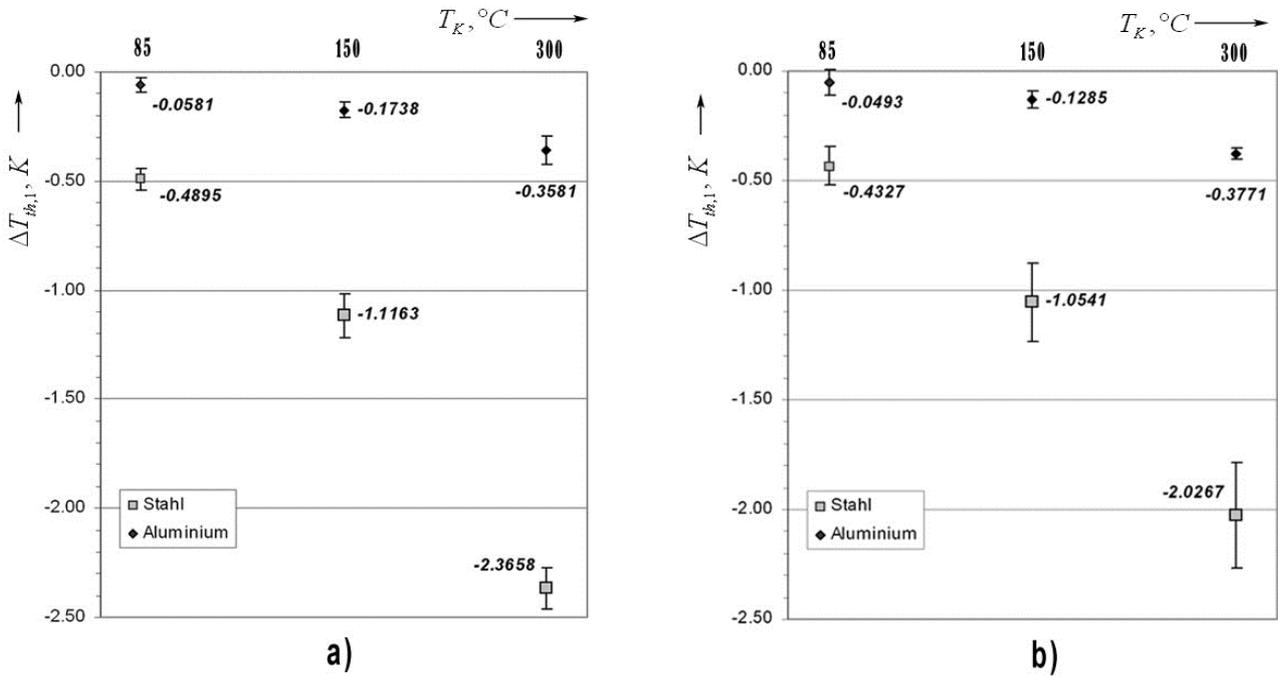


Abbildung 3.2.2 Erster thermische Teilfehler $\Delta T_{th,1}$ des Pt100-Fühlers auf dem Stahl- und Aluminiumprüfkörper bei Temperaturen von 85 °C, 150 °C und 300 °C: a) ohne zusätzlicher Anpresskraft, b) mit einer Anpresskraft von 10 N

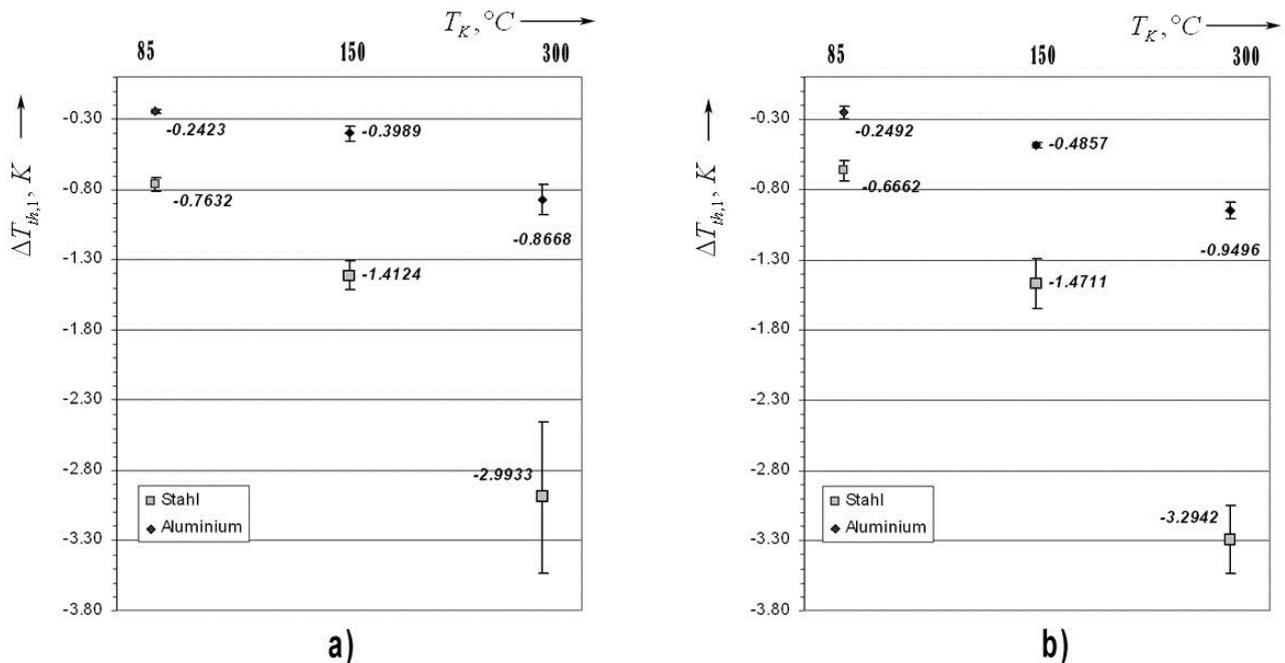


Abbildung 3.2.3 Erster thermische Teilfehler $\Delta T_{th,1}$ des Typ K Kreuzband-Fühlers auf dem Stahl- und Aluminiumprüfkörper bei Temperaturen von 85 °C, 150 °C und 300 °C: a) ohne zusätzlicher Anpresskraft, b) mit einer Anpresskraft von 10 N

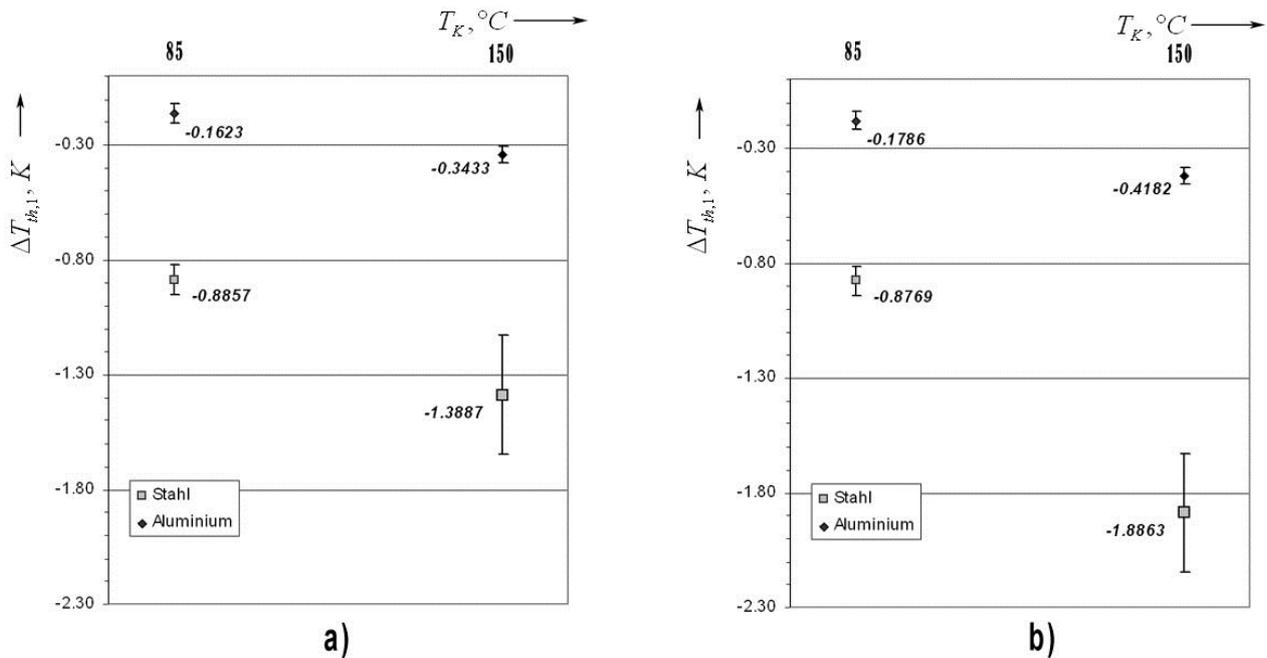


Abbildung 3.2.4 Erster thermische Teilfehler $\Delta T_{th,1}$ des NTC-Fühlers auf dem Stahlprüfkörper und Aluminiumprüfkörper bei Temperaturen von 85 °C, 150 °C: a) ohne zusätzlicher Anpresskraft, b) mit einer Anpresskraft von 10 N

In der Tabelle 3.2.1 sind die ersten thermischen Teilfehler für die vorhandenen Fühler bei den untersuchten Temperaturen dargestellt. Zusätzlich wurde die Abhängigkeit des $\Delta T_{th,1}$ vom Kontaktwiderstand experimentell überprüft. Dazu wurden zusätzliche Gewichte für eine Anpresskraft von 5 und 10 N genommen.

Mit der steigenden Temperatur des Messobjekts bzw. der Temperaturdifferenz $T_U - T_O$ nimmt auch $\Delta T_{th,1}$ zu. Die Störung der Oberflächentemperatur ist auf dem Prüfkörper mit höherer Wärmeleitfähigkeit kleiner

Man kann auch merken, dass die zusätzliche Anpresskraft einen nützlichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur nur bei der Messung mit Pt100-Fühler hat. Die Summe von oben beschriebenen thermischen Widerständen R_K , R_S und R_F

3.3 Der zweite thermische Teilfehler

Der thermische Kontaktwiderstand R_K bzw. der spezifische thermische Kontaktwiderstand r_K in der Berührungsfläche vom Messobjekt zum Sensor beeinflusst wesentlich den Wärmetransport und damit den thermischen Messfehler.

Der thermische Kontaktwiderstand wird von:

- den thermischen und mechanischen Eigenschaften der beiden berührenden Materialien d.h. des Messobjekts und des Temperatursensors,
- der Aufsetzrichtung bzw. dem Aufsetzwinkel,
- dem Anpressdruck,
- der Kontakttemperatur T_{OS} bzw. T_{SO} ,
- der Rauigkeit der Kontaktflächen,
- der geometrischen Form der Kontaktflächen,
- dem umgebenden Medium,
- der Richtung des Wärmestroms,
- den thermischen Eigenschaften bzw. Wärmetransportbedingungen einer Zwischenschicht oder Zwischenmediums

beeinflusst. Er hat demzufolge eine relativ große zufällige Komponente. [[1] S115]

Es ist offensichtlich, dass die Bestimmung der Größen aller dieser Faktoren sehr aufwendig ist. Deshalb wird der zweite thermische Messfehler $\Delta T_{th,2}$ ggf. durch die Untersuchung der wichtigsten Einflussgrößen:

- Wärmeleitfähigkeit des Messobjektes
- Aufsetzkraft

für die einzelnen Fühler grob abgeschätzt.

Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Messobjektes

Für die Untersuchung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit des Materials des Messobjekts wurden die Messungen mit der zusätzlichen Anpresskraft von 10 N an drei Prüfkörpern durchgeführt.

Deren Wärmeleitfähigkeiten sind:

- für Edelstahlprüfkörper $\lambda_{20^\circ C} \approx 15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,
- für Aluminiumprüfkörper $\lambda_{20^\circ C} \approx 220 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,
- für Kupferprüfkörper $\lambda_{20^\circ C} \approx 390 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

Die Korrektur aufgrund des Einflusses der Messobjektwärmeleitfähigkeit $\delta T_{th,2,\lambda}$ berechnet man als:

$$\delta T_{th,2,\lambda} = \Delta T_{th,2+3} - \Delta T_{th,2+3,N}$$

Hier wurde die Summe des zweiten und dritten thermischen Messfehlers bei der Messung auf dem Normalprüfkörper, d.h. dem Prüfkörper mit dem höchsten Wert für die Wärmeleitfähigkeit, als $\Delta T_{th,2+3,N}$ bezeichnet. Bei den Messungen bis $T_K = 200^\circ C$ kann der Kupferprüfkörper als Normal genommen werden. Für $200^\circ C \leq T_K \leq 300^\circ C$ kann ggf. der Aluminiumprüfkörper benutzt werden (Tabelle 3.3.1)

Tabelle 3.3.1 Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Messobjekts auf den thermischen Messfehler

Pt100	TM=85°C			TM=150°C			TM=300°C		
Prüfkörper	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K
Stahl	-4.329	0.637	-2.291	-6.471	1.559	-1.960	-10.517	1.338	-0.692
Alu	-2.065	0.420	-0.028	-5.734	0.809	-1.223	-9.824	2.123	0.000
Kupfer	-2.037	0.595	0.000	-4.511	0.914	0.000			

Typ K	TM=85°C			TM=150°C			TM=300°C		
Prüfkörper	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K
Stahl	-2.880	0.741	-2.226	-5.522	1.138	-2.850	-11.203	0.548	-2.129
Alu	-1.192	0.263	-0.538	-2.904	0.179	-0.231	-9.073	0.784	0.000
Kupfer	-0.654	0.228	0.000	-2.673	0.999	0.000			

NTC	TM=85°C			TM=150°C		
Prüfkörper	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,\lambda}$, K
Stahl	-8.178	0.371	-3.035	-18.594	0.872	-7.190
Alu	-5.262	0.285	-0.120	-13.661	1.043	-2.257
Kupfer	-5.142	0.539	0.000	-11.404	0.921	0.000

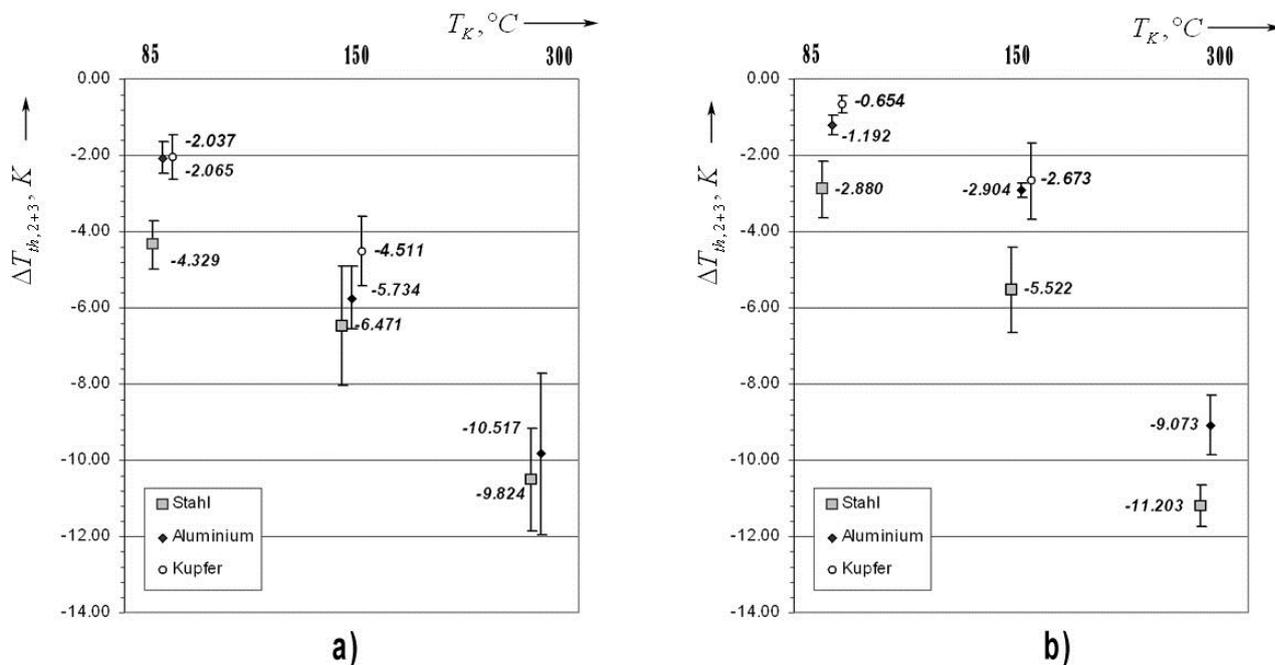


Abbildung 3.3.1 Die Abhängigkeit des thermischen Messfehlers $\Delta T_{th,2+3}$ von dem Material bzw. Wärmeleitfähigkeit des Prüfkörpers bei den Temperaturen von 85 °C, 150 °C und 300 °C für a) Pt100- und b) Typ K Kreuzbandtaströhren

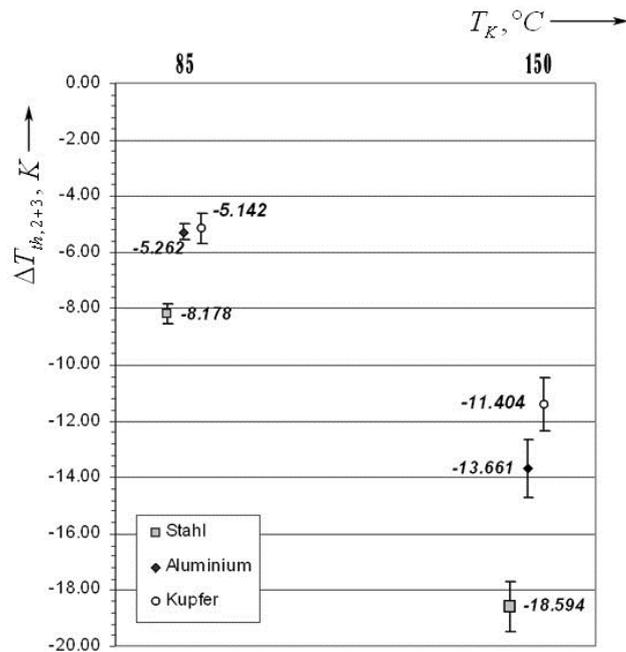


Abbildung 3.3.2 Die Abhängigkeit des zweiten thermischen Messfehlers $\Delta T_{th,2}$ von dem Material bzw. Wärmeleitfähigkeit des Prüfkörpers bei den Temperaturen von 85 °C, und 150 °C C für NTC-Fühler

Auf den Abbildungen Abbildung 3.3.1 und Abbildung 3.3.2 wurde die Abhängigkeit der zweiten thermischen Messfehler von der Wärmeleitfähigkeit des Prüfkörpers dargestellt. Man sieht, dass die hohe Leitfähigkeit unabhängig von Fühlertyp zu der Verminderung der Temperaturdifferenz zwischen Sensor und gestörter Temperatur führt.

Einfluss der zusätzlichen Anpresskraft

Wie schon erwähnt wurde, sind die Massstücke von 5 N und 10 N für die zusätzliche Kraft an der Anpressvorrichtung installierbar. Sie sind auf der Abbildung 3.3.3 dargestellt.

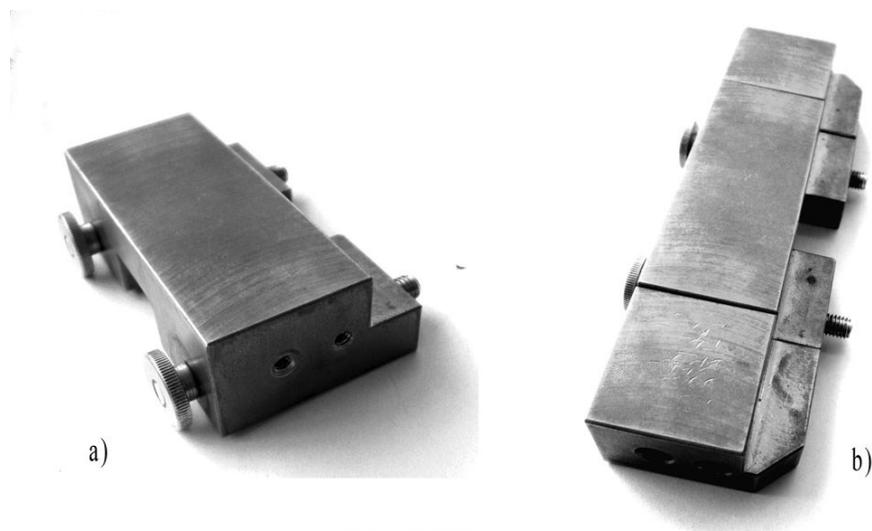


Abbildung 3.3.3 Die Massstücke für eine zusätzliche Anpresskraft von a) 5 N und b) 10 N

Die Fehler aufgrund der mangelnden Anpresskraft berechnet man als:

$$\delta T_{th,2,F} = \Delta T_{th,2+3,0} - \Delta T_{th,2+3}$$

$\Delta T_{th,2+3,0}$ ist dabei die Differenz zwischen der gestörten Oberflächentemperatur und der eigentlichen Sensortemperatur bei der Messung ohne zusätzliche Anpresskraft.

Ergebnisse für die untersuchten Fühler wurden in der

Tabelle 3.3.2 und auch in den Abbildungen Abbildung 3.3.4, Abbildung 3.3.5 und Abbildung 3.3.6 dargestellt. Man sieht, dass für die Verminderung des Kontaktwiderstandes bei den Messungen mit Temperaturfühlern der Bauformgruppe 1, d.h. dem Pt100- und NTC-Fühler, die zusätzliche Anpresskraft von großer Bedeutung ist.

Tabelle 3.3.2 Abhängigkeit des thermischen Messfehlers $\Delta T_{th,2+3}$ von der Anpresskraft des aufgesetzten Fühlers

Pt100							
Zusatzkraft		Stahl			Aluminium		
		$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,F}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,F}$, K
85°C	ohne	-6.521	0.380	-2.192	-3.183	0.240	-1.118
	10N	-4.329	0.637		-2.065	0.420	
150°C	ohne	-6.783	0.269	-0.312	-6.511	0.502	-0.776
	10N	-6.471	1.559		-5.734	0.809	
300°C	ohne	-12.076	1.396	-1.560	-12.495	1.489	-2.671
	5N	-10.946	0.066		-10.782	1.142	
	10N	-10.517	1.338		-9.824	2.123	

Typ K							
Zusatzkraft		Stahl			Aluminium		
		$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,F}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,F}$, K
85°C	ohne	-1.967	0.260	0.913	-1.381	0.123	-0.189
	10N	-2.880	0.741		-1.192	0.263	
150°C	ohne	-4.239	0.545	1.284	-3.600	0.439	-0.696
	10N	-5.522	1.138		-2.904	0.179	
300°C	ohne	-11.579	0.285	-0.377	-7.992	0.481	1.081
	10N	-11.203	0.548		-9.073	0.784	

NTC							
Zusatzkraft		Stahl			Aluminium		
		$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,F}$, K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, K	$\delta T_{th,2,F}$, K
85°C	ohne	-9.347	0.829	-1.170	-7.778	1.200	-2.516
	10N	-8.178	0.371		-5.262	0.285	
150°C	ohne	-21.576	0.931	-2.982	-18.614	1.511	-4.953
	10N	-18.594	0.872		-13.661	1.043	

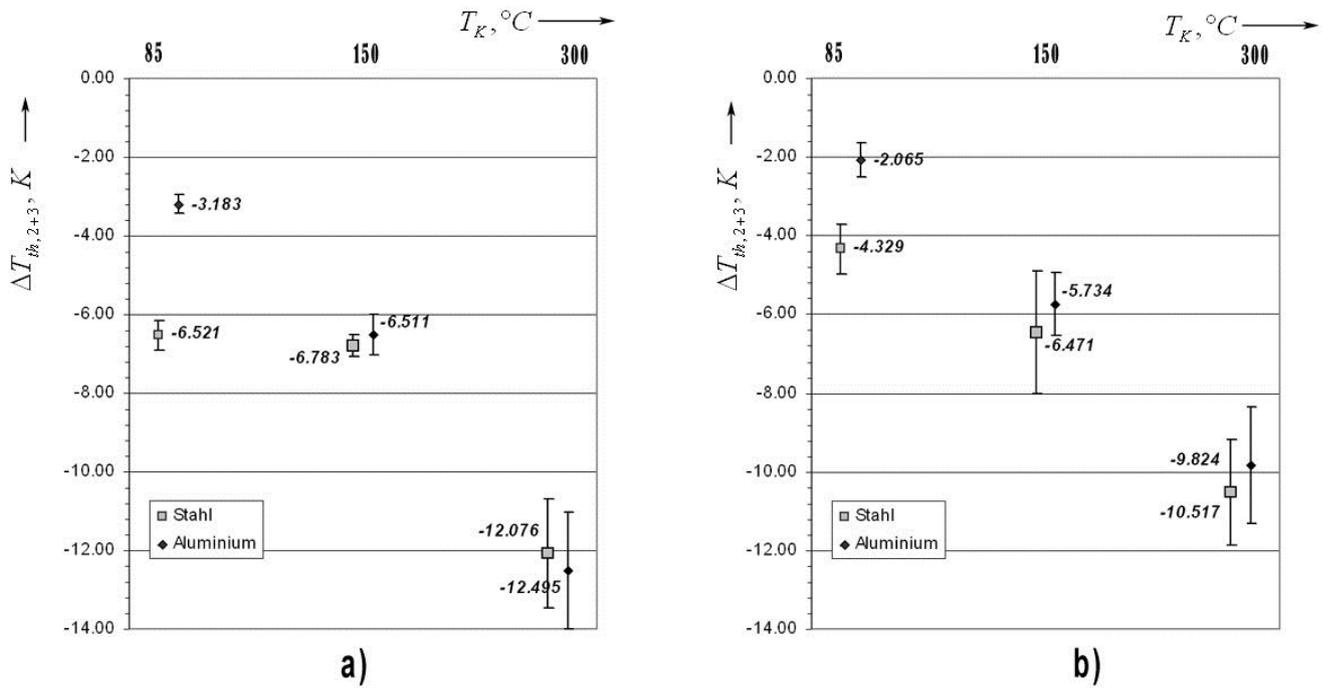


Abbildung 3.3.4 Die Abhängigkeit des thermischen Messfehlers $\Delta T_{th,2+3}$ des Pt100-Fühlers von der zusätzlichen Anpresskraft von a) 0 N und b) 10 N

