

S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Praktikumsskript Thermische Messtechnik

TEIL 1: TEMPERATURMESSUNG

Die Hintergrundinformationen in diesem Skript sind zum größten Teil aus der folgenden Quelle entnommen. Die Überarbeitung des Skriptes ist in Arbeit.

Weber, D.; Nau, M.: *Elektrische Temperaturmessung - Mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*. Herausgegeben von JUMO Mess- und Regeltechnik, 2. Auflage 1991.

Universität Kassel

Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

Datum: 27.07.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Lernziele	4
2	Grundlagen	4
2.1	Allgemein	4
2.2	Berührende Temperaturmessung	6
2.2.1	Metall-Widerstandsthermometer	7
2.2.2	Halbleiter-Widerstandsthermometer	9
2.2.3	Thermoelemente	10
2.2.4	Kalibrierung von Widerstandsthermometern und Thermoelementen	12
2.3	Berührungslose Temperaturmessung	13
2.3.1	Wichtige Begriffe und Definitionen	14
2.3.2	Haupteinflüsse auf die Messung mit der Wärmebildkamera	16
3	Teil I - Kalibrierung	17
3.1	Versuchsaufbau - Kalibrierung	17
3.2	Versuchsdurchführung - Kalibrierung	19
3.3	Versuchsauswertung - Kalibrierung	21
4	Teil II - Identifizierung von Temperatursensoren	22
4.1	Versuchsaufbau - Identifizierung	22
4.2	Durchführung - Identifizierung	22
4.3	Versuchsauswertung - Identifizierung	22
5	Teil III - Wärmebildkamera	23
5.1	Versuchsaufbau - Wärmebildkamera	23
5.2	Versuchsdurchführung - Wärmebildkamera	24
5.3	Versuchsauswertung - Wärmebildkamera	24
	Literaturverzeichnis	25
	Anhang	26

**Die Durchführung des Versuchs ist nur nach Teilnahme an der
Laborunterweisung und nach dem Lesen der Betriebsanweisung
“Versuch - Temperaturmessung“ erlaubt!**

1 Lernziele

- Erlernen verschiedener Messprinzipien der Temperaturmessung
- Kennenlernen der Funktionsweise der verwendeten Temperatursensoren
- Kalibrieren von Temperatursensoren mittels Fixpunkt- und Vergleichsmethode
- Kennenlernen der Funktion und des Umgangs mit