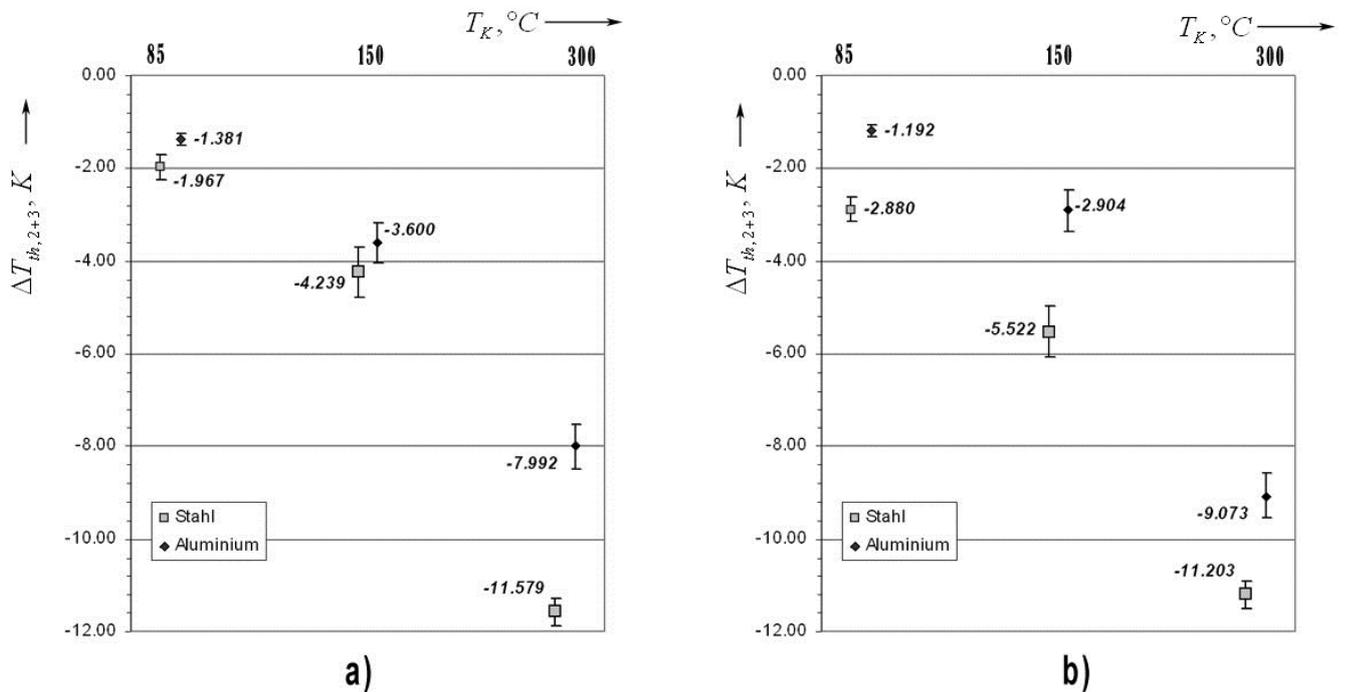


Abbildung 3.3.5 Die Abhängigkeit des thermischen Messfehlers $\Delta T_{th,2+3}$ des Typ K Kreuzband-Fühlers von der zusätzlichen Anpresskraft von a) 0 N und b) 10 N

Wie sieht man auf der Abbildung 3.3.4, ist es sinnvoll, mit der zusätzlichen Anpresskraft von 10 N aufgrund der Verminderung des gesamten thermischen Messfehlers ΔT_{th} für **Pt100-Fühler** zu messen. Es ist aber eine zunehmende Standardunsicherheit bei den Messungen mit dem zusätzlichen

Massestück zu verzeichnen. Diese kann durch eine stärkere Empfindlichkeit gegenüber Kippungen des Winkels bei Wiederholungsmessungen hervorgerufen werden.

Die konstruktive Besonderheit des Kreuzband-Thermoelementes **Typ K** (Baugruppe 2) beschränkt die Abhängigkeit vom Anpressdruck und stabilisiert damit den Wert bei den Handmessungen. Das zusätzliche Massestück ist für die Messung nicht notwendig. Es besteht dabei ein Risiko der Beugung der Thermodrähte nach oben wegen einer übermäßigen Anpresskraft. Als Folge kann eine wesentliche Verschlechterung des Kontaktwiderstandes zwischen dem Sensor und Oberfläche auftreten.

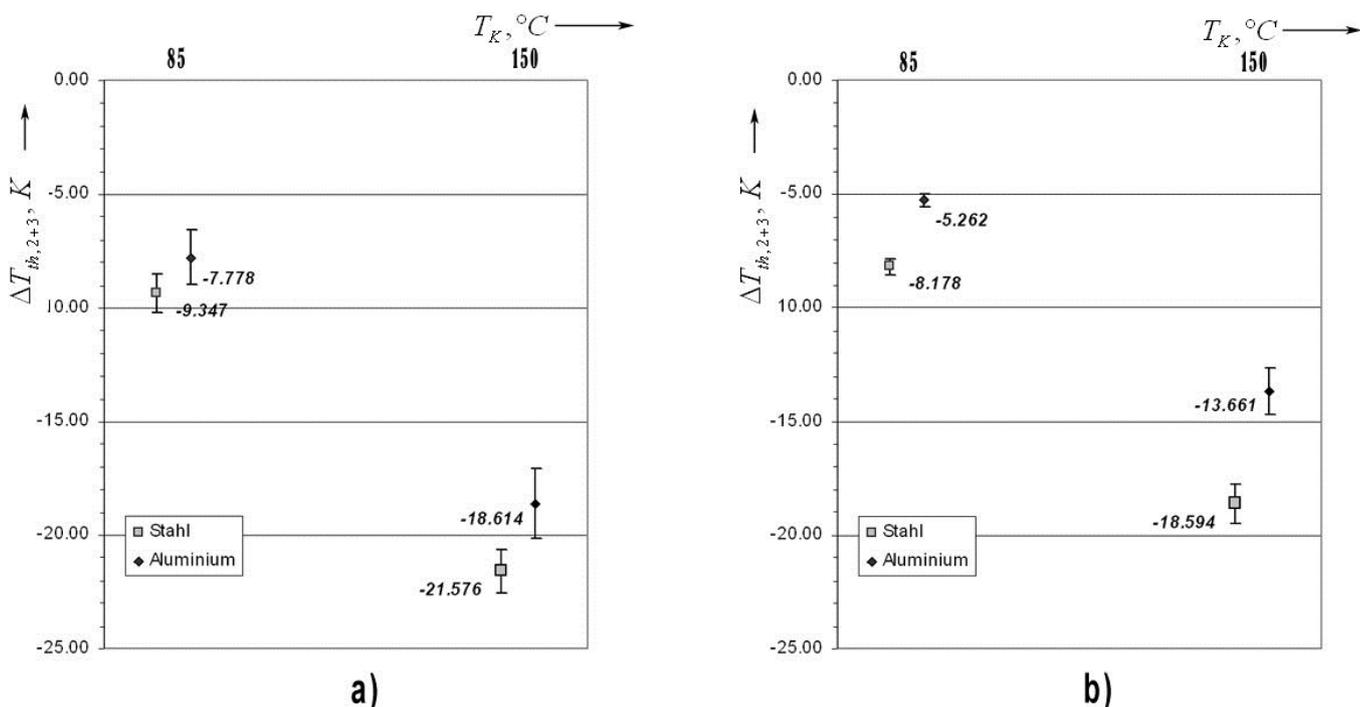


Abbildung 3.3.6 Die Abhängigkeit des thermischen Messfehlers $\Delta T_{th,2+3}$ des NTC-Fühlers von der zusätzlichen Anpresskraft von a) 0 N und b) 10 N

Auf der Abbildung 3.3.6 sieht man, dass die zusätzliche Anpresskraft bei der Messung mit dem NTC-Fühler nicht nur einen kleineren Kontaktwiderstand und dadurch kleineren thermischen Messfehler gewährleistet, sondern auch die Reproduzierbarkeit der Messung durch die Verminderung der Unsicherheit verbessert.

3.4 Der dritte thermische Teilfehler

Analog zu der Abbildung 1.2.1 wird in der Abbildung 3.4.1 ein vereinfachtes Modell für die Wärmeableitung über den Fühler dargestellt. Wenn die Temperatur T_{SO} der Sensoroberfläche größer als die Umgebungstemperatur T_U ist ($T_{SO} > T_U$), ist, fließt der Wärmestrom über den Fühler an die Umgebung.

Die Temperatur des Messobjektes kann als Summe zweier Teiltemperaturen dargestellt werden, die von den Temperaturen des Messobjektes T_M bzw. der Sensoroberfläche T_{SO} und der Umgebung T_U bestimmt sind:

$$T_S = \frac{1}{1 + R_S/R_F} T_{SO} + \frac{1}{1 + R_F/R_S} T_U = (1 - B) \cdot T_{SO} + B \cdot T_U$$

Ist der thermische Widerstand R_F , der einer Summe des Wärmeleitwiderstand und Übergangswiderstand des Fühlers zur Umgebung entspricht, klein, so wird die Wärme vom Sensor abgeleitet. Der Wert des vom konstruktiven Aufbau des Fühlers abhängigen thermischen Widerstands R_S zwischen der Sensoroberfläche und dem Sensor selbst, beeinflusst die thermische Kopplung mit dem Messobjekt. Dieser Widerstand muss also möglichst klein sein.

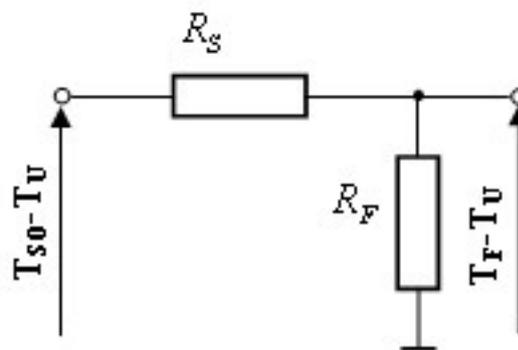


Abbildung 3.4.1 Vereinfachtes elektrothermisches Modell der Wärmeableitung über den Fühler

Der dritte thermische Teilfehler ist von der Größe der beiden oben genannten Widerstände abhängig.

Für die experimentelle Abschätzung eines Beitrags der Wärmeableitung zum thermischen Messfehler wurden die Messungen mit zusätzlicher thermischer Isolation durchgeführt und mit den Messungen ohne diese verglichen. Die Wärmeableitung für die drei Tasttemperaturfühler wurde am Stahl- und Aluminiumprüfkörper bei den Temperaturen von 85, 150 und 300 °C untersucht. Als Isolation wurde eine keramische Isolierwolle benutzt. Der Fühler temperiert sich auf der Oberfläche ca. 5 Min. Alle Messungen für dieselbe Temperatur des Messobjektes werden in der gleichen Position des Fühlers bzw. ohne Änderung des Aufsetzwinkels durchgeführt. Es wird für einen besseren thermischen Kontakt an die Oberfläche auch das Massestück für eine Anpresskraft von 10 N genommen.

Für die Verminderung des zufälligen Fehlers besteht jede Messreihe aus 50 Messungen mit der Integrationszeit von 10 Netzspannungszyklen und wird nachträglich statistisch verarbeitet.

Die Werte der Messungen befinden sich in der Tabelle A. 8 Tabelle A. 9 im Anhang.

Der Wärmeableitungsfehler berechnet sich nach folgender Formel:

$$\delta T_{WA} = \Delta T_{th,2+3} - \Delta T_{th,2+3,Isol}$$

$\Delta T_{th,2+3,Isol}$ ist dabei die Differenz zwischen Sensortemperatur und gestörten Oberflächentemperatur bei der Messung mit der zusätzlichen thermischen Isolation, $\Delta T_{th,2+3}$ bezeichnet diese Differenz bei der Messung ohne thermische Isolation.

Man sieht in der Tabelle 3.4.1, dass der Fehler durch Wärmeableitung δT_{WA} deutlich mit der steigenden Umgebungstemperatur bzw. ihrer Differenz mit der Temperatur des Messobjektes zunimmt und bei der Messung an den Prüfkörper aus Material mit höheren Wärmeleitfähigkeit bzw. Aluminium geringer wird.

Tabelle 3.4.1 Fehler durch die Wärmeableitung für untersuchte Tastfühler bei 85, 150 und 300 °C am Stahl- und Aluminiumprüfkörper

T_K	Zusätzliche thermische Isolation	Pt100					
		Stahl			Aluminium		
		$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, T	δT_{WA} , K	$\Delta T_{th,2+3}$, K	$s(\Delta T)$, T	δT_{WA} , K
85°C	ohne	-1.599	0.021	-0.560	-5.066	0.101	-1.329
	mit	-1.039	0.023		-3.737	0.027	
150°C	ohne	-6.512	0.051	-1.972	-5.324	0.121	-1.541
	mit	-4.540	0.067		-3.783	0.032	
300°C	ohne	-11.714	0.100	-4.371	-9.571	0.050	-3.088
	mit	-7.343	0.087		-6.483	0.104	

T_K	Zusätzliche thermische Isolation	Typ K					
		Stahl			Aluminium		
85°C	ohne	-1.349	0.036	-0.592	-0.799	0.024	-0.501
	mit	-0.757	0.035		-0.298	0.044	
150°C	ohne	-2.830	0.023	-1.243	-2.375	0.107	-1.596
	mit	-1.586	0.070		-0.779	0.080	
300°C	ohne	-10.347	0.022	-3.302	-6.249	0.166	-3.090
	mit	-7.045	0.397		-3.159	0.318	

T_K	Zusätzliche thermische Isolation	NTC					
		Stahl			Aluminium		
85°C	ohne	-6.619	0.103	-1.725	-4.836	0.053	-1.205
	mit	-4.894	0.032		-3.631	0.028	
150°C	ohne	-14.078	0.164	-3.844	-10.117	0.063	-2.609
	mit	-10.234	0.081		-7.508	0.073	

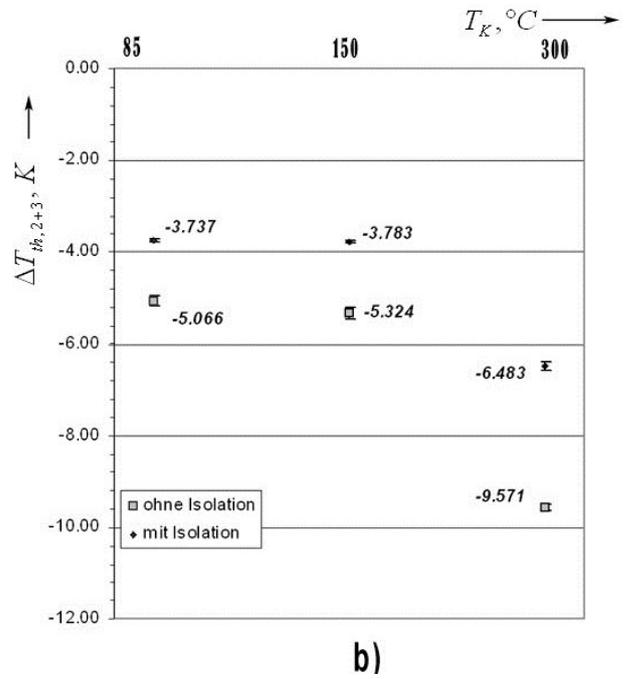
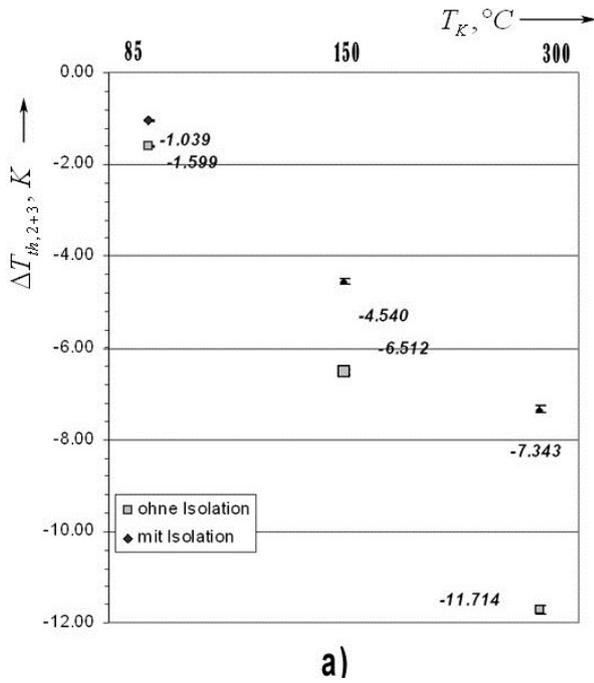


Abbildung 3.4.2 Der Einfluss der zusätzlichen thermischen Isolation auf den thermischen Messfehler $\Delta T_{th,2+3}$ bei den Messungen mit Pt100-Fühler bei 85 °C, 150 °C und 300 °C Kerntemperatur T_K für a) Stahlprüfkörper und b) Aluminiumprüfkörper

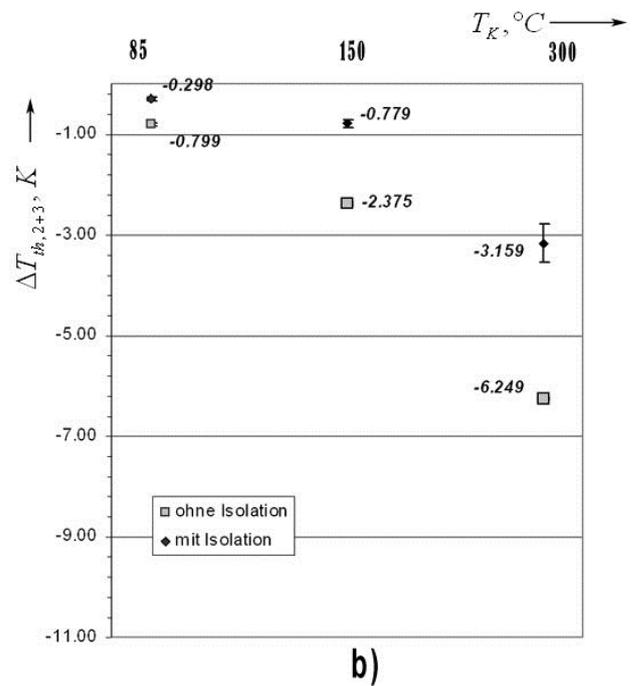
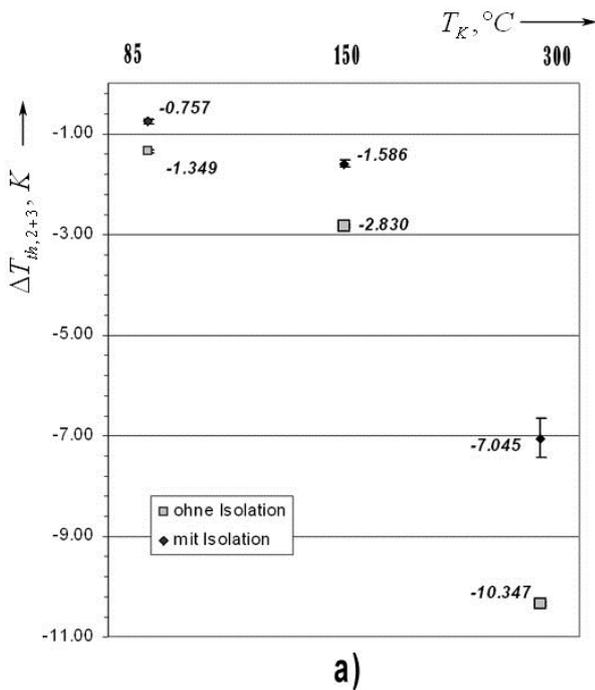


Abbildung 3.4.3 Der Einfluss der zusätzlichen thermischen Isolation auf den thermischen Messfehler $\Delta T_{th,2+3}$ bei den Messungen mit Kreuzband-Fühler von Typ K bei 85 °C, 150°C und 300°C Kerntemperatur T_K für a) Stahlprüfkörper und b) Aluminiumprüfkörper

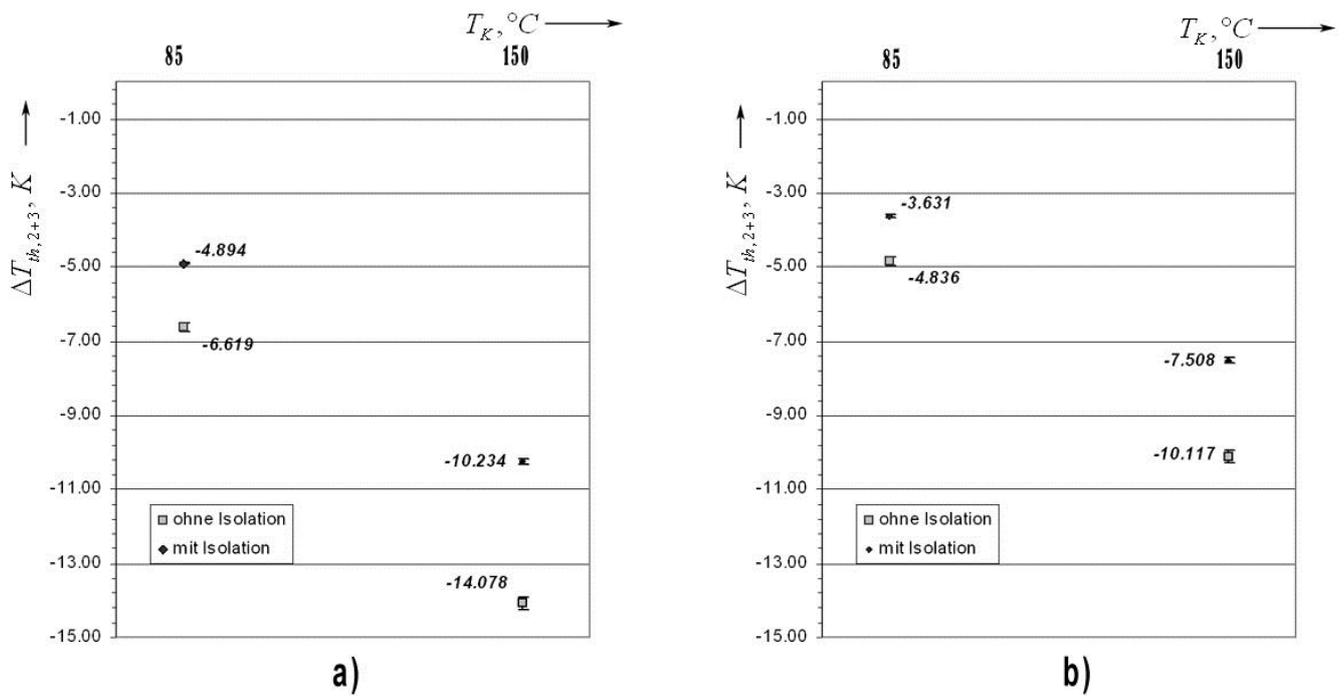


Abbildung 3.4.4 Der Einfluss der zusätzlichen thermischen Isolation auf den thermischen Messfehler $\Delta T_{th,2+3}$ bei den Messungen mit NTC-Fühler bei 85 °C, 150°C Kerntemperatur T_K für a) Stahlprüfkörper und b) Aluminiumprüfkörper

Wenn es notwendig ist, den Fehler durch die Wärmeableitung möglichst genau zu bestimmen, muss man bei ihrer Installation darauf achten, dass die thermische Isolation den Einfluss auf die Oberflächentemperatur hat. Es ist auch theoretisch möglich, den ersten thermischen Teilfehler analog durch die entsprechende Auswahl der thermischen Isolation zu korrigieren (Abschnitt 3.2).

4 Widerstandsthermometer: Pt100 und NTC

Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern

Der spezifische Widerstand von elektrischen Leitern ist temperaturabhängig. Auf diesem physikalischen Prinzip beruht die Funktionsweise von Widerstandsthermometern: Die Temperaturmessung ist damit auf die Messung eines elektrischen Widerstandes zurückgeführt. Als Sensormaterial werden entweder Metalle oder Halbleitermaterialien verwendet. Bei Metallen steigt der Widerstand mit zunehmender Temperatur an. Als Grundmaterial des Sensors wird häufig Platin verwendet, wobei die Empfindlichkeit temperaturabhängig ist, aber größenordnungsmäßig bei $0,4\% \text{ K}^{-1}$ liegt. Andere Typen von Widerstandsthermometern haben teilweise erhebliche größere Temperaturkoeffizienten, Thermistoren z.B. bei etwa $5\% \text{ K}^{-1}$, allerdings bei einer sehr starken Nichtlinearität und einem stark eingeschränkten Temperatur-Einsatzbereich [7]

4.1 Pt100

4.1.1 Allgemein: Anwendungsbereich, Standard-Kennlinie

Wegen seiner größeren chemischen Beständigkeit, seiner vergleichsweise leichten Verarbeitbarkeit sowohl zu Draht- als auch zu Schicht- oder Folienmesswiderständen, der Möglichkeit seiner hochreinen Darstellung und der guten Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften sind Platin-Messwiderstände in der industriellen Messtechnik die mit Abstand am häufigsten eingesetzten Temperatursensoren. [1]

Im Bereich von $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 850^{\circ}\text{C}$ gilt für die Standard-Kennlinie industrieller Platinmesswiderstände ein Polynom des zweiten Grades:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (4-1)$$

Die Kennliniegleichung im Bereich $-200^{\circ}\text{C} \leq T < 0^{\circ}\text{C}$ ist ein Polynom 3. Grades:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C[T - 100^{\circ}\text{C}]T^3) \quad (4-2)$$

Für die Koeffizienten A, B und C dieser Gleichungen enthält die 1994 zurückgezogene Norm DIN 43760 von 1987 Werte unter Bezug auf die frühere Temperaturskala IPTS-68. Diese Koeffizienten gemäß der neuen Internationalen Temperaturskala ITS-90 sind in der europäischen Norm EN 60751/A2 1995-10 sowie in der entsprechenden neuen deutschen Norm DIN EN-60751: 1996-7 berücksichtigt.

Tab 3.1 Koeffizienten der Standardkennlinie R(T)

	ITS-90	IPTS-68
A	$+3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$+3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
B	$-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$	$-5,802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$
C	$-4,183 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$	$-4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$

Die exakte Gleichung der inversen Kennlinie T(R) zur Berechnung der Temperatur T aus einem gemessenen Widerstand R enthält man aus der Kennliniengleichung R(T) für den Temperaturbereich $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 850^{\circ}\text{C}$ zu:

$$\frac{T}{^{\circ}\text{C}} = a - \sqrt{b - c \left(\frac{R_r}{R_0} - 1 \right)} \quad (4-3)$$

Die Konstanten a, b und c dieser Gleichung können aus den Konstanten der Kennliniengleichung (3-1) berechnet werden:

$$a = -A/(2 \cdot B) \quad b = a^2 \quad c = -1/B$$

Die Benutzung der inversen Kennliniengleichung (4-3) setzt wegen der Subtraktion relativ großer Zahlen eine ausreichende numerische Rechengenauigkeit voraus. [1]

4.1.2 Bauform

Das zu untersuchende Widerstandsthermometer Pt100 des Herstellers „Testo“ hat eine flache robuste Kontaktfläche. Solche Bauform ist im Allgemeinen nur für Messungen auf glatten Oberflächen geeignet, weil die Bauform über keine federnden Elemente verfügt, um sich den Unebenheiten anzupassen. Deshalb nimmt der Kontaktwiderstand und somit der thermischer Messfehler auf unebenen Oberflächen stark zu.

Die Kopplung des Fühlers mit dem Messgerät Agilent 34970A bzw. dem 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A erfolgt durch einen Mini-DIN-Stecker (Abbildung 4.1.1) und die entsprechende Buchse. Die Bauform des Fühlers erlaubt die Messungen in 4-Leiter-Schaltung. Die Belegung des Mini-DIN-Steckers ist auf der Abbildung 1.3.2 dargestellt.

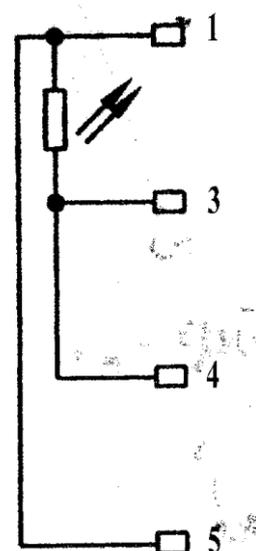


Abbildung 1.3.2 Die Belegung der Mini-DIN-Buchse, entsprechend der Abbildung 1.3.1

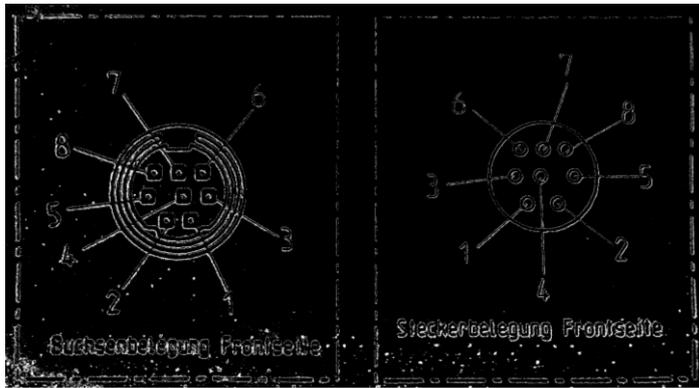


Abbildung 4.1.1 Mini-DIN-Stecker und Buchse

4.1.3 Beschreibung der Messkette

Die Messkette bei der Messung mit dem Tasttemperaturfühler Pt100 besteht aus:

- vom Regler gesteuerter Heizfolie bzw. Bezugsplatte;
- von unten geheizten seitlich isolierten Stahl- und Aluminiumprüfkörper;
- drei im Prüfkörper befindlichen Thermoelementen;
- Vergleichsstelle (Eispunkt);
- Tast-Temperaturfühler Pt100;
- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970A;

Der **eigentliche Messfehler des Sensors** ΔT_S kann wie folgt dargestellt werden:

$$\Delta T_S = \delta T_R + \delta T_{Eig}$$

δT_R ist der Fehler der Widerstandsmessung δR_R bei der entsprechenden Sensitivität $S(T)$ in den Temperaturfehler umgerechnet:

$$\delta T_R = \frac{\delta R_R(T)}{S(T)}$$

δR_R berechnet als:

$$\delta R_R = \delta R_{TKal} + \delta R_{RL} + \delta R_{ThSp}$$

δR_{TKal} Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers, die mit der Hilfe der Kalibrierung bestimmt oder aus dem Kalibrierschein entnommen werden kann.

δT_{Eig} Korrektur infolge der Eigenerwärmung des Sensors, die proportional zu der im Sensor umgesetzten Leistung bzw. von dem Messstrom abhängig ist.

- δR_{RL} Korrektur aufgrund des Einflusses von den Zuleitungswiderständen, wenn keine Möglichkeit besteht, in 4-Leiterschaltung zu messen.
- δR_{ThSp} Korrektur infolge der im Messkreis entstehenden parasitären Thermospannungen. Der Einfluss kann durch die Widerstandsmessung ohne Strom bestimmt werden, indem dieser von dem gemessenen Wert subtrahiert wird. Ggf. kann das durch Einschalten der Funktion „Offset Compensation“ direkt vom Messgerät durchgeführt werden.

4.1.4 Kalibrierung des Platinwiderstandsthermometers

Mit dem Zweck, die Abweichungen von der Standard-Kennlinie des vorhandenen Tastr-Temperaturfühlers zu ermitteln, wurde die Kalibrierung im Vergleichsverfahren durchgeführt.

Die Kennlinienkoeffizienten A und B aus der Gleichung (3-1) wurden bei der Kalibrierung im Umwälzthermostat bestimmt. Die Ermittlung von R_0 erfolgte durch eine 3-Stunden-Kalibrierung am Eispunkt.

Als Normalthermometer wurde ein vom DKD kalibriertes Pt100-Widerstandsthermometer genommen. Prüf- und Normalthermometer wurden bei den beiden Messungen in gutem thermischem Kontakt zueinander befestigt. Dadurch wurde garantiert, dass sich beide Thermometer bei gleichen Temperaturen befinden.

Kalibrierung am Eispunkt

Die Widerstandsmessung bei 0°C erfolgte mit folgenden Geräten:

- Dewargefäß mit frischem temperierten Eis
- Platinwiderstandsthermometer Pt100
- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970A 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A

Beide Thermometer befinden sich im Eiswasser 3 Stunden lang möglichst tief eingetaucht, um die Wärmeableitung zu vermeiden. Für R_0 wird der Mittelwert aus 1390 Messwerten berechnet.

$$R_0 = 99.922702 \Omega$$

Kalibrierung im Umwälzthermostat

Die Messkette besteht aus folgenden Geräten:

- Umwälzthermostat Julabo FP40
- Platinwiderstandsthermometer Pt100

- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970 mit 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A

Das Thermostatbad ist mit monodestillierten Wasser gefüllt. Die Flüssigkeit und die beiden Fühler werden von 10 bis 85°C in Schritten von 10K erwärmt und danach auch abgekühlt. Die Einsatzdauer bei jedem Kalibrierpunkt beträgt 30 Minuten, damit die Fühler sich auf Flüssigkeitstemperatur ausreichend temperieren.

Normalthermometer und Prüfling sind in 4-Leiter-Schaltung an einem 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A, der sich in einem Steckplatz im Agilent 34970 befindet, angeschlossen. Das Messdatenerfassungssystem hat dabei folgende Einstellungen:

- Messbereich: automatisch
- Auflösung: $6 \frac{1}{2}$ Stellen
- Integrationszeit 10 Netzspannungszyklen je Messung
- Offset-Kompensation eingeschalten

An jedem Kalibrierpunkt wurde die Messdatenauswertung für jeden temperaturstabilen Bereich danach durchgeführt.

Berechnung der Koeffizienten A und B

Da die Dauer der Widerstandsmessung am Eispunkt im Vergleich zu einem Kalibrierpunkt bei der Messung im Thermostat viel größer ist, wird angenommen, dass der Wert R_0 konstant ist und bei den Berechnungen sich nicht verändert. Jeder gemessenen Temperatur T_{Mess} entspricht der Widerstand $R(T_{\text{Mess}})$. Aus der Formel (3-1) folgt:

$$\frac{R(T_{\text{mess}})}{R_0} - 1 = A \cdot T_{\text{mess}} + B \cdot T_{\text{mess}}^2 \quad (4-5)$$

$$\frac{R(T_{\text{mess}})}{R_0} - 1 = \begin{bmatrix} T_{\text{mess}} & T_{\text{mess}}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

- *Normalthermometer*

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind aus dem Kalibrierschein des Normalthermometers entnommen und durch die Regressionsfunktion werden die Koeffizienten A und B berechnet.

Tabelle 4.1.1 Ergebnisse der Normalthermometer-Kalibrierung

Temperatur in °C	Widerstand, Ω	Messunsicherheit, °C
0 (Eispunkt)	100,026	0,02
20	107,812	0,02
40	115,567	0,02
60	123,274	0,02
80	130,934	0,02
100	138,540	0,02

Für den Normalwiderstand ermittelte Koeffizienten der Gleichung (3-1) sind:

$$R_{0,N}^* = 100,026 \Omega$$

$$A_N^* = 3.90688867279603 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$B_N^* = -5.615775923104821 \cdot 10^{-7} K^{-2}$$

Auf eine Begrenzung (Rundung) der Nachkommastellen auf ein sinnvolles Maß wird weiter unten eingegangen.

- *Prüfling*

Die im Thermostat mit dem Normalwiderstand gemessenen Widerstandsmittelwerte an den Kalibrierpunkten von $R(T=10^\circ\text{C})$ bis $R(T=85^\circ\text{C})$ sind in Temperaturen umgerechnet und in der Tabelle 4.1.2 mit entsprechenden Prüflingswiderstandswerte angegeben.

Die Kennlinienkoeffizienten des Prüflings wurden mit der Hilfe der Gleichung (4-6) ermittelt:

$$R_0^* = 99.922702 \Omega$$

$$A^* = 3.921264301920580 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$B^* = -6.412619243337803 \cdot 10^{-7} K^{-2}$$

Tabelle 4.1.2 Widerstandswerte der Vergleichskalibrierung von den Platinwiderstandsthermometern: Normal und Prüfling

Normalthermometer				Prüfling	
$\overline{R_N}, \Omega$	$s(\overline{R_N}), \Omega$	$\overline{T_{mess}}, ^\circ\text{C}$	$s(\overline{T_{mess}})$	$\overline{R_T}, \Omega$	$s(\overline{R_T}), \Omega$
100.0259	0.00027	-0.0002	0.0007	99.92270	0.00028
103.8498	0.00187	9.7985	0.0048	103.75373	0.00200
107.7317	0.00140	19.7745	0.0036	107.64278	0.00133
111.6174	0.00070	29.7888	0.0018	111.53344	0.00071
115.4873	0.00110	39.7919	0.0029	115.40731	0.00139
119.3419	0.00117	49.7840	0.0030	119.26310	0.00134
123.1884	0.00151	59.7844	0.0039	123.11200	0.00186
130.8527	0.00158	79.7981	0.0041	130.77566	0.00215
132.7609	0.00087	84.7995	0.0023	132.68314	0.00175

Korrektur aufgrund der Benutzung der Standard-Kennlinie

Beide Kennlinien wurden durch ein Polynom 2. Grades extrapoliert im Bereich bis 350°C .

Wenn bei der Messung mit kalibrierten Widerständen mit Standard-Kennlinie gearbeitet wird, ist die entsprechende Korrektur durch die Abweichung von den Grundwerten vorzusehen.

$$\Delta T(R)_{TKal} = T_{Standard}(R) - T^*(R) \quad (4-7)$$

T^* ist die mit der Hilfe von Kennlinienkoeffizienten des kalibrierten Fühlers aus dem Widerstand R berechnete Temperatur. T_{Stand} der Standard-Grundwert für den entsprechenden Widerstand.

Die Abweichungen von der IEC DIN Kennlinie sind in der Abbildung 4.1.2 dargestellt.

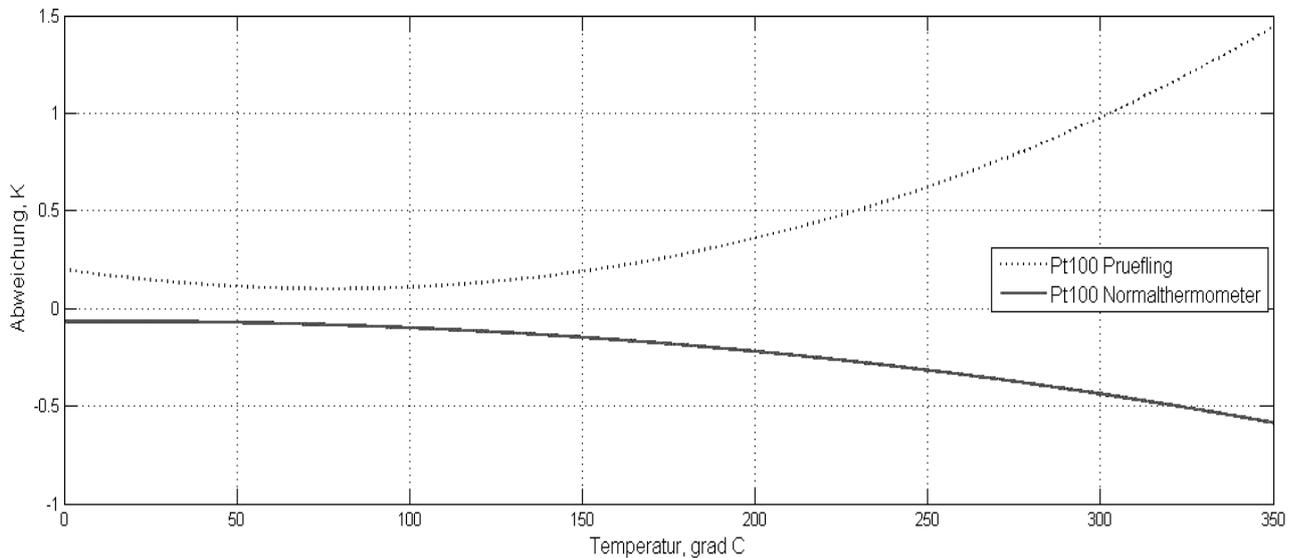


Abbildung 4.1.2 Abweichungen des Normalwiderstandes und des Prüflings von der IEC DIN Kennlinie.

Für die in der vorhandenen Arbeit untersuchten Temperaturen sind die entsprechenden Abweichungen:

Tabelle 4.1.3 Abweichungen des Normalwiderstandes und des Prüflings von der IEC DIN Kennlinie bei den untersuchten Temperaturen.

T	Normal		Prüfling	
	$\Delta T_{TKal,N}, K$	$\Delta R_{TKal,N}, \Omega$	$\Delta T_{TKal}, K$	$\Delta R_{TKal}, \Omega$
85	0.089	-0.038	-0.101	0.035
150	0.149	-0.051	-0.189	0.075
300	0.438	-0.158	-0.979	0.345

Korrektur aufgrund der Rundung der Koeffizienten

Koeffizienten, die zu viele Stellen nach dem Komma haben, sind unpraktisch, deshalb sind sie zu runden. Die Korrektur aufgrund der Rundung berechnet man mit der Formel:

$$\Delta T_{TRund}(R) = T^*_{Abk}(R) - T^*(R)$$

T_{Abk} ist die mit dem abgekürzten Koeffizient berechnete Temperatur

Um den diesen Einfluss zu prüfen, wurden 3 Rundungen der Kennlinienkoeffizienten des Pt100-Prüfling gemacht und die Kennlinienabweichungen für das Temperaturbereich von 0°C bis 350°C sowie für die untersuchten Temperaturen berechnet.

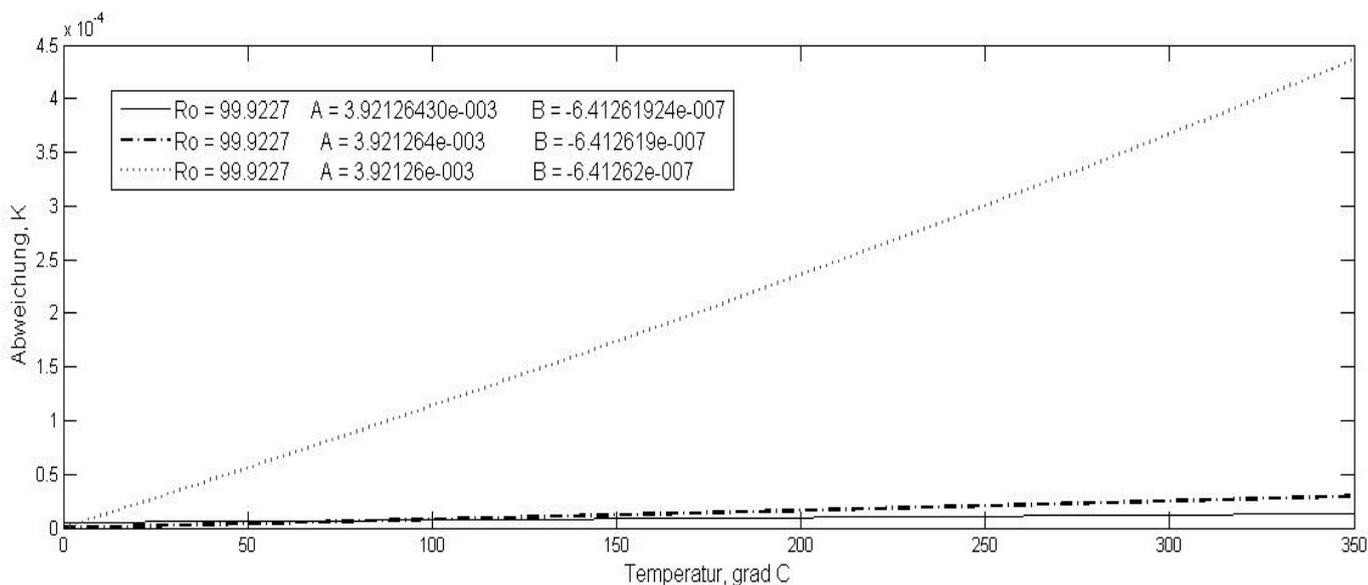


Abbildung 4.1.3 Abweichung aufgrund der Rundung der Kennlinienkoeffizienten des Pt100-Prüflings.

Man erkennt aus der Tabelle 3.4, dass die Abweichung aufgrund der Rundung nicht signifikant ist und bei den weiteren Berechnungen vernachlässigt werden kann. Weiterhin sind die folgenden gerundeten Koeffizienten angenommen.

$$R_0^* = 99.9227 \, \Omega \qquad A^* = 3.92126 \cdot 10^{-3} \qquad B^* = -6.41262e \cdot 10^{-3}$$

Tabelle 4.1.4 Abweichungen aufgrund der Rundung der Kennlinienkoeffizienten der Pt100-Prüflings bei der untersuchenden Temperaturen

T(R)	R	Abweichung, K		
		Ro = 99.9227 A = 3.92126430e-003 B = -6.41261924e-007	Ro = 99.9227 A = 3.921264e-003 B = -6.412619e-007	Ro = 99.9227 A = 3.92126e-003 B = -6.41262e-007
85	132.76475	7.02E-06	1.37E-05	9.61E-05
150	157.25446	8.52E-06	2.04E-05	1.74E-04
300	211.7028	1.21E-05	3.70E-05	3.67E-04

4.1.5 Die Eigenerwärmung des Sensors

Widerstands-Temperatur Sensoren gehören zu den passiven elektrischen Bauelementen. Um ihren temperaturabhängigen elektrischen Widerstand $R(T)$ zu messen, muss durch das Messelement ein Strom I fließen. Die dadurch dem Sensor zugeführte elektrische Leistung:

$$P = R(T) \cdot I^2 = U^2 / R(T) \tag{4-8}$$

erwärmt ihn dabei. Die durch die Eigenerwärmung verfälschte Sensortemperatur $T_{S,Erw}$ ist dann größer als die unverfälschte T_S . Die Temperaturerhöhung δT_{Eig} ist proportional zu der Leistung P im Sensor und hängt quadratisch von Messstrom I bzw. der Spannung U am Messwiderstand ab:

$$\delta T_{Erw} = T_{S,Erw} - T_S = K \cdot P = K \cdot R(T) \cdot I^2 = K \cdot U^2 / R(T) \quad (4-9)$$

Diese Differenz stellt einen thermischen Messfehler dar. Proportionalitätsfaktor in Gl. (4 - 9) ist der Eigenerwärmungskoeffizient K (Einheit: K/mW bzw. K/W). Er gibt den Eigenerwärmungsfehler je Einheit der Messleistung P an.[1]

Da der Eigenerwärmungskoeffizient K in Abhängigkeit vom konstruktiv-thermischen Aufbau des Temperaturfühlers und von den Messbedingungen nur über aufwendige Modellrechnungen und bei Kenntnis aller relevanten Daten rechnerisch abgeschätzt werden kann, wird er im Regelfall für konkrete reproduzierbare Messbedingungen experimentell bestimmt. Dazu werden Widerstände R_1 und R_2 bzw. die Temperaturen T_1 und T_2 des Widerstandsthermometers unter gleichen Bedingungen d.h. bei gleicher Mediumtemperatur und gleichen Wärmeübergangsbedingungen für mindestens zwei verschiedenen Stromstärken I_1 und I_2 gemessen.

Der Anstieg der Geraden durch die beiden Messpunkte $T_1(P_1)$ und $T_2(P_2)$ bzw. $R_1(T_1)$ und $R_2(T_2)$ ist der gesuchte Eigenerwärmungskoeffizient K:

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{T_2(I_2) - T_1(I_1)}{P_1 - P_2} = \frac{\Delta R}{S(T)\Delta P} = \frac{R_2(I_2) - R_1(I_1)}{S(T)R(T)(I_2^2 - I_1^2)} \quad (4-10)$$

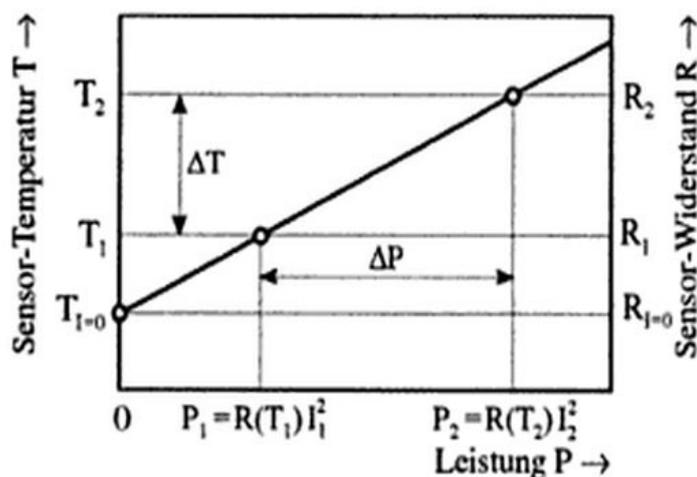


Abbildung 4.1.4 Experimentelle Bestimmung von K, Extrapolation auf T(I=0)[Quelle [1]]

Aus der Gleichung (3-8) für die Berechnung des Eigenerwärmungskoeffizienten K ergibt sich auch die Möglichkeit, die Sensortemperatur T_S für den Messstrom $I = 0$ und damit $\Delta T = 0$ zu berechnen.

Bei zwei unterschiedlichen Messströmen I_1 und I_2 werden dazu die Sensortemperaturen T_1 und T_2 bestimmt:

$$T_{I=0} = T_1 - K \cdot R(T) \cdot I_1^2 = T_1 - (T_2 - T_1) \frac{I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} \quad (4-11)$$

Statt der Temperaturwerte T_1 und T_2 kann eine entsprechende Form dieser Beziehung auch für die gemessenen Widerstandswerte R_1 und R_2 benutzt werden, wenn bei den meist relativ kleinen Temperaturdifferenzen ΔT von einer Proportionalität

$$\Delta R \sim \Delta T \quad (4-12)$$

ausgegangen werden kann (Abbildung 4.1.4) [1]:

$$R_{I=0} = R_1 - (R_2 - R_1) \frac{I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} \quad (4-13)$$

Die experimentelle Ermittlung der Eigenerwärmung.

Im vorhandenen Thema wurde der Einfluss von der Eigenerwärmung bei der Oberflächentemperaturmessungen untersucht:

- An der Stahl- und Aluminiumprüfkörperoberfläche bei den Kerntemperaturen T_K 85 °C, 150 °C und 300 °C,
- In Luft bei Raumtemperatur.

Die Messkette besteht aus folgenden Komponenten:

- Platintasttemperaturfühler Pt100
- Präzisionsstromgeber „Digistant“ Typ 6426
- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970A mit Multiplexereinschub HP 34901A

Die Messschaltung ist in der Abbildung (3.4) dargestellt. Der konstruktive Aufbau des Fühlers erlaubt es, den Widerstand in 4-Leiter Schaltung zu messen. Mit dem Präzisionsstromgeber werden die gewählten Prüfströme I über die Strompfad geschickt. Der vom Multimeter gemessene Spannungsabfall $U_{R(T)}$ kann dann in den Widerstand des Sensors $R(T)$ nach der Gleichung(4-14) umgerechnet werden.

$$R(T) = \frac{U_{R(T)}}{I} \quad (4-14)$$

Der Fühler und die Oberfläche sind auf konstante Temperatur temperiert.

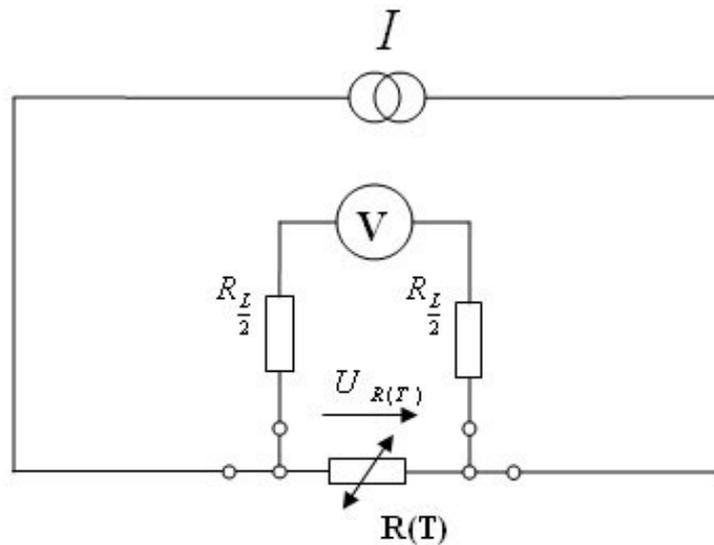


Abbildung 4.1.5 Schaltung für die Überprüfung des Eigenerwärmungseinflusses

Die Messung bei jedem Prüfstrom dauert 2 Minuten, dann wird der Strom manuell umgeschaltet. Gleichzeitig misst man mit den drei Mantelthermoelementen die Temperaturverteilung in dem Prüfkörper.

$$\Delta T = T_s - T_o \quad (4-15)$$

Mit dem Zweck, die Abhängigkeit von den Wärmeübergangsbedingungen zu zeigen und den Einfluss der zusätzlichen thermischen Isolation auf die Eigenerwärmung zu ermitteln, wurde der Tastfühler thermisch seitlich mit einer keramischen Isolierwolle isoliert und die Messungen bei den zu untersuchenden Prüfkörpertemperaturen wiederholt.

Die Einstellungen von Agilent 34970A sehen folgendermaßen aus:

- Messbereich: „Auto“ für die Messwiderstandsmessung
„10V“ für die Spannungsabfallmessung
- Auflösung : $6 \frac{1}{2}$ Stellen
- Integrationszeit über 20 Netzspannungszyklen je Messung
- Eingangswiderstand des Multimeters: „High“

Präzisionsstromgeber „Digistant“ Typ 6426

Mit dem Präzisionsstromgeber „Digistant“ Typ 6426 besteht die Möglichkeit, den Strom in dem Messkreis von 0.01 mA bis 99 mA mit Schritten von 0.01 mA zu ändern. Die für vorhandene Untersuchung gewählten Prüfstromnennwerte sind zu kalibrieren.

Die Kalibrierung erfolgt mit der Schaltung, die in der Abbildung 3.4 dargestellt ist. Den Pt100-Widerstand tauschen wir durch den Normalwiderstand „Burster“ Typenserie 1240-100 mit den Daten, laut dem zugehörigen Kalibrierschein

- Nominalwert: $R_N = 100,005 \Omega$
- Unsicherheit: $U(R_N) = 30 \text{ ppm}$ bei 1,9 mA

Der Multimeter Agilent 34970A wurde dabei so eingestellt:

- Messbereich 10 V
- Auflösung $6 \frac{1}{2}$ Stellen
- Integrationszeit über 200 Netzspannungszyklen je Messung
- Eingangswiderstand des Multimeters: „High“

Der Spannungsabfall U_{RN} bei jedem Nominalprüfstrom wurde 10-mal gemessen. Der Prüfstrom wurde nach der Formel (3-12) bestimmt

$$I = \frac{\overline{U_{RN}}}{R_N} \quad (4-16)$$

Die gewählten Nennwerten und die entsprechenden Kalibrierwerte sind in der Tabelle 4.1.5 unten angegeben.

Die Eigenerwärmungskoeffizienten wurden nach der Formel (4-13) für die unterschiedlichen Strompaare berechnet. Bei den kleineren Strömen ist der Einfluss von zufälligen Spannungsschwankungen viel bedeutender. Deshalb werden die Ergebnisse, die sich sehr stark von den anderen unterscheiden, bei der Mittelwertbildung nicht beachtet. Dabei werden auch die größere Differenzen zwischen I_1 und I_2 bevorzugt.

Tabelle 4.1.5 Die Kalibrierergebnisse für den gewählten Prüfströme des Präzisionsstromgebers

Nennwert I_N , mA	Kalibrierwert I , mA	Standardabweichung $U(I)$, mA
0.5	0.49997	1.62E-06
1	1.00010	9.66E-07
2	1.99990	1.16E-06
5	4.99940	2.35E-06
8	7.99980	2.67E-06
10	9.99880	5.40E-06
15	14.99800	5.68E-06

Berechnung von Eigenerwärmungskoeffizienten

In der Tabelle 4.1.6 werden die berechneten Eigenerwärmungskoeffizienten für den auf den Stahl- und Aluminiumprüfkörper aufgesetzten Pt100-Fühlers bei den Kerntemperaturen von 85 °C,

150 °C und 300 °C dargestellt. Man sieht, dass ein Eigenerwärmungskoeffizient K sowohl von der Wärmeleitfähigkeit des Messobjekts, als auch von den Bedingungen des Wärmeübergangs von dem Fühler an die Umgebung abhängig ist.

Tabelle 4.1.6 Eigenerwärmungskoeffizienten für den auf Stahl- und Aluminiumprüfkörper aufgesetzten Pt100-Fühlers bei den Kerntemperaturen von 85 °C, 150 °C und 300 °C

		Stahlprüfkörper		Aluminiumprüfkörper	
	Thermische Isolation	$\bar{K}, K/W$	$s(\bar{K}), K/W$	$\bar{K}, K/W$	$s(\bar{K}), K/W$
85	<i>keine</i>	65.853	5.471	22.014	0.913
	<i>isoliert</i>	61.802	2.498	26.174	0.843
150	<i>keine</i>	54.093	2.336	21.962	1.273
	<i>isoliert</i>	26.508	1.647	26.227	1.157
300	<i>keine</i>	41.343	1.940	18.125	0.918
	<i>isoliert</i>	22.638	0.838	19.187	1.112

Der Eigenerwärmungskoeffizient bei der Messung in der Luft bei der Raumtemperatur:

$$\bar{K} = 203.6814 \text{ K/W} \quad s(\bar{K}) = 5.126 \text{ K/W}$$

ist groß im Vergleich zu der Messung an dem Prüfkörper, weil der äußere thermische Widerstand in der Luft größer ist und die Wärme von dem Sensor langsamer abgeleitet wird.

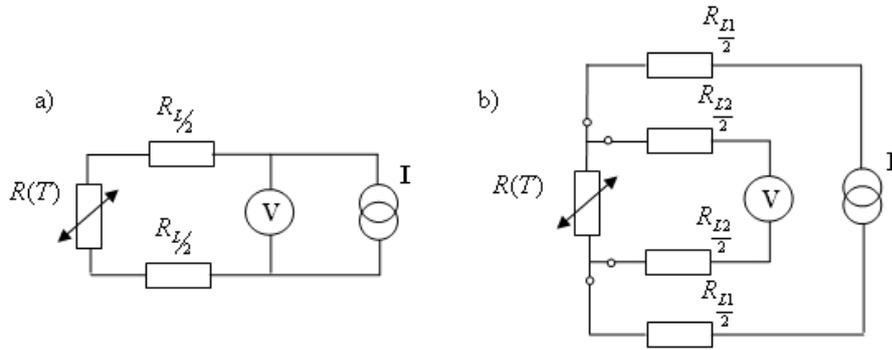
Mit der Hilfe von diesen Koeffizienten wurden die Eigenerwärmungsfehler für die Messungen mit zusätzlicher Anpresskraft 10 N bei entsprechenden Bedingungen berechnet und in die Tabelle 4.1.7 eingetragen.

Tabelle 4.1.7 Die berechnete Eigenerwärmungsfehler für die Messungen mit zusätzlicher Anpresskraft

	Stahl		Aluminium	
	$\delta T_{Eig}, K$	$s(\delta T_{Eig}), K$	$\delta T_{Eig}, K$	$s(\delta T_{Eig}), K$
85	0.0086	0.0007	0.0029	0.0001
150	0.0083	0.0004	0.0034	0.0002
300	0.0110	0.0005	0.0037	0.0002

4.1.6 Einfluss der Leitungswiderstände

Der Messwiderstand und das Messgerät müssen über Anschlussleitungen miteinander verbunden werden, deren temperaturabhängiger Widerstand einen systematischen Fehler bei der Temperaturmessung hervorrufen kann. Die Normwerte für die Kennlinien und ihre zulässigen Abweichungen sowie entsprechende Herstellerangaben beziehen sich im allgemeinen nur auf die Messwiderstände. Der Widerstand von weiteren Anschlussleitungen im Widerstandsthermometer ist dabei nicht berücksichtigt. [1]



**Abbildung 4.1.6 Anschlussschaltungen von Messwiderständen:
a) 2-Leiter-Schaltung und b) 4-Leiter-Schaltung**

Durch die 4-Leiter-Schaltung wird der Einfluss der Zuleitungswiderstände deutlich vermindert, weil die Strom- und Spannungsmesskreise voneinander getrennt sind.

Für die Darstellung des Einflusses der Zuleitungswiderstände wurde eine Reihe aus 50 Messungen in 2-Leiter-Schaltung (Abbildung 4.1.6, a) und 4-Leiter-Schaltung (Abbildung 4.1.6, b) am Aluminiumprüfkörper für die Temperaturen 85 °C und 300 °C nacheinander bei gleichen Umgebungsbedingungen durchgeführt.

Wenn mit 2-Leiter-Schaltung gemessen wird, muss eine Korrektur aufgrund des Einflusses vom Zuleitungswiderstand berücksichtigt werden:

$$\delta R_{RL} = R_{2L}(T) - R_{4L}(T)$$

$R_{2L}(T)$, $R_{4L}(T)$ bezeichnen hier die Widerstände des Sensors bei der Temperatur T für die 2-Leiter- und 4-Leiter-Schaltung entsprechend.

Tabelle 4.1.8 Einfluss von den Zuleitungswiderständen für Pt100-Fühler bei den Temperaturen von 85 °C und 300 °C

	Schaltung	$\bar{R}(T), \Omega$	$s(\bar{R}), \Omega$	$\delta R_{RL}, \Omega$	$\bar{T}, ^\circ\text{C}$	$\delta T_{RL}, ^\circ\text{C}$
$T_K = 85^\circ\text{C}$	2-Leiter	130.5985	0.0015	0.8586	79.3189	2.3493
	4-Leiter	129.7399	0.0012		76.9696	
$T_K = 300^\circ\text{C}$	2-Leiter	203.6639	0.002	0.9871	276.5405	2.7493
	4-Leiter	202.6768	0.0038		273.7911	

4.1.7 Einfluss der parasitären Thermospannungen

An Übergängen verschiedener Materialien bzw. durch Materialinhomogenitäten innerhalb des Messkreises z. B. in den Zuleitungen zum Messwiderstand oder an Kontaktstellen können bei entsprechenden Temperaturdifferenzen bzw. Temperaturprofilen sogenannte parasitäre Thermospannungen auftreten. Diese Thermospannungen überlagern sich dem zu messenden Spannungsabfall am Messwiderstand und führen zu einem Temperaturmessfehler.[1]

Das Messdatenerfassungssystem Agilent 34970 verfügt über eine Funktion „Offset-Compensation“, die zur Eliminierung der Auswirkungen jeglicher Gleichspannungen in der Messschaltung dient. Bei dieser Technik wird eine Differenz zwischen zwei Widerstandsmessungen auf den angegebenen Kanälen der Multiplexerschub berechnet. Dabei ist bei der ersten Messung die Stromquelle des internen Digitalmultimeters eingeschaltet, bei der zweiten Messung ist sie ausgeschaltet. [vgl. 3]

Um den Einfluss von den parasitären Thermospannungen zu untersuchen, wurden 50 Messungen bei 150 °C am Stahlprüfkörper mit der eingeschaltete Funktion „Offset-Compensation“ durchgeführt. Danach wurde diese ausgeschaltet und bei gleichen Bedingungen wurde die Messung wiederholt.

Tabelle 4.1.9 Korrektur aufgrund des Einflusses der parasitären Thermospannungen mit Hilfe der Funktion „Offset-Compensation“ von Agilent 34970

Offset Compensation	$\bar{R}(T), \Omega$	$s(\bar{R}), \Omega$	δR_{ThSp}
aus	153.2514	0.023465	0.069926
ein	153.1815	0.054116	

Die verarbeiteten Ergebnisse werden in der Tabelle 4.1.9 dargestellt. So sieht man, dass im vorhandenen Messkreis parasitäre Thermospannungen entstehen und bei der Messung mit ausgeschalteten Funktion „Offset-Compensation“ muss die entsprechende Korrektur δR_{ThSp} durchgeführt werden:

$$\delta R_{ThSp} = R_{CompON}(T) - R_{CompOFF}(T)$$

R_{CompON} und $R_{CompOFF}$ sind die entsprechenden Widerstandswerte bei der ein- und ausgeschalteten „Offset“-Kompensation.

4.1.8 Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung mit Pt100-Fühler

Nach den Wiederholungsmessungen mit dem Pt100-Fühler an Stahl- und Aluminiumprüfkörpern wurden die 6 Messunsicherheitsbudgets abhängig vom Material des Prüfkörpers und der Temperatur des Messobjekts aufgestellt. Die Methoden für die Bestimmung der Unsicherheiten sind in allen 6 Fällen gleich.

Die Messungen wurden mit zusätzlicher Anpresskraft bei der senkrechten Einspannung des Fühlers mit der Hilfe der Anpressvorrichtung durchgeführt. Die Messungen erfolgten in 4-Leiter-Schaltung.

Das Messdatenerfassungssystem wurde dabei folgendermaßen eingestellt:

- Messbereich: 1 k Ω
- Integrationszeit: 2 Netzspannungszyklen
- „Offset“-Kompensation eingeschaltet

Das Modell der Temperaturmessung kann wie folgt dargestellt werden:

$$T = T_M + \Delta T_{th,1} + \Delta T_{th,2+3} + \delta T_{Eig} + \delta T_{TKal} + \delta T_{MKal} + \delta T_{MAufl}$$

T - Temperatur der Messobjektoberfläche;

T_M - nach der Anzeige des Multimeters in Temperatur berechneter Widerstand des Sensors;

$\Delta T_{th,1}$ - erster thermische Teilfehler;

$\Delta T_{th,2+3}$ - die Summe des zweiten und dritten thermischen Teilfehler;

δT_{Eig} - Korrektur aufgrund der Eigenerwärmung des Thermometers;

δT_{TKal} - Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers;

δT_{MKal} - Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters;

δT_{MAufl} - Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Multimeters;

Als Beispiel wird hier das Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung des Aluminiumprüfkörpers mit der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ betrachtet. Die mittlere Umgebungstemperatur bei der Messung beträgt $T_U = 25,303 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei der Annahme der Normalverteilung beträgt die Unsicherheit $u(T_U) = 0,167 \text{ K}$.

Die gemessene Temperatur T_M ist ein Mittelwert aus 4 Wiederholungsmessungen je 300 Sekunden bzw. Mittelwerte aus ca. 300 einzelnen Messungen bei gleicher Messobjekttemperatur. Er beträgt $T_M = 141,3797 \text{ }^\circ\text{C}$. Es wird eine Normalverteilung angenommen. Damit ergibt sich eine Unsicherheit $u(T_M) = 0,8192 \text{ K}$.

Dabei wurde auch der erste thermische Teilfehler $\Delta T_{Th,1}$ als eine Differenz zwischen gestörter und ungestörter Oberflächentemperatur nach jeder Wiederholungsmessung berechnet (Abschnitt Tabelle 3.2.1). Der Mittelwert beträgt $\Delta T_{Th,1} = 0,1285 \text{ K}$. Unter Annahme der Normalverteilung wurde die Unsicherheit $u(\Delta T_{Th,1}) = 0,0385 \text{ K}$ bestimmt.

Die Summe des zweiten und dritten thermischen Teilfehlers $\Delta T_{Th,2+3}$ wurde als die Differenz zwischen der mittleren gestörten Oberflächentemperatur und der mittleren Sensortemperatur berechnet. Dieses wurde in Abschnitt 3.3 und 3.4 untersucht. Analog zu dem ersten thermischen Teilfehler wurde der Mittelwert $\Delta T_{Th,2+3} = 5,7344 \text{ K}$ aus 4 Wiederholungsmessungen gebildet. Hier wird auch eine Normalverteilung angenommen. Somit beträgt die Unsicherheit $u(\Delta T_{Th,2+3}) = 0,0292 \text{ K}$.

Die Ergebnisse der Eigenerwärmungsuntersuchung wurden im Abschnitt 4.1.4 dargestellt. Für jede Temperatur und beide untersuchten Prüfkörper wurde ein Eigenerwärmungskoeffizient bestimmt. Durch die Multiplikation mit der im Sensor umgesetzten Leistung P wurde der Mittelwert $\delta T_{Eig} = 0,0033$

K und die Unsicherheit $u(\delta T_{Eig}) = 0.0002 K$ berechnet. Die Ergebnisse für anderen Kerntemperaturen und Prüfkörper sind aus der Tabelle 4.1.7 zu entnehmen.

Die Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers δT_{TKal} wurde im Abschnitt 4.1.4 ermittelt. Unter Annahme der Normalverteilung ist ihr Schätzwert gleich $\delta T_{TKal} = 0 K$. Die Unsicherheit wurde aus dem Kalibrierschein für Normalthermometer entnommen. Diese beträgt 0,2 K beim Erweiterungsfaktor $k = 2$. Somit beträgt die Unsicherheit $u(\delta T_{TKal}) = 0,1 K$.

Die Unsicherheit, die als Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters δR_{MKal} zu berücksichtigen ist, ist im dazugehörigen Datenblatt angegeben. Diese Unsicherheit wurde im Abschnitt 6.1 als Widerstandswert bestimmt. Diese ist in einen Temperaturwert durch die Multiplikation mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten $S(R)$ umzurechnen. Es wurde eine Rechteckverteilung angenommen. Der Schätzwert beträgt $\delta R_{MKal} = 0 \Omega$. Ihm entspricht eine Unsicherheit $u(\delta R_{MKal}) = 0,0586 \Omega$ und ein Empfindlichkeitskoeffizient $S(R) = 2.616 K/\Omega$.

Die Messung erfolgte mit der Auflösung $5 \frac{1}{2}$ Stellen. Somit werden 2 Nachkommastellen angezeigt. Damit weicht der gemessene Wert maximal um $0,005 \Omega$ vom tatsächlichen Wert ab. Der Schätzwert der Korrektur aufgrund begrenzter Auflösung beträgt somit $\delta R_{MAufl} = 0 \Omega$. Bei angenommener Rechteckverteilung ist die Unsicherheit gleich $u(\delta R_{MAufl}) = 0,0017 \Omega$ und wird danach mit dem oben genannten Sensitivitätskoeffizient $S(R)$ in die Temperatur umgerechnet.

Tabelle 4.1.10 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ °C}$ mit Pt100-Tasttemperaturfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	141.3797 K	0.8192 K	Normal	1	0.8192 K
$\Delta T_{Th,1}$	0.1285 K	0.0385 K	Normal	1	0.0385 K
$\Delta T_{Th,2+3}$	5.7344 K	0.8094 K	Normal	1	0.8094 K
δT_{Eig}	-0.0034 K	0.0002 K	Normal	1	0.0002 K
δT_{TKal}	0 K	0.1000 K	Normal	1	0.1000 K
δR_{MKal}	0 Ω	0.0586 Ω	Rechteck	2.616	0.2657 K
δR_{MAufl}	0 Ω	0.0017 Ω	Rechteck	2.616	0.0076 K
T	147.2393 °C				1,1867 K

Der dominierende Beitrag zur Standardunsicherheit der Ergebnisgröße ist die Summe des zweiten und dritten thermischen Messfehlers, sowie die Standardunsicherheit der gemessenen Temperatur. Aus den Gründen, dass die alles dominierenden Größen normal verteilt sind, wird auch für die Ergebnisgröße eine Normalverteilung angenommen. Für die Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 95\%$ beträgt der Erweiterungsfaktor somit $k = 2$.

Somit beträgt ein berechneter Temperaturwert für die Oberflächentemperaturmessung mit Pt100-Tasttemperaturfühler an Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T = (147,2393 \pm 2,3735) \text{ }^\circ\text{C}$$

Angegeben ist die erweiterte Unsicherheit die sich aus der Standardunsicherheit durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ ergibt. Sie entspricht einer angenommenen Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 0,95$.

Die andren fünf Messunsicherheitsbudgets sind im Anhang A.10-14 angegeben.

4.2 NTC

4.2.1 Allgemein

Neben Metallwiderstandsthermometer sind auch in der Temperaturmesstechnik die Halbleiterthermometer, auch Thermistoren genannt, sehr verbreitet. Halbleiterthermometer werden in Thermistoren mit positivem und negativem Temperaturkoeffizienten unterteilt und deshalb als PTC- bzw. NTC-Thermistoren oder Kaltleiter bzw. Heißeiter bezeichnet.

Keramische Thermistoren mit negativen Temperaturkoeffizienten haben gegenüber Metallwiderstandsthermometern die Vorteile einer großen Empfindlichkeit und eines großen Widerstandsbereiches. Der spezifische thermische Widerstand der Heißeiter ist umgekehrt proportional zum Produkt aus Konzentration und Beweglichkeit der dominierenden Ladungsträger und wird demzufolge von einer Mikrostruktur der Keramik, wie der Korngröße, den Korngrenzeigenschaften und den Leerräumen beeinflusst.[1]

Die typische Kennlinie $R(T)$ des Thermistors wird näherungsweise als die Funktion wiedergegeben:

$$R(T) = R_N \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right]$$

Darin sind die Werte von Temperatur T wie für die Referenztemperatur T_N in Kelvin einzusetzen. Die Referenztemperatur T_N beträgt im allgemeinen:

$$T_N = 298 \text{ K} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die üblichen Nennwerte für den Widerstand R_N bei der Referenztemperatur liegen zwischen $2 \text{ } \Omega$ bis $1 \text{ M}\Omega$. Der besondere Vorteil der Sensoren mit einem hohen Nennwert R_N liegt darin, dass weder der Zuleitungswiderstand noch dessen Temperaturabhängigkeit die Messung merklich verfälscht.

Der B-Wert beschreibt die Temperaturabhängigkeit des Heißeiters. Typische Werte für diesen liegen im Bereich $B = 2100 \dots 4700 \text{ K}$. Diese Größe kann näherungsweise aus zwei Werten R_1 und R_2 für die Temperaturen T_1 und T_2 entsprechend bestimmt werden:

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{R_1(T_1)}{R_2(T_2)}$$

Wegen seiner Temperaturabhängigkeit soll B nach DIN EN 143000 in Datenblättern um allgemeinen auf folgende Temperaturen bezogen sein:

$$T_1 = 298,15 \text{ K} = 25 \text{ °C} \qquad T_2 = 358,15 \text{ K} = 85 \text{ °C}$$

Bei solchen Temperaturen sollen die Indizes wie $B_{25/85}$ zugefügt werden, weil es noch eine Normierung nach $T_2 = 100 \text{ °C}$ gibt.

Ein anderes, besser handliches Verfahren zur Approximation der Kennlinie erreicht man mit Polynomen höherer Ordnung.

$$\ln R = b_0 + \frac{b_1}{T} + \frac{b_2}{T^2} + \frac{b_3}{T^3}$$

Die Gleichung für die inverse Kennlinie für eine entsprechende Approximation lautet:

$$\frac{1}{T} = a_0 + a_1 \ln R + a_2 \ln^2 R + a_3 \ln^3 R$$

Eine verbreitete Form dieser Formel ist die Steinhart-Hart-Gleichung. Hier wird auf des quadratische Glied ($a_2 = 0$) verzichtet:

$$\frac{1}{T} = a_0 + a_1 \ln R + a_3 \ln^3 R$$

Und die entsprechende Gleichung der inversen Kennlinie:

$$\ln R = b_0 + \frac{b_1}{T} + \frac{b_3}{T^3}$$

Die Einsatzmöglichkeiten der NTC-Sensoren sind sehr vielfältig. Da diese gegenüber den Platin-Messwiderständen preisgünstiger sind, findet man sie in vielen Erzeugnissen der Großserienproduktion. Wegen ihrer geringen Abmessungen und dabei hohen Empfindlichkeit werden NTC-Temperatursensoren auch für wissenschaftliche Messungen, in Raumfahrt, Militärtechnik sowie Medizin benutzt. [vgl [1] S. 657]

4.2.2 Bauform

Das zu untersuchende Widerstandsthermometer NTC des Herstellers „Testo“ hat eine flache robuste runde Kontaktfläche mit ca. 5 mm Durchmesser. Auch wie der untersuchte Pt100-Fühler ist diese Bauform ohne federnde Elemente und nur für Messungen auf glatten Oberflächen geeignet. Auf unebenen Oberflächen nimmt der Kontaktwiderstand und somit der thermischer Messfehler stark zu.

Die Kopplung des Fühlers mit dem Messgerät Agilent 34970A bzw. dem 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A erfolgt durch einen Mini-DIN-Stecker (Abbildung 4.1.1) und die

entsprechende Buchse. Aufgrund des großen Grundwiderstandes des Sensors ($5\text{ k}\Omega$), können die Messungen mit dieser Bauform nur in 2-Leiter-Schaltung durchgeführt werden.

4.2.3 Beschreibung der Messkette

Die Messkette sieht genauso aus wie die Messkette für die Temperaturmessung mit Pt100-Fühler (Abschnitt 4.1.3), als Fühler dient der NTC-Fühler.

Der **eigentliche Messfehler des Sensors** ΔT_S kann wie folgt dargestellt werden:

$$\Delta T_S = \delta T_R + \delta T_{Eig}$$

δT_R ist der Fehler der Widerstandsmessung δR_R bei der entsprechenden Sensitivität $S(T)$ in den Temperaturfehler umgerechnet:

$$\delta T_R = \frac{\delta R_R(T)}{S(T)}$$

δR_R berechnet als:

$$\delta R_R = \delta R_{TKal} + \delta R_{ThSp}$$

δR_{TKal} ist die Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers. Diese kann entweder aus dem Datenblatt entnommen oder mit der Hilfe der Kalibrierung bestimmt werden.

δR_{ThSp} ist Korrektur infolge der im Messkreis entstehenden parasitären Thermospannungen.

Ggf. kann diese Korrektur mit Hilfe des Multimeters „Agilent 34970“ durch Einschalten der Funktion „Offset Compensation“ gleich bei der Messung durchgeführt werden. Dabei wird der Messwert als die Differenz zwischen dem einfachen Messwert mit Strom und ohne Strom (d.h. die innere Stromquelle des Messgerätes wird ausgeschaltet) berechnet.

δT_{Eig} ist der Eigenerwärmungsfehler. Hier wird er nicht betrachtet, sowohl aufgrund der konstruktiven Besonderheit, die nur die Messung in 2-Leiter-Schaltung erlaubt, als auch aus Zeitgründen.

Der **eigentliche Messfehler des Sensors** ΔT_S wird abschließend wie folgt angegeben:

$$\Delta T_S = \delta T_R$$

4.2.4 Kalibrierung des NTC-Fühlers

Die Kennlinie des NTC-Fühlers wurde im Vergleichsverfahren bestimmt. Das Kalibrieren wurde im Umwälzthermostat durchgeführt. Als Normalthermometer wurde ein vom DKD kalibriertes Pt100-Widerstandsthermometer genommen. Prüf- und Normalthermometer wurden bei den beiden

Messungen in gutem thermischem Kontakt zueinander befestigt. Dadurch wurde garantiert, dass sich beide Thermometer bei gleichen Temperaturen befinden.

Die Messkette bestand aus folgenden Messgeräten:

- Umwälzthermostat Julabo FP40
- Platinwiderstandsthermometer Pt100
- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970 mit 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A

Das Normalthermometer ist in 4-Leiter-Schaltung an einem 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A, der sich in einem Steckplatz im Agilent 34970 befindet, angeschlossen. Der Prüfling wird in 2-Leiter-Schaltung zu diesem Messgerät geschaltet. Das Messdatenerfassungssystem hat dabei folgende Einstellungen:

- Messbereich: automatisch
- Auflösung: $6 \frac{1}{2}$ Stellen
- Integrationszeit 10 Netzspannungszyklen je Messung
- Offset-Kompensation eingeschaltet

An jedem Kalibrierpunkt wurde die Messdatenauswertung für jeden temperaturstabilen Bereich danach durchgeführt. Der Umwälzthermostat wurde für 30-Min-Kalibrieren an jedem aus 4 Kalibriertemperaturen $T_{th,i}$ 25 °C, 45 °C, 65 °C und 85 °C eingestellt.

Die Kalibrierergebnisse sind in der Tabelle 4.2.1 dargestellt:

Tabelle 4.2.1 Kalibrierergebnisse für einen NTC-Fühler

Normal		Prüfling	
$\bar{T}_N, \text{°C}$	$s(\bar{T}), \text{°C}$	$\bar{R}(T), \Omega$	$s(\bar{R}), \Omega$
24.7824	0.0010	5044.1000	0.1688
44.7719	0.0016	2203.0861	0.1099
64.7600	0.0095	1050.8642	0.3873
84.7458	0.0030	540.1715	0.1033

4.2.5 Berechnung der Kennlinienkoeffizienten

Die Kennlinienkoeffizienten wurden nach einer **Steinhart-Hart-Gleichung** berechnet. Dafür müssen drei Kalibriertemperaturen genommen werden. Aus vier gemessenen Kalibrierpunkten wurden 4 Kombinationen mit je 3 Punkten gebildet. Danach wurden Kennlinienkoeffizienten für jede Kombination berechnet.

Die Kombination besteht aus den Messwerten bei den im Umwälzthermostaten eingestellten Temperaturen:

- die erste $T_{th,i} = \{25, 45, 65\} \text{ } ^\circ\text{C}$,
- die zweite $T_{th,i} = \{45, 65, 85\} \text{ } ^\circ\text{C}$,
- die dritte $T_{th,i} = \{25, 45, 85\} \text{ } ^\circ\text{C}$,
- die vierte $T_{th,i} = \{25, 65, 85\} \text{ } ^\circ\text{C}$

Die berechnete Koeffizienten und der gebildete Mittelwert ist in der Tabelle 4.2.2 dargestellt.

Für jede Kombination der Koeffizienten wurde eine Temperaturabweichung des Prüflings von dem Normalthermometers T_N an jedem Kalibrierpunkt berechnet und in die Tabelle 4.2.2 eingetragen.

Die Abweichung wurde nach folgender Formel bestimmt und sind in Tabelle 1.11.3 dargestellt:

$$\Delta T_{Appr} = T - T_N$$

Tabelle 4.2.2 Die nach Steinhart-Hart-Gleichung berechneten Koeffizienten für jede Kombination der im Umwälzthermostat eingestellten Temperaturen, Mittelwertbildung ohne 1. Kombination

	1.Kombination	2. Kombination	3. Kombination	4. Kombination	\bar{a}_i	$s(\bar{a}_i)$
a_0	0.0012845	0.0012911	0.0012870	0.0012892	0.0012891	1.685E-06
a_1	0.00023618	0.00023482	0.00023572	0.00023526	0.00023527	5.0666E-07
a_3	9.40898E-08	1.02511E-07	9.64E-08	9.92E-08	9.93738E-08	3.1433E-09

Man erkennt aus der Tabelle 4.2.3, dass die berechnete Werte nach den Koeffizienten der **erster** Kombination eine erhebliche Temperaturabweichung ΔT_{Appr} schon bei $T_{th} = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ haben. Da die Untersuchungen des NTC-Fühlers bei den Temperaturen des Messobjektes $85 \text{ } ^\circ\text{C}$ und $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ durchgeführt werden, sind die Koeffizienten bei der Mittelwertbildung nicht zu beachten. Die mittleren Koeffizienten und die entsprechenden Standardabweichungen sind in der Tabelle 4.2.2 angegeben.

Die Unsicherheit δR_{TKal} bzw. δT_{TKal} wird durch die Standardunsicherheit der Koeffizienten $s(\bar{a}_i)$ verursacht. Diese kann als kombinierte Unsicherheit der Steinhart-Hart-Gleichung berechnet werden.

$$T = \frac{1}{a_0 + a_1 \ln R + a_3 \ln^3 R}$$

$$\delta T_{TKal} = \delta T = \sqrt{\frac{\partial T}{\partial a_0} s(\bar{a}_0) + \frac{\partial T}{\partial a_1} s(\bar{a}_1) + \frac{\partial T}{\partial a_3} s(\bar{a}_3)}$$

$\frac{\partial T}{\partial a_0}$, $\frac{\partial T}{\partial a_1}$ und $\frac{\partial T}{\partial a_3}$ sind die entsprechende Empfindlichkeitskoeffizienten der Steinhart-Hart-

Gleichung:

$$\frac{\partial T}{\partial a_0} = -\frac{1}{\sqrt{a_0 + a_1 \ln R + a_3 \ln^3 R}}$$

$$\frac{\partial T}{\partial a_1} = -\frac{\ln R}{\sqrt{a_0 + a_1 \ln R + a_3 \ln^3 R}}$$

$$\frac{\partial T}{\partial a_3} = -\frac{\ln^3 R}{\sqrt{a_0 + a_1 \ln R + a_3 \ln^3 R}}$$

Tabelle 4.2.3 Die Temperaturabweichungen der nach Koeffizienten aus der Tabelle 4.2.2 berechneten Werten des NTC-Fühlers von den Werten des Normalthermometers

$T_{th}, ^\circ C$	25	45	65	85
$T_N, ^\circ C$	24.7824	44.7719305	64.7600226	84.7457501
$\Delta T_{Appr,1}, K$	0.0002880	0.0002507	0.0004166	0.0214445
$\Delta T_{Appr,2}, K$	-0.0226538	-0.0001861	-0.0000252	-0.0001373
$\Delta T_{Appr,3}, K$	0.0002092	0.0001677	-0.0068426	0.0002159
$\Delta T_{Appr,4}, K$	-0.0001265	0.0071517	-0.0000100	-0.0001210
$\Delta T_{Appr}, K$	-0.0078059	0.0020847	-0.0025955	-0.0003255

Die Empfindlichkeit der Kennlinie $S(R)$ kann nach folgender Formel ermittelt werden:

$$S(R) = \frac{\partial T}{\partial R} = -\frac{\frac{a_1}{R} + a_3 \cdot 3 \cdot \frac{\ln^2 R}{R}}{\sqrt{a_0 + a_1 \ln R + a_3 \ln^3 R}}$$

Die berechneten Unsicherheiten für die Wiederholungsmessungen mit zusätzlicher Anpresskraft bei den Temperaturen 85 °C und 150 °C an Stahl- und Aluminiumprüfkörper wurden in die Tabelle 4.2.4 eingetragen.

Tabelle 4.2.4 Unsicherheit aufgrund der Kalibrierung des NTC-Fühlers δT_{TKal} und Empfindlichkeit $S(R)$ seiner Kennlinie bei der Messungen mit zusätzlicher Anpresskraft

	Stahl		Aluminium	
	$\delta T_{TKal}, K$	$S(R), K/\Omega$	$\delta T_{TKal}, K$	$S(R), K/\Omega$
85 °C	0.467	-0.039	0.467	-0.045
150 °C	0.496	-0.22	0.496	-0.29

4.2.6 Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung mit NTC-Fühler

Nach den Wiederholungsmessungen mit dem NTC-Fühler an Stahl- und Aluminiumprüfkörper wurden die entsprechenden Messunsicherheitsbudgets aufgestellt. Die Messungen wurden mit zusätzlicher Anpresskraft bei der senkrechten Einspannung des Fühlers mit der Hilfe der Anpressvorrichtung durchgeführt.

Das Messdatenerfassungssystem wurde dabei folgendermaßen eingestellt:

- Messbereich: automatisch
- Integrationszeit: 2 Netzspannungszyklen
- „Offset“-Kompensation eingeschaltet

Das Modell der Temperaturmessung sieht wie folgt aus:

$$T = T_M + \Delta T_{th,1} + \Delta T_{th,2+3} + \delta T_{TKal} + \delta T_{MKal} + \delta T_{MAufl}$$

T - Temperatur der Messobjektoberfläche;

T_M - nach der Anzeige des Multimeters in Temperatur berechneter Widerstand des Sensors;

$\Delta T_{th,1}$ - erster thermische Teilfehler;

$\Delta T_{th,2+3}$ - die Summe des zweiten und dritten thermischen Teilfehler;

δT_{TKal} - Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers;

δT_{MKal} - Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters;

δT_{MAufl} - Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Multimeters;

Es wurde insgesamt 4 Messunsicherheitsbudgets abhängig vom Material des Prüfkörpers und der Temperatur des Messobjekts aufgestellt. Die Methoden für Bestimmung der Unsicherheiten sind in allen 4 Fällen gleich.

Als Beispiel wird hier das Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung des Aluminiumprüfkörpers mit der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ betrachtet. Die mittlere Umgebungstemperatur bei der Messung beträgt $T_U = 25,323 \text{ K}$. Bei der Annahme der Normalverteilung beträgt die Unsicherheit $u(T_M) = 0,114635 \text{ K}$.

Die gemessene Temperatur T_M ist ein Mittelwert aus 4 Wiederholungsmessungen je 300 Sekunden bei gleicher Messobjekttemperatur. Er beträgt $T_M = 133,1987 \text{ K}$. Es wird eine Normalverteilung angenommen. Damit ergibt sich eine Unsicherheit $u(T_M) = 1,0116 \text{ K}$.

Dabei wurde auch der erste thermische Teilfehler $\Delta T_{Th,1}$ als eine Differenz zwischen gestörter und ungestörter Oberflächentemperatur nach jeder Wiederholungsmessung berechnet (Abschnitt 3.2). Der Mittelwert beträgt $\Delta T_{Th,1} = 0,4182 \text{ K}$. Unter Annahme der Normalverteilung wurde die Unsicherheit $u(\Delta T_{Th,1}) = 0,0292 \text{ K}$ bestimmt.

Die Summe des zweiten und dritten thermischen Teilfehlers $\Delta T_{Th,2+3}$ wurde als eine Differenz zwischen einer mittleren gestörten Oberflächentemperatur und einer mittleren Sensortemperatur berechnet. Dieser wurde in Abschnitt 3.3 und 3.4 untersucht. Analog zu dem ersten thermischen Teilfehler wurde der Mittelwert $\Delta T_{Th,2+3} = 13,6608 \text{ K}$ aus 4 Wiederholungsmessungen gebildet. Hier wird auch eine Normalverteilung angenommen. Somit beträgt die Unsicherheit $u(\Delta T_{Th,2+3}) = 0,0292 \text{ K}$.

Die Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers δT_{TKal} wurde im Abschnitt 4.2.4 ermittelt. Unter Annahme der Normalverteilung ist ihr Schätzwert gleich $\delta T_{TKal} = 0 \text{ K}$. Die Unsicherheit beträgt somit $u(\delta T_{TKal}) = 0,496 \text{ K}$.

Die Unsicherheit, die als Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters δR_{MKal} zu berücksichtigen ist, ist im Datenblatt angegeben. Diese Unsicherheit wurde im Abschnitt 6.1 als Widerstandswert bestimmt. Diese ist in einen Temperaturwert durch die Multiplikation mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten $S(R)$ aus der Tabelle 4.2.4 umzuwandeln. Es wurde eine Rechteckverteilung angenommen. Der Schätzwert beträgt $\delta R_{MKal} = 0 \text{ }\Omega$. Ihm entspricht eine Unsicherheit $u(\delta R_{MKal}) = 0,0585 \text{ }\Omega$ und ein Empfindlichkeitskoeffizient $S(R) = -0,29 \text{ K}/\Omega$.

Die Messung erfolgte mit der Auflösung $5 \frac{1}{2}$ Stellen. Somit werden 2 Nachkommastellen angezeigt. Damit weicht der gemessene Wert maximal um $0,005 \text{ }\Omega$ vom tatsächlichen Wert ab. Der Schätzwert der Korrektur aufgrund begrenzter Auflösung beträgt somit $\delta R_{MAufl} = 0 \text{ }\Omega$. Bei angenommener Rechteckverteilung ist die Unsicherheit gleich $u(\delta R_{MAufl}) = 0,0017 \text{ }\Omega$ und wird danach mit dem oben genannten Sensitivitätskoeffizient $S(R)$ in die Temperatur umgerechnet.

Tabelle 4.2.5 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ mit NTC-Tasttemperaturenfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	133,1987 K	1,0116 K	normal	1	1,0116 K
$\Delta T_{Th,1}$	0,4182 K	0,0292 K	normal	1	0,0292 K
$\Delta T_{Th,2+3}$	13,6608 K	1,0428 K	normal	1	1,0428 K
δT_{TKal}	0 K	0,4960 K	normal	1	0,4960 K
δR_{MKal}	0 Ω	0,0585 Ω	rechteck	-0,29	0,0170 K
δR_{MAufl}	0 Ω	0,0017 Ω	rechteck	-0,29	0,0005 K
T	147,2778 $^\circ\text{C}$				1,5356 K

Der dominierende Beitrag zur Standardunsicherheit der Ergebnisgröße ist die Summe des zweiten und dritten thermischen Messfehler, sowie die Standardunsicherheit der gemessenen Temperatur. Aus den Gründen, dass die alles dominierenden Größen normal verteilt sind, wird auch für die Ergebnisgröße eine Normalverteilung angenommen. Für die Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 95\%$ beträgt der Erweiterungsfaktor somit $k = 2$.

Somit beträgt der berechneter Temperaturwert für die Oberflächentemperaturmessung mit NTC-Tasttemperaturenfühler an Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T = (147,2778 \pm 3,0711) \text{ }^\circ\text{C}$$

Angegeben ist die erweiterte Unsicherheit die sich aus der Standardunsicherheit durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ ergibt. Sie entspricht einer angenommenen Normalverteilung mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 0,95$.

Die anderen drei Messunsicherheitsbudgets sind im Anhang angegeben.

5 Die Thermoelemente

5.1 Allgemein

Ein Thermoelement ist ein Bauteil aus zwei unterschiedlichen und an einem Ende miteinander verbundenen Materialien. Aufgrund seiner thermoelektrischen Eigenschaft liefert dieses eine temperaturabhängige Spannung ohne zusätzliche Energie. Die zwei anderen Enden sind mit einer Anschlussstelle bzw. Vergleichsstelle verbunden. Die Temperaturdifferenz zwischen Vergleichsstelle und Messstelle verursacht die elektrische Spannung. Wenn eine von den Temperaturen bekannt ist, kann die zweite ermittelt werden.

Abhängig von den Materialien der Thermodrähten werden die unterschiedlichen Typen der Thermoelemente genormt. In der vorhandenen Arbeit wird ein Thermoelement-Tasttemperaturfühler vom Typ K untersucht. Der positive Schenkel des Thermoelements Typ K wird aus NiCr hergestellt, der negative besteht aus NiAl. Die Einsatztemperaturen liegen im Bereich $-200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1372\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die Kennlinie im Temperaturbereich $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird durch folgende Beziehung beschrieben:

$$\frac{U(T)}{\mu\text{V}} = \sum_{i=0}^n a_i \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}}\right)^i + c_0 \cdot \exp\left[c_1\left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}} - c_2\right)^2\right]$$

Für diesen Temperaturbereich hat die Kennlinie den $n = 9$ Grad.

Die inverse Kennlinie im Bereich $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird als Polynom 9. Grades definiert:

$$\frac{T}{^{\circ}\text{C}} = \sum_{i=0}^m b_i \cdot \left(\frac{U}{\mu\text{V}}\right)^i$$

Da die Kennliniengleichungen solcher Grade nicht praktisch sind, wird häufig die Approximation mit einem Polynom 4. Grades benutzt.

$$\frac{U^*}{\mu\text{V}} = \sum_{i=0}^4 a_i^* \cdot \left(\frac{T}{^{\circ}\text{C}}\right)^i$$

sowie für die inverse Kennlinie:

$$\frac{T^*}{^{\circ}\text{C}} = \sum_{i=0}^4 b_i^* \cdot \left(\frac{U}{\mu\text{V}}\right)^i$$

Die Struktur und Koeffizienten bei der Beschreibung der Kennlinie mit den Polynomen höherer Ordnungen für aneinander anschließende Teilbereiche lässt aber keine Schlüsse auf die thermoelektrischen Materialeigenschaften oder ihre Änderungen zu.

Daher ist üblich und sinnvoll, aus Kalibrierwerten $U_i(T_i)$ nicht direkt die Kennlinie $U^*(T)$ zu approximieren, sondern die Abweichung $\Delta U_i(T_i)$ der Kalibrierwerte $U_i^*(T_i)$ von den Grundwerten nach DIN IEC 60584-1

$$\Delta U_i(T_i) = U_i^*(T_i) - U(T_i)$$

durch ein Polynom niedriger Ordnung zu beschreiben.

Die Abweichungen können gut durch ein Polynom 2. Ordnung beschrieben werden.

$$\Delta U(T) = U_i^*(T_i) - U(T_i) = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2$$

Die Abweichungswerte können mit der Empfindlichkeit $S(T_i)$ auch in die Temperaturabweichungen umgerechnet werden.

$$\delta T(T_i) = \Delta U(T_i) / S(T_i)$$

Die Kennlinien von Standard-Thermoelementen können wiederum mit den Polynomen niedriger Ordnungen approximiert werden, z.B.:

$$U_i^*(T) = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2$$

Die Kalibrierkennlinie ist durch die Addition einer Abweichungsfunktion zur Approximationsfunktion darstellbar:

$$U_i^*(T) = (a_0 + c_0) + (a_1 + c_1) \cdot T + (a_2 + c_2) \cdot T^2$$

Die inverse Kennlinie kann auch durch die Abweichungsfunktion analog ermittelt werden. [[1] S.532]

5.2 Bauform

Der vorhandene Tasttemperaturfühler von Typ K wurde von der Firma „Testo“ hergestellt. Dieser hat eine federnde kreuzbandförmige Kontaktfläche. . Mit deren Hilfe kann der Fühler zu den Unebenheiten auf der Oberfläche anzupassen. Die Andruckbegrenzer sorgen dafür, dass bei übermäßigen Anpressdruck die Thermodrähte nicht nach oben durchbiegen. Solche Bauform ist im Allgemeinen nicht nur für Messungen auf glatten Oberflächen sondern auch auf den gewölbten und geneigten Messobjekten geeignet. Deshalb nimmt der Kontaktwiderstand und somit der thermischer Messfehler auf unebenen Oberflächen stark zu.

Die Kopplung mit dem Messdatenerfassungssystem erfolgt durch eine für Thermoelemente von Typ K passenden Thermoelement-Stecker bzw. Ausgleichsleitung, die in einer Vergleichsstelle eine Verbindung mit den Kupferdrähten hat. Diese schalten zu dem Messgerät Agilent 34970A bzw. dem 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A

5.3 Beschreibung der Messkette

Die Messkette bei der Messung mit dem Tasttemperaturfühler Typ K Kreuzband besteht aus:

- vom Regler gesteuerter Heizfolie bzw. Bezugsplatte;
- von unten geheizten seitlich isolierten Stahl- und Aluminiumprüfkörper;
- drei im Prüfkörper befindlichen Thermoelementen;
- Vergleichsstelle (Eispunkt);
- Tast-Temperaturfühler Typ K;
- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970A mit dem 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A

Der **eigentliche Messfehler des Sensors** ΔT_S kann wie folgt dargestellt werden:

$$\Delta T_S = \delta T_U$$

δT_U ist der Fehler der Spannungsmessung δU bei der entsprechenden Sensitivität $S(T)$ in den Temperaturfehler umgerechnet:

$$\delta T_U = \frac{\delta U(T)}{S(T)}$$

δU berechnet als:

$$\delta U = \delta U_{TKal} + \delta U_{VS}$$

δU_{TKal} Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Thermometers, die mit der Hilfe der Kalibrierung bestimmt oder aus dem Kalibrierschein entnommen werden kann.

δU_{VS} Korrektur aufgrund des Einflusses von Eispunkt-Vergleichsstellentemperatur, falls diese von Null abweicht.

5.4 Kalibrierung des Kreuzband-Thermoelements vom Typ K

Die Kalibrierung erfolgte im Vergleichsverfahren mit der Hilfe von einem Pt100-Normalfühler, der in Kapitel 4.1.4 schon beschrieben wurde. Durch den Umwälzthermostat wurde die homogene Temperatur an den Kalibrierpunkten gewährleistet.

Die Messkette besteht aus folgenden Geräten:

- Umwälzthermostat Julabo FP40
- Platinwiderstandsthermometer Pt100, als Normal
- Messdatenerfassungssystem Agilent 34970 mit 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A

Die Oberfläche von dem Teil des Typ K Kreuzband-Fühlers, die ins Thermostatbad eingetaucht werden muss, ist nicht geschlossen. Aus diesem Grund wurden die beiden Fühler in eine dichte Plastiktüte eingesteckt und erst dann ins Thermostatbad eingetaucht. Die Luft aus der Tüte wurde für den besseren thermischen Kontakt der beiden Fühler zu der Flüssigkeit abgesaugt.

Um die Kennlinie des Fühlers mit der Hilfe der Methode der Approximation mit der Polynom 4. Ordnung schätzen zu können, erfolgt das Kalibrieren an den vier Temperaturpunkten $T_{th,i}$ 25 °C, 45 °C, 65 °C und 85°C.

Die bei der Kalibrierung mit Normalfühler gemessene Temperaturen T_N und die entsprechenden Thermospannungswerte \bar{U} des Prüflings sind in die Tabelle 5.4.1 eingetragen.

Tabelle 5.4.1 Die Ergebnisse der Vergleichskalibrierung des Typ K Kreuzband-Fühlers

$\bar{T}_N, ^\circ C$	$s(\bar{T}_N), ^\circ C$	$\bar{U}, \mu V$	$s(\bar{U}), \mu V$
24.782	0.001	999.608	0.184
44.772	0.002	1818.339	0.189
64.760	0.010	2648.534	0.563
84.746	0.003	3484.705	0.362

Nach vier Kalibrierpunkten wurde die Kennlinie sowohl mit Polynomen verschiedener Ordnungen als auch mit der in Abschnitt 5.1 beschriebenen vereinfachten Methode bestimmt. Die Abweichungen der nach der entsprechenden Approximationsmethode berechneten Prüflingstemperaturen von der Temperatur des Normalfühlers wurden in der Tabelle 5.4.2 dargestellt.

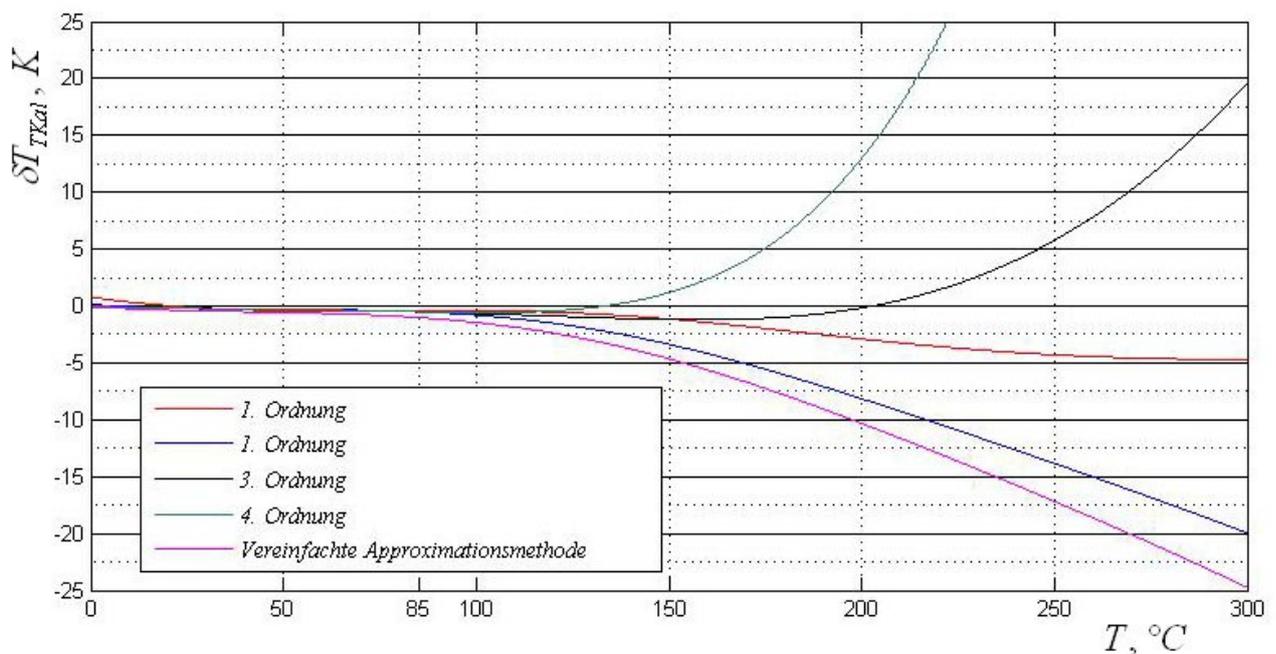


Abbildung 5.4.1 Die Abweichungen von Standard-Kennlinie bei der Approximation für der Typ K Thermoelement-Kennlinie mit unterschiedlichen Methoden

Die Abweichungen von Standardkennlinie ΔT_{TKal} wurden in der Abbildung 5.4.1 dargestellt.

Tabelle 5.4.2 Die Temperaturabweichungen von Normaltemperatur bei der Approximation mit unterschiedlichen Methoden

$T_{th}, ^\circ C$	$T_N, ^\circ C$	Abweichung von der Normaltemperatur $\delta T_N, K$				
		1. Ordnung	2. Ordnung	3. Ordnung	4. Ordnung	Vereinfachte
25	24.782	0.11336	0.007025	7.11E-15	2.13E-14	-0.19543
45	44.772	-0.12558	-0.02081	7.11E-15	0	-0.2775
65	64.760	-0.08664	0.020591	0	0	-0.33625
85	84.746	0.098862	-0.00681	0	0	-0.5105

Man sieht, dass bei solchen Kalibrierpunkten keine der untersuchten Methoden für die Bestimmung der gesamten Kennlinie verwendet werden kann. Um diese Kennlinie zu ermitteln, sollen bei höheren Temperaturen noch einige Kalibrierpunkte hinzugefügt werden. Dafür könnte z. B. ein Thermostat mit anderer Flüssigkeit gefüllt werden und eine andere Schütztüte für das Thermoelement genommen werden. Aus diesen und auch aus Zeitgründen wurde das in der vorhandenen Arbeit nicht durchgeführt. In den weiteren Arbeiten werden die Temperaturwerte nach der Standard-Kennlinie berechnet.

5.5 Einfluss der Vergleichsstellentemperatur

Bei den Temperaturmessungen mit Thermoelementen wird häufig der Eispunkt aufgrund seiner guten praktischen Realisierbarkeit als Vergleichsstelle benutzt.

Man kann eine Unsicherheit von ca. 5 mK bei einer Darstellung des Eispunktes mit Reinstwasser erreichen. Das Reinstwasser wird üblicherweise durch Destillation oder Ionentauscher gewonnen.

Für die Darstellung des Eispunktes bei den Messungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird fein gemahlene Eis, das aus monodestilliertem Wasser hergestellt worden ist, in einen gut isolierten Behälter (Dewargefäß) eingefüllt. Das Eis wird mit reinem Wasser versetzt, bis sich die Wasseroberfläche etwa 1 cm bis 2 cm unterhalb der Eisoberfläche befindet. [vgl [1] S 465]

Von oben wird das Gefäß mit einem Styropordeckel mit Löchern verschlossen. In die Löcher werden die Glasröhrchen mit den Verbindungs- bzw. Anschlussstellen sowohl von den Typ J Thermoelementen, die sich im Prüfkörper befinden, als auch vom Typ K Kreuzband-Thermoelement für den Schutz der Verbindungsstellen gegenüber Wasser eingesteckt. Um den Einfluss der Umgebungstemperatur zu vermeiden, sind die Röhrchen oben thermisch isoliert.

Vor der Messung muss geprüft werden, ob das Eisgemisch noch die Eispunkttemperatur gewährleistet. Das in der vorhandenen Arbeit benutzte Dewargefäß kann die konstante Temperatur des Eiswassergemisches in seinem Volumen ca. 36 Stunden halten. Danach muss ein neues Eiswasser gefertigt werden.

Das Temperieren des neuen Gemisches dauert etwa 30 Minuten nach Herstellung.

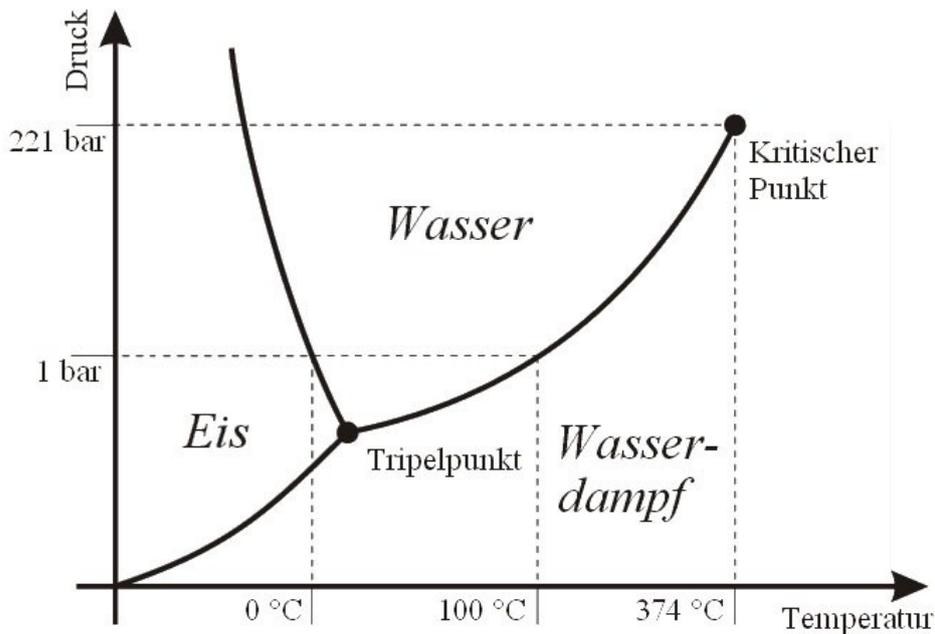


Abbildung 5.5.1 Das Phasendiagramm des Wassers

Eispunkttemperaturkontrolle

In der Abbildung 5.5.1 ist zu sehen, dass der Wassererstarrungspunkt druckabhängig ist. Die Kennlinienkoeffizienten sind auf die Vergleichstellentemperatur von $T_V = T_0 = 0\text{ °C}$ bezogen. Wenn diese abweicht ($T_V \neq T_0$), muss die entsprechende Thermospannungskorrektur $U(T_V, T_0)$ berücksichtigt werden.[vgl. [1] S 768]

$$U(T_M, T_0) = U(T_M, T_V) + U(T_V, T_0)$$

Die Kontrolle der Temperatur in dem Glasrohr im Dewargefäß erfolgte mit einem Glasthermometer, das ins Röhrchen ohne thermischen Kontakt mit der Wand gebracht wurde.

Um den Einfluss des Glasröhrchens zu prüfen, wurden auch zum Vergleich Messungen mit dem Glasthermometer direkt in Eiswasser durchgeführt. In beiden Fällen erfolgte die Messwertablesung, nachdem sich die Anzeige eingestellt hatte.

Die Messergebnisse sind in der Tabelle 5.5.1 dargestellt.

Der benutzte Präzisions-Quecksilberglasthermometer hat folgende Daten:

Messbereich: $-8 \dots 2\text{ °C}$

Auflösung: 0.01 K

Es wurde eine Vergleichstellentemperatur $T_V = 0.07\text{ °C}$ definiert. Die Abweichung von $T_0 = 0\text{ °C}$ kann sowohl durch den atmosphärischen Druck am Ort der Untersuchungen als auch durch Verunreinigungen des Wassers verursacht worden sein.

Als Unsicherheit der Messung wird die halbe in Thermospannung umgerechnete Ableseunsicherheit der Kleinstteilung des Glasthermometers angenommen.

Für Typ K Kreuzband-Thermoelement:

$$\delta U_{VS} = U(0.07^\circ\text{C}) = 2.7616 \mu\text{V}$$

$$u(\delta U_{VS}) = |\delta U_{VS}(0.075^\circ\text{C}) - \delta U_{VS}(0.07^\circ\text{C})| = 0.1973 \mu\text{V}$$

Für Typ J Mantelthermoelemente im Prüfkörper:

$$\delta U_{VS} = U(0.07^\circ\text{C}) = 3.5268 \mu\text{V}$$

$$u(\delta U_{VS}) = 0.2519 \mu\text{V}$$

In der Tabelle 5.5.1 sieht man auch, dass die Einstellzeit im Glasrohr länger ist.

Tabelle 5.5.1 Die Messergebnisse der Temperaturmessung am Eispunkt in Glasröhrchen mit der Hilfe des Quecksilberglasthermometers

	Vergleichsstellentemperatur, T_V , °C	
	Im Rohr	Im Eiswasser
1	0.07	0.07
2	0.07	0.07
3	0.07	0.07
Einstellzeit	15 min	5 min

5.6 Messunsicherheitsbudget für die Oberflächentemperaturmessung mit Kreuzband-Thermoelement von Typ K

Nach den Wiederholungsmessungen mit dem TypK-Fühler an Stahl- und Aluminiumprüfkörper wurden die 6 Messunsicherheitsbudgets abhängig vom Material des Prüfkörpers und der Temperatur des Messobjekts aufgestellt. Die Methoden für Bestimmung der Unsicherheiten sind in allen 6 Fällen gleich.

Die Messungen wurden ohne zusätzliche Anpresskraft bei der senkrechten Einspannung des Fühlers mit der Hilfe der Anpressvorrichtung durchgeführt.

Als Vergleichsstelle wurde Eispunkt im Dewargefäß realisiert.

Das Messdatenerfassungssystem wurde dabei folgendermaßen eingestellt:

- Messbereich: 100 μV
- Integrationszeit: 2 Netzspannungszyklen

Das Modell der Temperaturmessung kann wie folgt dargestellt werden:

$$T = T_M + \Delta T_{th,1} + \Delta T_{th,2+3} + \delta T_{VS} + \delta T_{MKal} + \delta T_{MAufl}$$

T - Temperatur der Messobjektoberfläche;

T_M - nach der Anzeige des Multimeters in Temperatur berechneter Thermospannung des Sensors;

$\Delta T_{th,1}$ - erster thermischer Teilfehler;

$\Delta T_{th,2+3}$ - die Summe des zweiten und dritten thermischen Teilfehler;

δT_{VS} - Korrektur aufgrund des Einflusses von Vergleichsstellentemperatur;

δT_{MKal} - Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters;

δT_{MAufl} - Korrektur aufgrund der begrenzten Auflösung des Multimeters;

Als Beispiel wird hier ein Messunsicherheitsbudget für Oberflächentemperaturmessung des Aluminiumprüfkörpers mit der Kerntemperatur $T_K = 150\text{ °C}$ betrachtet. Die mittlere Umgebungstemperatur bei der Messung beträgt $T_U = 25,517\text{ K}$. Bei der Annahme der Normalverteilung beträgt die Unsicherheit $u(T_M) = 0,032\text{ K}$.

Die gemessene Temperatur T_M ist ein Mittelwert aus 4 Wiederholungsmessungen je 300 Sekunden bzw. Mittelwerte aus ca. 300 einzelnen Messungen bei gleicher Messobjekttemperatur. Er beträgt $T_M = 143,3173\text{ °C}$. Es wird eine Normalverteilung angenommen. Damit ergibt sich eine Unsicherheit $u(T_M) = 0,4046\text{ K}$.

Dabei wurde auch der erste thermische Teilfehler $\Delta T_{Th,1}$ als eine Differenz zwischen gestörter und ungestörter Oberflächentemperatur nach jeder Wiederholungsmessung berechnet (Abschnitt 3.2). Ein Mittelwert beträgt $\Delta T_{Th,1} = 0,3989\text{ K}$. Unter Annahme der Normalverteilung wurde die Unsicherheit $u(\Delta T_{Th,1}) = 0,0528\text{ K}$ bestimmt.

Die Summe des zweiten und dritten thermischen Teilfehlers $\Delta T_{Th,2+3}$ wurde als die Differenz zwischen der mittleren gestörten Oberflächentemperatur und der mittleren Sensortemperatur berechnet. Dieser wurde in Abschnitt 3.3 sowie 3.4 untersucht. Analog zu dem ersten thermischen Teilfehler wurde der Mittelwert $\Delta T_{Th,2+3} = 3,5998\text{ K}$ aus 4 Wiederholungsmessungen gebildet. Hier wird auch eine Normalverteilung angenommen. Somit beträgt die Unsicherheit $u(\Delta T_{Th,2+3}) = 0,4385\text{ K}$.

Die Ergebnisse der Vergleichsstellentemperaturkontrolle wurden im Abschnitt 5.5 dargestellt. Es wurde festgestellt, dass die Vergleichsstellentemperatur T_{VS} nicht Null beträgt. Deshalb ist es die rechnerische Korrektur δU_{VS} zu berücksichtigen. Sein Schätzwert beträgt $\delta U_{VS} = 2,7616\text{ }\mu\text{V}$. Es wurde eine Rechteckverteilung angenommen. Die Unsicherheit berechnet sich aus Abschnitt 5.4 angegebenen maximalen Abweichung vom tatsächlichen Wert $0,1973\text{ }\mu\text{V}$. Diese wird als $u(\delta T_{VS}) = 0,1139\text{ }\mu\text{V}$ ermittelt.

Die Unsicherheit, die als Korrektur aufgrund der Kalibrierung des Multimeters δT_{MKal} zu berücksichtigen ist, ist im dazugehörigen Datenblatt angegeben. Diese Unsicherheit wurde im Abschnitt 6.2 als Spannungswert bestimmt. Diese ist in einen Temperaturwert durch die Multiplikation mit dem Empfindlichkeitskoeffizienten $S(U)$ umzurechnen. Es wurde eine Rechteckverteilung angenommen. Der Schätzwert beträgt $\delta U_{MKal} = 0\text{ }\mu\text{V}$. Ihm entspricht eine Unsicherheit $u(\delta U_{MKal}) = 3,0201\text{ }\mu\text{V}$ und ein Empfindlichkeitskoeffizient $S(U) = 0,248\text{ K}/\mu\text{V}$.

Die Messung erfolgte mit der Auflösung $5\frac{1}{2}$ Stellen. Somit wird die kleinste anzeigbare Stelle $1\text{ }\mu\text{V}$ angezeigt. Damit weicht der gemessene Wert maximal um $0,5\text{ }\mu\text{V}$ vom tatsächlichen Wert ab. Der

Schätzwert der Korrektur aufgrund begrenzter Auflösung beträgt somit $\delta U_{MAufl} = 0 \mu V$. Bei angenommener Rechteckverteilung ist die Unsicherheit gleich $u(\delta U_{MAufl}) = 0,1669 \mu V$ und wird danach mit oben genannten Sensitivitätskoeffizient $S(U)$ in die Temperatur umgerechnet.

Tabelle 5.6.1 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einem Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	143,3173	0,4046	Normal	1	0,4046
$\Delta T_{Th,1}$	0,3989	0,0528	Normal	1	0,0528
$\Delta T_{Th,2+3}$	3,5998	0,4385	Normal	1	0,4385
δU_{VS}	2,7616	0,1139	Normal	0,0248	0,0028
δU_{MKal}	0	3,0201	Rechteck	0,0248	0,0749
δU_{MAufl}	0	0,1669	Rechteck	0,0248	0,0041
T	147,3845				0,6037

Der dominierende Beitrag zur Standardunsicherheit der Ergebnisgröße ist die Summe der zweiten und dritten thermischen Messfehler, sowie die Standardunsicherheit der gemessenen Temperatur. Aus den Gründen, dass die alles dominierenden Größen normal verteilt sind, wird auch für die Ergebnisgröße eine Normalverteilung angenommen. Für die Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 95\%$ beträgt der Erweiterungsfaktor somit $k = 2$.

Somit beträgt ein berechneter Temperaturwert für die Oberflächentemperaturmessung mit Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K an Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T = (147,3845 \pm 1,2073) \text{ }^\circ\text{C}$$

Angegeben ist die erweiterte Unsicherheit die sich aus der Standardunsicherheit durch Multiplikation mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ ergibt. Sie entspricht einer angenommenen Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 0,95$.

Die anderen fünf Messunsicherheitsbudgets sind im Anhang angegeben.

6 Die Fehler der Geräte

Für die Ermittlung des temperaturabhängigen thermischen Widerstands und der Thermospannung wurde in dieser Arbeit das Messdatenerfassungssystem Agilent 34970 mit 20-Kanal Multiplexereinschub HP 34901A gewählt. Mit dem vorhandenen Multimeter kann man folgende Größen präzise messen:

- Gleichspannung
- Gleichstrom
- Widerstand
- Thermospannung
- Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern
- Temperaturmessung für Thermistoren
- Effektivwechselfspannung
- Effektivwechselstrom
- Frequenz und Periode

Die Methoden für die direkte Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer, Thermoelementen und Thermistoren können nur dann benutzt werden, wenn man mit den Standardkennwerten der Sensortypen arbeitet. Da dieses in der vorhandener Arbeit nicht der Fall ist, werden die Messwerte der Hilfe der Gleichspannungs- und Widerstandsmessung erfasst.

6.1 Widerstandsmessung

Für die Untersuchung der vorhandenen NTC- und Pt100-Fühler wird das Multimeter in den Widerstandsmessungsmodus eingestellt. Es besteht die Möglichkeit, die Messung in 2- oder 4-Leiter-Schaltung durchzuführen. Wie auch schon früher erwähnt wurde, können die parasitären Thermospannungen durch das Einschalten einer Funktion „Offset Compensation“ eliminiert werden.

Der Widerstandsmessfehler des Gerätes ΔR_M setzt sich zusammen aus dem Messfehler aufgrund der Kalibrierung des Multimeters δR_{MKal} und dem Messfehler aufgrund begrenzter Auflösung des Multimeters δR_{MAufl} .

$$\Delta R_M = \delta R_{MKal} + \delta R_{MAufl}$$

Für die Messbereiche $1\text{ k}\Omega$ und $10\text{ k}\Omega$ wird im Datenblatt δR_{MKal} für mehr als 1 Jahr nach der Kalibrierung bei der Umgebungstemperatur von $T_U = 23 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ folgend normiert:

$$\delta R_{MKal} = \pm(0.0001 \cdot R_{MB} + 0.00001 \cdot R)$$

R_{MB} bezeichnet in der Formel den Widerstandswert für den benutzten Messbereich, R ist ein gemessener Wert [vgl. [3]].

Die Auflösung des Multimeters wird als Anzahl der anzeigbaren Stellen dargestellt. Dieser Wert kann $4\frac{1}{2}$, $5\frac{1}{2}$ und $6\frac{1}{2}$ betragen. Die maximale Abweichung berechnet man als die Hälfte des entsprechenden Widerstandswerts für die kleinste anzeigbare Stelle ΔR . Abhängig davon kann die Korrektur aufgrund begrenzter Auflösung δR_{MAufl} unter Annahme der Rechteckverteilung berechnet werden.

$$\delta R_{MAufl} = \frac{\Delta R}{2\sqrt{3}}$$

Diese sind in der Tabelle 6.1.1 dargestellt. [4]

Die Auswahl der kleineren Auflösung des Multimeters erlaubt schnellere Messungen infolge der Reduzierung der Integrationszeit. Den verfügbaren Anzeigaufösungen entsprechen die Mindestwerte für die Integrationszeit, als Anzahl der Netzspannungszyklen dargestellt. Mit der größeren Integrationszeit wird die bessere Netzspannungsunterdrückung erreicht.

Der Messung des Widerstandes vom Pt100-Fühler erfolgt bei den untersuchten Temperaturen meist im Messbereich von $1\text{ k}\Omega$. Dabei wird über den Sensor ein Messstrom von 1 mA geschickt.

Bei der Messung mit dem NTC-Fühler werden ausgehend von den zu messenden Temperaturen T zwei Messbereiche benutzt:

1. $T > 66\text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $R < 1000\text{ }\Omega$ entspricht dem Messbereich von $1\text{ k}\Omega$.
2. $T < 66\text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $R > 1000\text{ }\Omega$ entspricht dem Messbereich von $10\text{ k}\Omega$. Im Messkreis fließt dabei der Messstrom von $100\text{ }\mu\text{A}$

Tabelle 6.1.1 Die der gewählten Auflösung entsprechenden maximale Widerstandsabweichungen für den Messbereichen von 1 und $10\text{ k}\Omega$ [vgl [4], [3]]

	Messbereich:	$1\text{ k}\Omega$		$10\text{ k}\Omega$	
Auflösung	Minimale Integrationszeit	$\Delta R, \Omega$	$\delta R_{MAufl}, \Omega$	$\Delta R, \Omega$	$\delta R_{MAufl}, \Omega$
$4\frac{1}{2}$	0.02 PLC	0.1	0.0289	1	0.2886
$5\frac{1}{2}$	1 PLC	0.01	0.0029	0.1	0.0289
$6\frac{1}{2}$	10 PLC	0.001	0.0003	0.01	0.0029

Der Widerstandsmessfehler des Gerätes ΔR_M kann nachträglich bei der entsprechenden Sensitivität $S(T)$ in den Temperaturfehler umgerechnet werden:

$$\Delta T_M = \frac{\Delta R_M(T)}{S(T)}$$

6.2 Spannungsmessung

Die Messung der Thermospannung des Typ J Mantelthermoelementes und Typ K Kreuzbandthermoelementes wird im Modus der Spannungsmessung untersucht.

Der Messfehler des Multimeters ΔU_M wird dabei als die Summe des Messfehlers aufgrund der Kalibrierung des Multimeters δU_{MKal} und dem Messfehler aufgrund begrenzter Auflösung des Multimeters δU_{MAufl} berechnet.

$$\Delta U_M = \delta U_{MKal} + \delta U_{MAufl}$$

Für die beiden Thermoelementtypen werden die Werte bei den in der vorhandener Arbeit untersuchten Temperaturen nicht den Messbereich 100 mV überschreiten.

Der Ausdruck für δU_{MKal} wurde für oben genannten Messbereich bei der Umgebungstemperatur von $T_U = 23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ aus dem Datenblatt des Multimeters entnommen:

$$\delta U_{MKal} = \pm(0.00005 \cdot U_{MB} + 0.00004 \cdot U)$$

U_{MB} ist der Wert der Breite vom Messbereich, ggf. $U_{MB} = 100 \mu\text{V}$, U bezeichnet einen gemessenen Wert.

Bei der Spannungsmessung sind dieselben Auflösungen, wie für Widerstandsmessung, auswählbar. Der Fehler aufgrund begrenzter Auflösung δU_{MAufl} berechnet man unter Annahme von der Rechtecksverteilung als:

$$\delta U_{MAufl} = \frac{\Delta U}{2\sqrt{3}}$$

ΔU ist die der kleinsten anzeigbaren Stelle entsprechende Spannung.

Die auswählbare Auflösungen und die entsprechenden Fehler δU_{MAufl} sind in der Tabelle angegeben.

Tabelle 6.2.1 Die der gewählten Auflösung entsprechenden maximale Spannungsabweichungen für den Messbereich 100 μV .

Auflösung	Minimale Integrationszeit	$\Delta U, \mu\text{V}$	$\delta U_{MAufl}, \mu\text{V}$
4 $\frac{1}{2}$	0.02 PLC	10	2.887
5 $\frac{1}{2}$	1 PLC	1	0.289
6 $\frac{1}{2}$	10 PLC	0.1	0.029

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Einflussfaktoren in gesamter Messkette der Oberflächentemperaturmessung mit Tasttemperaturfühlern untersucht. Für drei Fühler verschiedener Bauformen und Sensortypen (Pt100, NTC und Typ K) und zwei Prüfkörper (Stahl und Aluminium) wurden entsprechende Messunsicherheitsbudgets erstellt.

Die Einflussfaktoren teilen sich abhängig von dem Ort und der Ursache des Entstehens nach:

1. Thermische Messfehler;
2. Messfehler des Sensors selbst;
3. Messfehler der verwendeten Messgeräte.

Besondere Aufmerksamkeit wurde den Untersuchungen von thermischen Messfehlern gewidmet. Die Benutzung der Kalibriereinrichtung verhilft die wesentlichsten Faktoren, wie Wärmeableitung über den Fühler, Anpresskraft, Anpresswinkel, Wärmeleitfähigkeit des Messobjektes zu schätzen.

Mit Hilfe der Prüfkörper aus unterschiedlichen Materialien wurde eine Verkleinerung des thermischen Messfehlers sowie seiner Teilfehler mit steigender Wärmeleitfähigkeit auf der Praxis bewiesen. Es wurde auch bemerkt, dass die zusätzliche Anpresskraft nur bei der Messung mit den Fühlern mit der unfedernden glatten Kontaktfläche nützlich sein kann.

Die Reproduzierbarkeit der Handmessungen im Vergleich zu den Messungen mit Anpressvorrichtung ist für die Kalibrierung zu schlecht, obwohl bei den Handmessungen durch eine gezielte Verschiebung und Kippung der passende Anpresswinkel bzw. Anpresskraft erreicht werden kann. In diesem Fall wird durch die Verminderung des thermischen Widerstands mit einem kleineren Fehler gemessen. Aber Messungen mit Hilfe der Prüfeinrichtung bzw. Anpressvorrichtung ist es möglich den thermischen Fehler durch reproduzierbare herauszufinden und rechnerisch zu korrigieren. In den Messunsicherheitsbudgets für den Fühler ist allerdings die Unsicherheit der Wiederholungsmessungen dominierend. Das ist durch eine Reproduzierbarkeit des Aufsetzwinkels nach der Aus- und Einspannen des Fühlers bedingt.

Der Großteil dieser Masterarbeit bestand darin jeder Einflussfaktor zu untersuchen. Dazu wurden jeweils zwei Messungen verglichen, einmal mit und einmal ohne jeweiligen Einflussfaktor (bei unveränderten anderen Einflussfaktoren).

Durch weitere Untersuchungen zur Reproduzierung der gleichen Position bzw. Winkels des Fühlers sowie Kalibrierung des Prüfkörpers mit eingebauten Mantelthermoelementen könnten neue Möglichkeiten zur genaueren Bestimmung der Einflussfaktoren auf den thermischen Messfehler für beliebigen Oberflächen-Tasttemperaturfühlern gefunden werden.

8 Literaturverzeichnis

1. Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004
2. Augustin, S.; Mammen, H.; Bernhard, F.; Tegeler, E.: Kalibriereinrichtung für Oberflächen Tast-Temperaturfühler, Teil 1: Verfahrensbeschreibung. TU Ilmenau, Fak. MB, Institut PMS, 1998
3. Agilent Technologies: Benutzerhandbuch Messdatenerfassungs-/Schaltssystem Agilent 34970A, 2. Ausgabe. 2003
4. Mittermeier, Thomas: Erstellung von flexiblen Messunsicherheitsbudgets zur Temperaturmessung. Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fak. MB, Institut PMS, 2009
5. DKD-R 5-3: Kalibrierung von Thermoelementen. Braunschweig: PTB und FA Temperatur und Feuchte, 2002
6. DKD-R 5-1: Kalibrierung von Widerstandsthermometern. Braunschweig: PTB und FA Temperatur und Feuchte, 2003
7. Tegeler E.: Berührungsthermometer und ihre Messunsicherheiten in industriellen Anwendungen. PTB Berlin, 2003

9 Anhang

Tabelle A. 1 Messwerte aus den Wiederholungsmessungen mit Tasttemperaturfühlern

Pt100			TypK				NTC	
Ohne zusätzliche Anpresskraft								
<i>Stahl</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	75.8174	0.371092		80.11278	0.253926		72.62403	0.78852
Tu	25.04092	0.046693		25.04664	0.03923		25.10083	0.061454
Tos	82.33827	0.024411		82.07944	0.058779		81.97107	0.042922
To	82.82772	0.026893		82.84268	0.035622		82.85674	0.026393
B	0.121314	0.00624		0.047234	0.004566		0.177171	0.013443
Ts-Tos	-6.52087	0.380048		-1.96666	0.260422		-9.34704	0.828865
Tos-To	-0.48945	0.048071		-0.76324	0.050168		-0.88567	0.06446

Pt100			TypK				NTC	
Mit zusätzlicher Anpresskraft								
<i>Stahl</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	77.87212	0.635404		79.47347	0.845228		73.75469	0.438894
Tu	24.93688	0.587559		24.89755	0.482177		24.9958	0.512993
Tos	82.33491	0.063967		82.11771	0.111788		81.93221	0.097385
To	82.77932	0.051244		82.81386	0.048313		82.80906	0.082845
B	0.084818	0.010945		0.057775	0.014596		0.156686	0.008438
Ts-Tos	-4.32875	0.636745		-2.87993	0.740853		-8.17752	0.370639
Tos-To	-0.43267	0.090287		-0.6662	0.074559		-0.87686	0.110082

Pt100			TypK				NTC	
Ohne zusätzliche Anpresskraft								
<i>Stahl</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	137.342	0.235697		139.6397	0.473569		121.2415	0.719665
Tu	25.02984	0.16819		25.11102	0.16133		26.07998	0.09709
Tos	144.1251	0.108594		143.8786	0.084139		142.8171	0.243571
To	145.2414	0.048483		145.291	0.048502		144.2058	0.018653
B	0.065713	0.001701		0.055298	0.003887		0.194402	0.005918
Ts-Tos	-6.7831	0.268753		-4.23889	0.54481		-21.5756	0.931433
Tos-To	-1.11628	0.103172		-1.41244	0.104303		-1.38867	0.259906

Pt100			TypK				NTC	
Mit zusätzlicher Anpresskraft								
<i>Stahl</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	137.7762	1.638752		138.3367	1.148076		124.6092	0.846663
Tu	25.40643	0.431834		25.54924	0.397341		25.57006	0.425592
Tos	144.2474	0.099553		143.8592	0.175329		143.2031	0.084931
To	145.3015	0.124048		145.3303	0.066509		145.0893	0.445724
B	0.062773	0.013322		0.035991	0.006585		0.171334	0.008899
Ts-Tos	-6.47123	1.558736		-5.52243	1.138344		-18.5939	0.871914
Tos-To	-1.05413	0.126357		-1.41244	0.104303		-1.88629	0.474904

Tabelle A. 1 Die Messwerte aus Wiederholungsmessungen (Fortsetzung)

Pt100			TypK				NTC	
Ohne zusätzliche Anpresskraft								
<i>Alu</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	80.10747	0.231491		81.73671	0.128397		75.4251	1.165427
Tu	24.72803	0.042349		24.72518	0.066135		24.68373	0.069396
Tos	83.29088	0.02809		83.11792	0.013236		83.20321	0.036012
To	83.34895	0.008274		83.36023	0.006207		83.3655	0.025612
B	0.055298	0.003887		0.027689	0.0023		0.135312	0.020032
Ts-Tos	-3.18341	0.239592		-1.3812	0.123315		-7.77811	1.200137
Tos-To	-0.05806	0.031906		-0.24231	0.017648		-0.16229	0.04083

Pt100			TypK				NTC	
Mit zusätzlicher Anpresskraft								
<i>Alu</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	85°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	81.18813	0.392233		81.88154	0.273241		77.89525	0.277636
Tu	24.54186	0.119285		24.5397	0.086087		24.57586	0.069135
Tos	83.25321	0.038005		83.07338	0.031762		83.1576	0.025265
To	83.30247	0.023948		83.32257	0.028828		83.33618	0.027994
B	0.035991	0.006585		0.024514	0.004447		0.092592	0.005052
Ts-Tos	-2.06508	0.420014		-1.19185	0.262805		-5.26235	0.284814
Tos-To	-0.04926	0.058398		-0.24919	0.041972		-0.17858	0.025707

Pt100			TypK				NTC	
Ohne zusätzliche Anpresskraft								
<i>Alu</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	140.6269	0.511096		143.3173	0.404617		128.3572	1.497561
Tu	25.50882	0.008228		25.51672	0.031571		25.52018	0.071929
Tos	147.1375	0.019654		146.9171	0.053667		146.9713	0.048687
To	147.3113	0.025071		147.316	0.01689		147.3146	0.022551
B	0.054878	0.004262		0.032831	0.003387		0.155644	0.012371
Ts-Tos	-6.51053	0.502102		-3.59982	0.43852		-18.6141	1.511286
Tos-To	-0.17383	0.036744		-0.39893	0.052767		-0.34334	0.037366

Pt100			TypK				NTC	
Mit zusätzlicher Anpresskraft								
<i>Alu</i>	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$	150°C	Mittelwert \bar{x}	Unsicherheit $u(\bar{x})$
Ts	141.3797	0.819219		143.8548	0.222549		133.1987	1.011645
Tu	25.30294	0.166967		25.26524	0.174106		25.30302	0.114635
Tos	147.1142	0.036486		146.7584	0.073487		146.8596	0.048129
To	147.2427	0.065594		147.2441	0.086051		147.2778	0.028764
B	0.048078	0.00678		0.027785	0.001511		0.115431	0.008548
Ts-Tos	-5.73445	0.809413		-2.90354	0.178502		-13.6608	1.042793
Tos-To	-0.12853	0.038531		-0.48572	0.020362		-0.41823	0.029197

Tabelle A. 1 Die Messwerte aus Wiederholungsmessungen (Fortsetzung)

Pt100			TypK		
Ohne zusätzliche Anpresskraft					
	Mittelwert	Unsicherheit		Mittelwert	Unsicherheit
<i>ST</i>	\bar{x}	$u(\bar{x})$	300°C	\bar{x}	$u(\bar{x})$
Ts	274.0415	1.512081		273.9236	0.352412
Tu	27.57122	0.335011		27.55468	0.383912
Tos	286.1177	0.135777		285.5029	0.588565
To	288.3966	0.12593		288.4963	0.09209
B	0.055039	0.005656		0.054878	0.004262
Ts-Tos	-12.0763	1.396008		-11.5794	0.285198
Tos-To	-2.27881	0.192313		-2.99333	0.537358

Pt100			TypK		
Mit zusätzlicher Anpresskraft					
	Mittelwert	Unsicherheit		Mittelwert	Unsicherheit
<i>ST</i>	\bar{x}	$u(\bar{x})$	300°C	\bar{x}	$u(\bar{x})$
Ts	275.8657	1.337613		273.9322	0.456259
Tu	27.1689	0.989589		27.3989	1.106909
Tos	286.3823	0.163435		285.1349	0.235626
To	288.409	0.205648		288.4291	0.185061
B	0.048016	0.00572		0.047025	0.003979
Ts-Tos	-10.5165	1.338383		-11.2027	0.548415
Tos-To	-2.0267	0.240319		-3.29416	0.239826

Pt100			TypK		
Ohne zusätzliche Anpresskraft					
	Mittelwert	Unsicherheit		Mittelwert	Unsicherheit
<i>Alu</i>	\bar{x}	$u(\bar{x})$	300°C	\bar{x}	$u(\bar{x})$
Ts	282.4602	1.645129		286.4162	0.363566
Tu	27.7302	0.294758		27.61468	0.396226
Tos	294.9553	0.162765		294.4082	0.165604
To	295.3134	0.124773		295.275	0.145612
B	0.048047	0.005708		0.033098	0.001806
Ts-Tos	-12.4952	1.488605		-7.99198	0.480524
Tos-To	-0.35807	0.063603		-0.86679	0.107643

Pt100			TypK		
Mit zusätzlicher Anpresskraft					
	Mittelwert	Unsicherheit		Mittelwert	Unsicherheit
<i>Alu</i>	\bar{x}	$u(\bar{x})$	300°C	\bar{x}	$u(\bar{x})$
Ts	285.3024	2.123014		285.4561	0.800558
Tu	28.37154	0.126581		28.1902	0.109052
Tos	295.1268	0.026998		294.5295	0.066951
To	295.5039	0.047937		295.4791	0.044527
B	0.038189	0.008025		0.0375	0.002893
Ts-Tos	-9.82436	2.122629		-9.07338	0.783964
Tos-To	-0.37705	0.04064		-0.94959	0.061114

Abbildung A.2 Vergleich der Standardunsicherheiten von Handmessungen mit Messungen mit der Hilfe von Anpressvorrichtung für Stahlprüfkörper

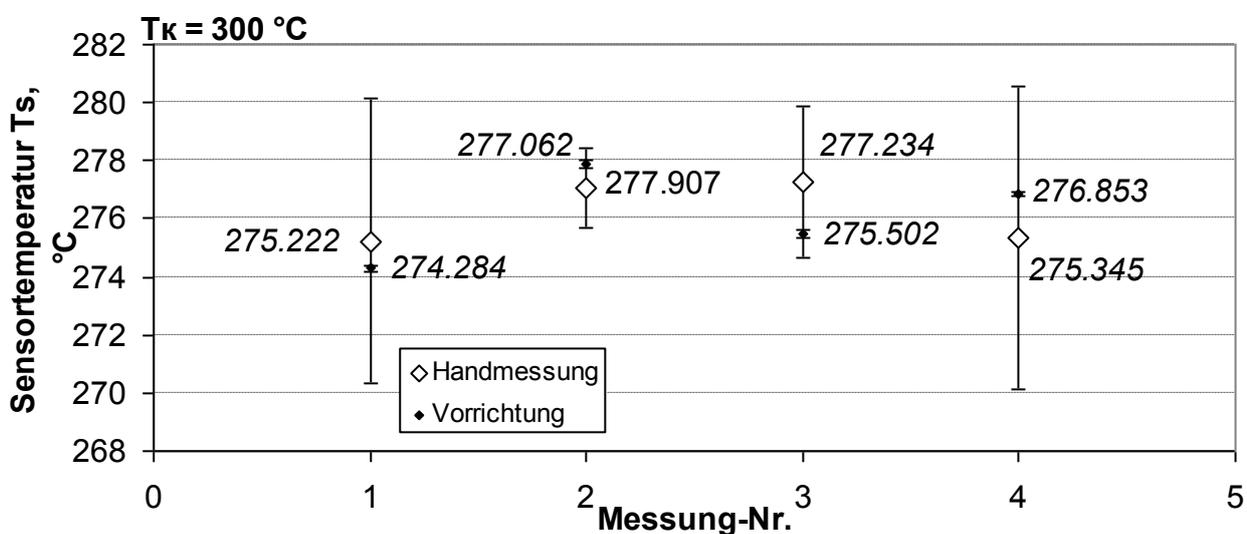
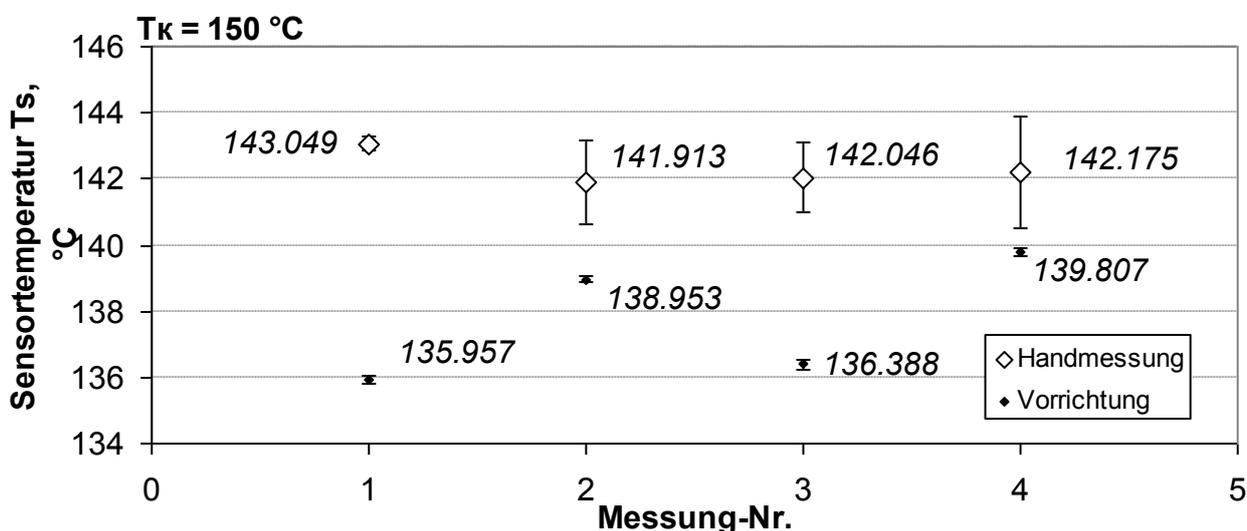
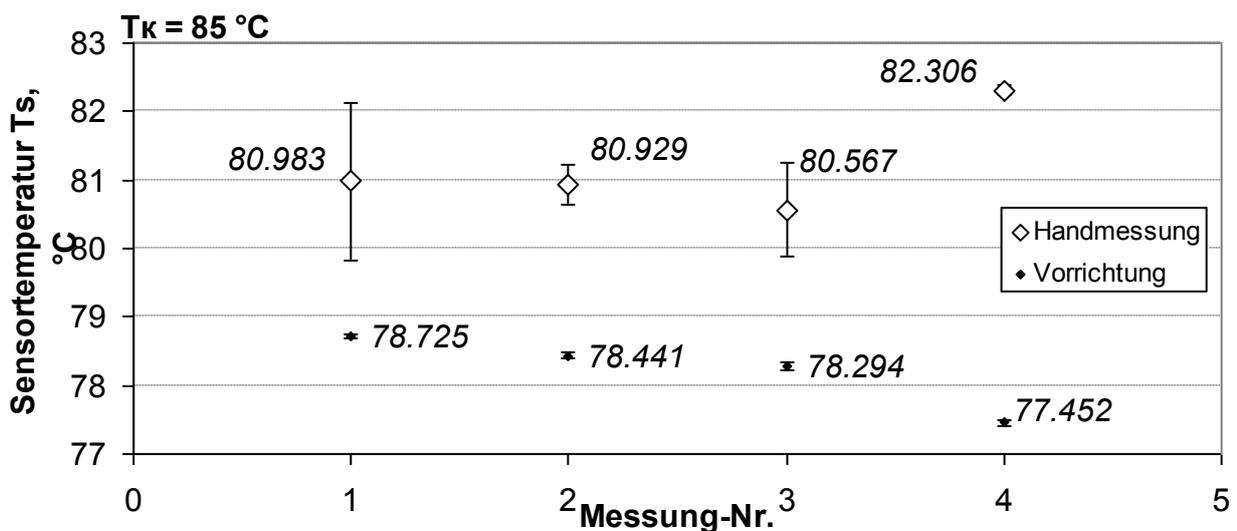


Abbildung A.3 Vergleich der Standardunsicherheiten von Handmessungen mit Messungen mit der Hilfe von Anpressvorrichtung für Aluminiumprüfkörper

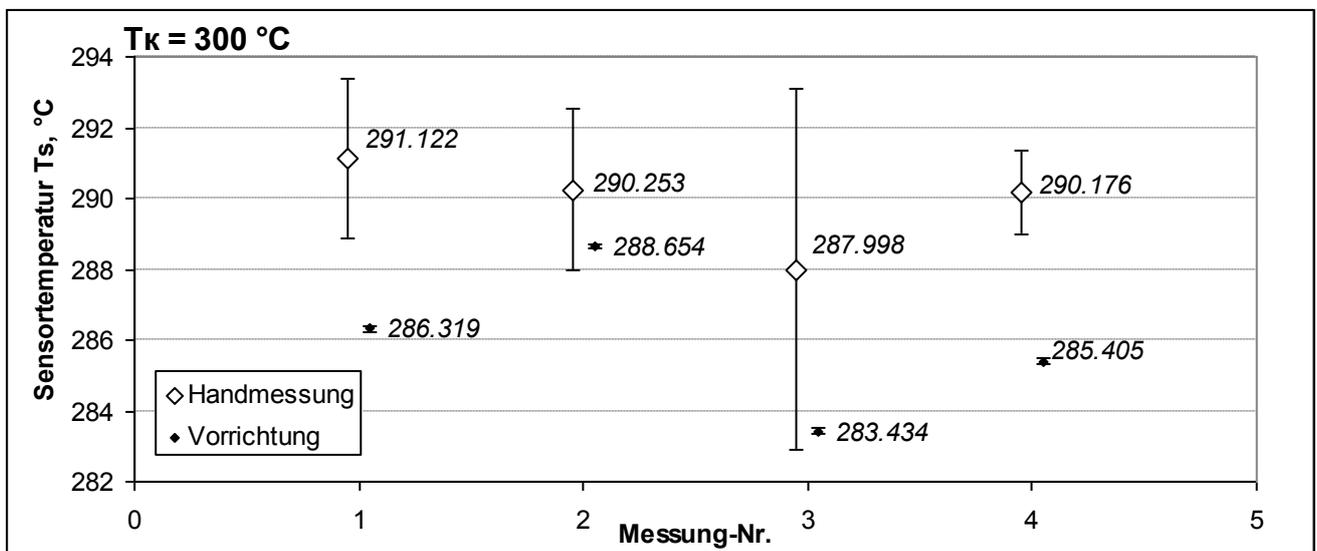
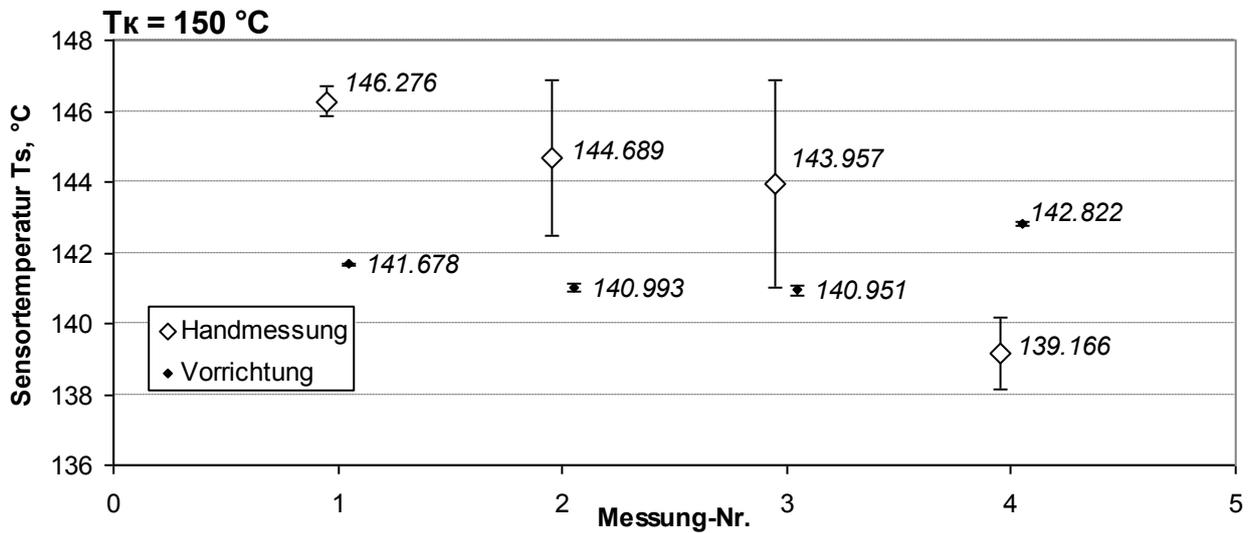
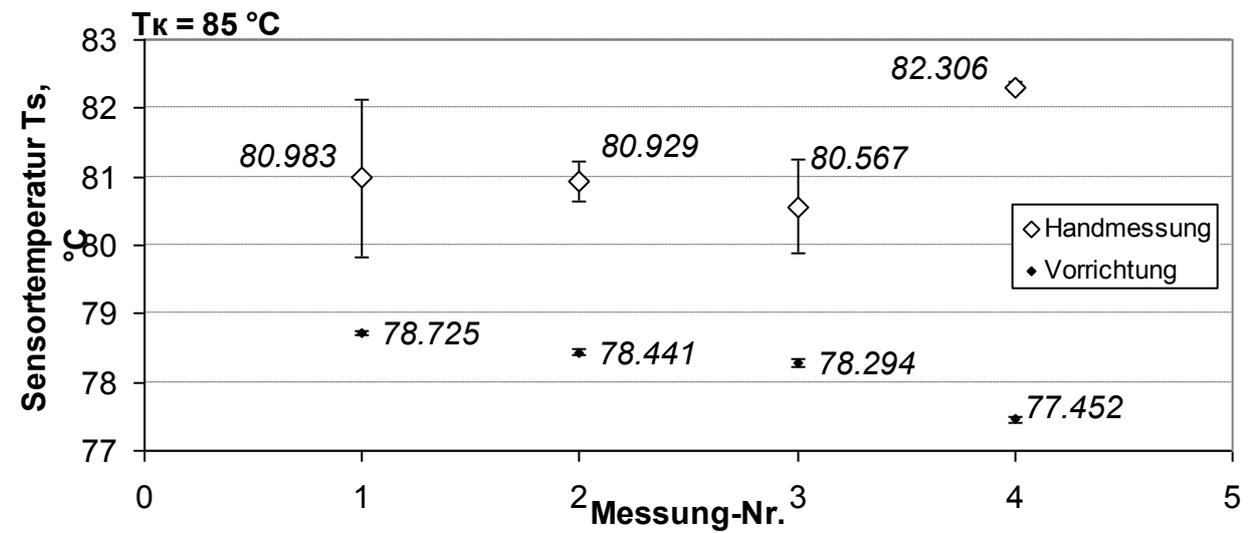


Tabelle A. 4 Messunsicherheitsbudget für den Stahlprüfkörper bei der Kerntemperatur von $T_K=85\text{ °C}$

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{3,M}$	84.126	0.005	Normal	1	0.005
δT_{Kal}	0.000	0.300	Normal	1	0.300
δU_{MKal}	0.000	2.733	Normal	0.019	0.051
δT_{Th}	0.000	0.049	Rechteck	1	0.049
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_3	84.191				0.308

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{2,M}$	83.387	0.006	Normal	1	0.006
δT_{Kal}	0.000	0.300	Normal	1	0.300
δU_{MKal}	0.000	2.732	Normal	0.019	0.051
δT_{Th}	0.000	0.048	Rechteck	1	0.048
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_2	83.453				0.308

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{1,M}$	82.876	0.009	Normal	1	0.009
δT_{Kal}	0.000	0.300	Normal	1	0.300
δU_{MKal}	0.000	2.731	Normal	0.019	0.051
δT_{Th}	0.000	0.048	Rechteck	1	0.048
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	82.941				0.308

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{0,M}$	82.815	0.012	Normal	1	0.012
δT_1	0.081	0.494	Normal	1	0.494
δT_2	-0.022	0.136	Normal	1	0.136
δT_3	0.006	0.036	Normal	1	0.036
δT_t	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_U	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_{NL}	0.000	0.0011	Rechteck	1	0.001
T_0	82.880				0.515

Tabelle A. 5 Messunsicherheitsbudget für den Stahlprüfkörper bei der Kerntemperatur von $T_K = 150\text{ °C}$

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{3,M}$	148.299	0.010	Normal	1	0.010
δT_{Kal}	0.000	0.445	Normal	1	0.445
δU_{MKal}	0.000	2.803	Normal	0.019	0.052
δT_{Th}	0.000	0.086	Rechteck	1	0.086
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_3	148.364				0.456

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{2,M}$	147.359	0.006	Normal	1	0.006
δT_{Kal}	0.000	0.442	Normal	1	0.442
δU_{MKal}	0.000	2.802	Normal	0.019	0.052
δT_{Th}	0.000	0.071	Rechteck	1	0.071
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_2	147.424				0.451

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{1,M}$	147.155	0.007	Normal	1	0.007
δT_{Kal}	0.000	0.441	Normal	1	0.441
δU_{MKal}	0.000	2.802	Normal	0.019	0.052
δT_{Th}	0.000	0.071	Rechteck	1	0.071
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	147.220				0.450

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{0,M}$	147.1129	0.0091	Normal	1	0.009
δT_1	0.0810	0.6992	Normal	1	0.699
δT_2	-0.0223	0.1924	Normal	1	0.192
δT_3	0.0060	0.0516	Normal	1	0.052
δT_t	0.0000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_U	0.0000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_{NL}	0.0000	0.0004	Rechteck	1	0.0004
T_0	147.178				0.728

Tabelle A. 6 Messunsicherheitsbudget für den Stahlprüfkörper bei der Kerntemperatur von $T_K = 300 \text{ °C}$

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{3,M}$	296.117	0.007	Normal	1	0.007
δT_{Kal}	0.000	0.888	Normal	1	0.888
δU_{MKal}	0.000	2.967	Normal	0.019	0.055
δT_{Th}	0.000	0.155	Rechteck	1	0.155
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_3	296.183				0.903

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{2,M}$	291.987	0.006	Normal	1	0.006
δT_{Kal}	0.000	0.876	Normal	1	0.876
δU_{MKal}	0.000	2.962	Normal	0.019	0.055
δT_{Th}	0.000	0.153	Rechteck	1	0.153
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	292.052				0.891

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{1,M}$	288.883	0.023	Normal	1	0.023
δT_{Kal}	0.000	0.867	Normal	1	0.867
δU_{MKal}	0.000	2.959	Normal	0.019	0.055
δT_{Th}	0.000	0.151	Rechteck	1	0.151
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	288.949				0.882

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{O,M}$	288.485	0.028	Normal	1	0.028
δT_1	0.081	1.330	Normal	1	1.330
δT_1	-0.022	0.369	Normal	1	0.369
δT_1	0.006	0.100	Normal	1	0.100
δT_t	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_U	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_{NL}	0.000	0.0050	Rechteck	1	0.005
T_O	288.550				1.385

Tabelle A. 7 Messunsicherheitsbudget für den Aluminiumprüfkörper bei der Kerntemperatur von $T_K = 85\text{ °C}$

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{3,M}$	83.460	0.007	Normal	1	0.007
δT_{Kal}	0.000	0.300	Normal	1	0.300
δU_{MKal}	0.000	2.732	Normal	0.019	0.051
δT_{Th}	0.000	0.034	Rechteck	1	0.034
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_3	83.525				0.306

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{2,M}$	83.435	0.008	Normal	1	0.008
δT_{Kal}	0.000	0.300	Normal	1	0.300
δU_{MKal}	0.000	2.732	Normal	0.019	0.051
δT_{Th}	0.000	0.034	Rechteck	1	0.034
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	83.501				0.306

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{1,M}$	83.344	0.010	Normal	1	0.010
δT_{Kal}	0.000	0.300	Normal	1	0.300
δU_{MKal}	0.000	2.732	Normal	0.019	0.051
δT_{Th}	0.000	0.034	Rechteck	1	0.034
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	83.410				0.306

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{O,M}$	83.323	0.013	Normal	1	0.013
δT_1	0.081	0.477	Normal	1	0.477
δT_1	-0.022	0.131	Normal	1	0.131
δT_1	0.006	0.035	Normal	1	0.035
δT_t	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_U	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_{NL}	0.000	0.0003	Rechteck	1	0.0003
T_O	83.388				0.498

Tabelle A. 6 Messunsicherheitsbudget für den Aluminiumprüfkörper bei der Kerntemperatur von $T_K=300^\circ\text{C}$

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{3,M}$	296.170	0.007	Normal	1	0.007
δT_{Kal}	0.000	0.889	Normal	1	0.889
δU_{MKal}	0.000	2.967	Normal	0.019	0.055
δT_{Th}	0.000	0.155	Rechteck	1	0.155
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_3	296.235				0.904

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{2,M}$	295.415	0.021	Normal	1	0.021
δT_{Kal}	0.000	0.886	Normal	1	0.886
δU_{MKal}	0.000	2.966	Normal	0.019	0.055
δT_{Th}	0.000	0.154	Rechteck	1	0.154
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	295.480				0.901

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{1,M}$	295.361	0.007	Normal	1	0.007
δT_{Kal}	0.000	0.886	Normal	1	0.886
δU_{MKal}	0.000	2.966	Normal	0.019	0.055
δT_{Th}	0.000	0.154	Rechteck	1	0.154
δU_{VS}	3.527	0.145	Rechteck	0.019	0.003
T_1	295.426				0,904

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
$T_{O,M}$	295.414	0.012	Normal	1	0.012
δT_1	0.081	1.358	Normal	1	1.358
δT_1	-0.022	0.373	Normal	1	0.373
δT_1	0.006	0.100	Normal	1	0.100
δT_t	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_U	0.000	0.0289	Rechteck	1	0.029
δT_{NL}	0.000	0.0035	Rechteck	1	0.0035
T_O	295.479				1.412

Tabelle A. 8 Die Messergebnisse bei der Wärmeableitungsfehlerbestimmung beim Aufsetzen von untersuchten Fühlern an den Stahlprüfkörper

Ohne thermische Isolation						
85°C	Pt100		Typ K		NTC	
ST	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	80.46564	0.053833	80.49921	0.073326	75.06603	0.122725
Tos	82.06467	0.037074	81.84854	0.038928	81.68498	0.022222
Ts-Tos	-1.59902	0.020657	-1.34933	0.036229	-6.61895	0.103218
Tu	24.31037	0.088499	23.73795	0.149742	23.78176	0.049172
Rs	131.0361	0.020532	3287.381	3.04602	739.1546	3.01478
Bs	0.027687	0.000411	0.023221	0.000643	0.114312	0.001871
Mit thermischer Isolation						
85°C	Pt100		Typ K		NTC	
ST	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	81.23789	0.02195	81.31374	0.021433	77.14433	0.042783
Tos	82.27661	0.038214	82.07086	0.034913	82.03855	0.011966
Ts-Tos	-1.03872	0.023275	-0.75712	0.035186	-4.89421	0.032264
Tu	24.3568	0.087047	23.79457	0.169955	23.76208	0.092764
Rs	131.3307	0.008372	3321.219	0.890672	690.0919	0.970624
Bs	0.017933	0.000379	0.012991	0.000574	0.083982	0.000455
Ohne thermische Isolation						
150°C	Pt100		Typ K		NTC	
ST	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	136.8014	0.053011	139.9295	0.033356	128.2099	0.187192
Tos	143.3138	0.004045	142.7592	0.044756	142.2876	0.03132
Ts-Tos	-6.5124	0.05062	-2.82974	0.022782	-14.0777	0.163572
Tu	24.27463	0.081715	24.81098	0.101733	24.0928	0.060376
Rs	152.329	0.017991	5731.663	1.353126	157.0232	0.749357
Bs	0.054582	0.000422	0.023991	0.000172	0.119106	0.00136
Mit thermischer Isolation						
150°C	Pt100		Typ K		NTC	
ST	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	139.2617	0.125147	141.7179	0.067991	132.8698	0.132025
Tos	143.802	0.060921	143.3044	0.040109	143.1038	0.055226
Ts-Tos	-4.54035	0.066639	-1.58647	0.069976	-10.234	0.081122
Tu	24.21291	0.067277	24.81382	0.168828	24.09196	0.090386
Rs	153.2459	0.046802	5804.039	2.75024	139.5681	0.460801
Bs	0.037967	0.000572	0.013388	0.000574	0.085992	0.000729
Ohne thermische Isolation						
300°C	Pt100		Typ K		NTC	
ST	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	274.2215	0.117128	274.6139	0.046317		
Tos	285.9356	0.037218	284.9606	0.025039		
Ts-Tos	-11.7141	0.1001	-10.3467	0.021858		
Tu	26.34845	1.014449	29.52271	0.101398		
Rs	202.5506	0.041779	11160.47	1.904366		
Bs	0.045126	0.000302	0.040506	9.78E-05		
Mit thermischer Isolation						
300°C	Pt100		Typ K		NTC	
ST	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	279.6276	0.145988	278.7538	0.518219		
Tos	286.9706	0.077193	285.7983	0.123537		
Ts-Tos	-7.34298	0.08729	-7.04451	0.396793		
Tu	26.96076	1.090121	29.01286	0.161013		
Rs	204.4769	0.051971	11330.8	21.3373		
Bs	0.028242	0.000351	0.027435	0.001567		

Tabelle A. 9 Die Messergebnisse bei der Wärmeableitungsfehlerbestimmung beim Aufsetzen von untersuchten Fühlern an den Aluminiumprüfkörper

Ohne thermische Isolation						
85°C	Pt100		Typ K		NTC	
AL	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	77.90678	0.106885	81.85825	0.026837	77.79679	0.0585
Tos	82.97231	0.006808	82.65764	0.014227	82.63243	0.010739
Ts-Tos	-5.06553	0.101409	-0.7994	0.024457	-4.83563	0.052517
Tu	24.87122	0.045137	24.78983	0.030234	24.6266	0.020924
Rs	130.0594	0.040813	3343.838	1.11458	675.4869	1.301597
Bs	0.087184	0.001727	0.013814	0.000423	0.083365	0.000921
Mit thermischer Isolation						
85°C	Pt100		Typ K		NTC	
AL	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	79.27238	0.046138	82.41518	0.06193	79.07986	0.037008
Tos	83.00909	0.02077	82.71325	0.018606	82.71075	0.01426
Ts-Tos	-3.73671	0.026596	-0.29807	0.043703	-3.63088	0.027852
Tu	24.93313	0.037083	24.74081	0.046002	24.46254	0.089398
Rs	130.5808	0.017609	3366.972	2.571954	647.773	0.779843
Bs	0.064342	0.000438	0.005141	0.000752	0.062335	0.000547
Ohne thermische Isolation						
150°C	Pt100		Typ K		NTC	
AL	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	142.414	0.130885	145.1797	0.121465	137.344	0.062843
Tos	147.738	0.010261	147.5552	0.018642	147.4607	0.007393
Ts-Tos	-5.32395	0.120962	-2.37546	0.106553	-10.1167	0.062709
Tu	25.93576	0.03081	25.71526	0.027787	25.77271	0.04351
Rs	154.4242	0.048895	5943.952	4.904662	124.9447	0.192267
Bs	0.043284	0.000764	0.019496	0.000873	0.083136	0.000526
Mit thermischer Isolation						
150°C	Pt100		Typ K		NTC	
AL	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	143.9703	0.045603	146.8809	0.091886	140.1047	0.081581
Tos	147.7537	0.015752	147.6601	0.02145	147.6125	0.008214
Ts-Tos	-3.78339	0.032	-0.77922	0.079812	-7.50784	0.073414
Tu	25.71873	0.106314	25.78658	0.057156	25.9298	0.083852
Rs	155.0054	0.017027	6012.612	3.707001	116.8132	0.230608
Bs	0.031002	0.000254	0.006394	0.000656	0.061701	0.000645
Ohne thermische Isolation						
300°C	Pt100		Typ K		NTC	
AL	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	287.464	0.04822	290.3631	0.183728		
Tos	297.0353	0.006027	296.6057	0.015318		
Ts-Tos	-9.57135	0.050029	-6.24878	0.1655		
Tu	27.2244	0.053327	26.97797	0.103834		
Rs	207.2525	0.013152	11809.75	7.615544		
Bs	0.035474	0.000188	0.023153	0.000627		
Mit thermischer Isolation						
300°C	Pt100		Typ K		NTC	
AL	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$	\bar{x}	$\bar{u}(x)$
Ts	290.6553	0.131214	293.7024	0.349511		
Tos	297.1386	0.027458	296.8613	0.032311		
Ts-Tos	-6.4833	0.103832	-3.15896	0.318482		
Tu	27.16352	0.017052	26.81144	0.123517		
Rs	208.3949	0.046525	11947.79	14.4594		
Bs, gestört	0.024014	0.000387	0.011697	0.001177		

Tabelle A. 10 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 85\text{ °C}$ mit Pt100-Tasttemperaturenfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	77.87212	0.635404	Normal	1	0.635404
$\Delta T_{Th,1}$	0.432666	0.090287	Normal	1	0.090287
$\Delta T_{Th,2+3}$	4.328752	0.636745	Normal	1	0.636745
δT_{Eig}	-0.00856	0.000711	Normal	1	0.000711
δT_{TKal}	0	0.1	Normal	1	0.1
δR_{MKal}	0	0.058314	Rechteck	2.588	0.262181
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	2.588	0.007506
T	82.62498				0,946641

Tabelle A. 11 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150\text{ °C}$ mit Pt100-Tasttemperaturenfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	137.7762	1.638752	Normal	1	1.638752
$\Delta T_{Th,1}$	1.054126	0.126357	Normal	1	0.126357
$\Delta T_{Th,2+3}$	6.47123	1.558736	Normal	1	1.558736
δT_{Eig}	-0.00826	0.000357	Normal	1	0.000357
δT_{TKal}	0	0.1	Normal	1	0.1
δR_{MKal}	0	0.058617	Rechteck	2.616	0.26563
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	2.616	0.007587
T	145.2933				2.282926

Tabelle A. 12 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 300\text{ °C}$ mit Pt100-Tasttemperaturenfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	275.8657	1.337613	Normal	1	1.337613
$\Delta T_{Th,1}$	2.026699	0.240319	Normal	1	0.240319
$\Delta T_{Th,2+3}$	10.51655	1.338383	Normal	1	1.338383
δT_{Eig}	-0.0084	0.000475	Normal	1	0.000475
δT_{TKal}	0	0.1	Normal	1	0.1
δR_{MKal}	0	0.058908	Rechteck	2.684	0.273836
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	2.684	0.007783
T	288.4006				1,929579

Tabelle A. 13 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 85 \text{ °C}$ mit Pt100-Tasttemperaturfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	81.18813	0.392233	Normal	1	0.392233
$\Delta T_{Th,1}$	0.049259	0.058398	Normal	1	0.058398
$\Delta T_{Th,2+3}$	2.065079	0.420014	Normal	1	0.420014
δT_{Eig}	-0.00289	0.00012	Normal	1	0.00012
δT_{TKal}	0	0.1	Normal	1	0.1
δR_{MKal}	0	0.058314	Rechteck	2.588	0.262214
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	2.588	0.007506
T	83.29958				0.642247

Tabelle A. 14 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 300 \text{ °C}$ mit Pt100-Tasttemperaturfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	285.3024	2.123014	Normal	1	2.123014
$\Delta T_{Th,1}$	0.377053	0.04064	Normal	1	0.04064
$\Delta T_{Th,2+3}$	9.824362	2.122629	Normal	1	2.122629
δT_{Eig}	-0.00374	0.000189	Normal	1	0.000189
δT_{TKal}	0	0.1	Normal	1	0.1
δR_{MKal}	0	0.058927	Rechteck	2.684	0.273926
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	2.684	0.007783
T	295.5001				3.016539

Tabelle A. 15 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 85 \text{ °C}$ mit NTC-Tasttemperaturfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	73.75469	0.438894	Normal	1	0.438894
$\Delta T_{Th,1}$	0.876856	0.110082	Normal	1	0.110082
$\Delta T_{Th,2+3}$	8.177515	0.370639	Normal	1	0.370639
δT_{TKal}	0	0.467	Normal	1	0.467
δR_{MKal}	0	0.062144	Rechteck	-0.039	-0.00242
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	-0.039	-6.5E-05
T	82.80906				0.748474

Tabelle A. 16 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150 \text{ °C}$ mit NTC-Tasttemperaturfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	124.6092	0.846663	Normal	1	0.846663
$\Delta T_{Th,1}$	1.886288	0.474904	Normal	1	0.474904
$\Delta T_{Th,2+3}$	18.59386	0.871914	Normal	1	0.871914
δT_{TKal}	0	0.496	Normal	1	0.496
δR_{MKal}	0	0.058738	Rechteck	-0.22	-0.01292
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	-0.22	-0.00037
T	145.0893				1.39599

Tabelle A. 17 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 85\text{ °C}$ mit NTC-Tasttemperaturfühler

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	77.89525	0.277636	Normal	1	0.277635961
$\Delta T_{Th,1}$	0.178583	0.025707	Normal	1	0.025706897
$\Delta T_{Th,2+3}$	5.262351	0.284814	Normal	1	0.284814458
δT_{TKal}	0	0.467	Normal	1	0.467
δR_{MKal}	0	0.061621	Rechteck	-0.045	-0.002772955
δR_{MAufl}	0	0.001674	Rechteck	-0.045	-7.53442E-05
T	83.33618				0.613969

Tabelle A. 18 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 85\text{ °C}$ mit einem Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	80.11278	0.253926	Normal	1	0.253926
$\Delta T_{Th,1}$	0.763236	0.050168	Normal	1	0.050168
$\Delta T_{Th,2+3}$	1.96666	0.2604	Normal	1	0.260422
δU_{VS}	2.7616	0.1139	Rechteck	0.024096	0.002745
δU_{MKal}	0	2.9635	Rechteck	0.024096	0.07141
δU_{MAufl}	0	0.1669	Rechteck	0.024096	0.004021
T	82.90922				0.374083

Tabelle A. 19 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 150\text{ °C}$ mit einem Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	139.6397	0.473569	Normal	1	0.473569
$\Delta T_{Th,1}$	1.412436	0.104303	Normal	1	0.104303
$\Delta T_{Th,2+3}$	4.238894	0.5448	Normal	1	0.54481
δU_{VS}	2.7616	0.1139	Rechteck	0.024814	0.002827
δU_{MKal}	0	3.0167	Rechteck	0.024814	0.074856
δU_{MAufl}	0	0.1669	Rechteck	0.024814	0.00414
T	145.3595				1.204505

Tabelle A. 20 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Stahlprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 300\text{ °C}$ mit einem Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	273.9236	0.352412	Normal	1	0.352412
$\Delta T_{Th,1}$	2.993328	0.537358	Normal	1	0.537358
$\Delta T_{Th,2+3}$	11.57935	0.2852	Normal	1	0.285198
δU_{VS}	2.7616	0.1139	Rechteck	0.02381	0.002712
δU_{MKal}	0	3.1524	Rechteck	0.02381	0.075058
δU_{MAufl}	0	0.1669	Rechteck	0.02381	0.003973
T	288.562				0.707066

Tabelle A. 21 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 85\text{ °C}$ mit einem Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	81.73671	0.128397	Normal	1	0.128397
$\Delta T_{Th,1}$	0.242314	0.017648	Normal	1	0.017648
$\Delta T_{Th,2+3}$	1.381202	0.1233	Normal	1	0.123315
δU_{VS}	2.7616	0.1139	Rechteck	0.024096	0.002745
δU_{MKal}	0	2.9651	Rechteck	0.024096	0.071448
δU_{MAufl}	0	0.1669	Rechteck	0.024096	0.004021
T	83.42677				0.2607

Tabelle A. 22 Messunsicherheitsbudget zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Aluminiumprüfkörpers bei der Kerntemperatur $T_K = 300\text{ °C}$ mit einem Kreuzband-Tasttemperaturfühler von Typ K

Größe X_i	Schätzwert x_i	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
T_M	286.4162	0.363566	Normal	1	0.363566
$\Delta T_{Th,1}$	0.949588	0.061114	Normal	1	0.061114
$\Delta T_{Th,2+3}$	9.073379	0.783964	Normal	1	0.783964
δU_{VS}	2.7616	0.1139	Rechteck	0.02381	0.002712
δU_{MKal}	0	3.1646	Rechteck	0.02381	0.075347
δU_{MAufl}	0	0.1669	Rechteck	0.02381	0.003973
T	296.5049				0.8696

Tabelle A. 23 Kopplungsfaktor für Oberflächentemperaturmessungen am Stahlprüfkörper mit unterschiedlichen Tasttemperaturfühlern mit der Hilfe von Anpressvorrichtung

St		Tasttemperaturfühler					
		Pt100		Typ K		NTC	
T_K		\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$
	85 °C	ohne Anpresskraft	0.1213	0.0062	0.0472	0.0046	0.1772
mit Anpresskraft		0.0848	0.0109	0.0578	0.0146	0.1567	0.0084
150 °C	ohne Anpresskraft	0.0657	0.0017	0.0553	0.0039	0.1944	0.0059
	mit Anpresskraft	0.0628	0.0133	0.0360	0.0066	0.1713	0.0089
300 °C	ohne Anpresskraft	0.0550	0.0057	0.0549	0.0043		
	mit Anpresskraft	0.0480	0.0057	0.0470	0.0040		

Tabelle A. 24 Kopplungsfaktor für Handmessungen der Oberflächentemperatur am Stahlprüfkörper mit unterschiedlichen Tasttemperaturfühlern

St		Handmessungen					
		Pt100		Typ K		NTC	
T_K		\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$
	85		0.0318	0.0110	0.0562	0.0093	0.1288
150		0.0232	0.0047	0.0494	0.0006	0.1426	0.0109
300		0.0385	0.0039	0.0516	0.0030		

Tabelle A. 25 Kopplungsfaktor für Oberflächentemperaturmessungen am Stahlprüfkörper mit unterschiedlichen Tasttemperaturfühlern mit der Hilfe von Anpressvorrichtung

<i>Alu</i>							
		Pt100		Typ K		NTC	
		\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$
85 °C	ohne Anpresskraft	0.0553	0.0039	0.0277	0.0023	0.1353	0.0200
	mit Anpresskraft	0.0360	0.0066	0.0245	0.0044	0.0926	0.0051
150 °C	ohne Anpresskraft	0.0549	0.0043	0.0328	0.0034	0.1556	0.0124
	mit Anpresskraft	0.0481	0.0068	0.0278	0.0015	0.1154	0.0085
300 °C	ohne Anpresskraft	0.0480	0.0057	0.0331	0.0018		
	mit Anpresskraft	0.0382	0.0080	0.0375	0.0029		

Tabelle A. 26 Kopplungsfaktor für Handmessungen der Oberflächentemperatur am Stahlprüfkörper mit unterschiedlichen Tasttemperaturfühlern

<i>Alu</i>	Handmessungen					
	Pt100		Typ K		NTC	
	\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$	\bar{B}	$u(\bar{B})$
T_K						
85	0.0116	0.0056	0.0240	0.0028	0.0760	0.0065
150	0.0176	0.0078	0.0327	0.0015	0.0839	0.0140
300	0.0209	0.0044	0.0287	0.0039		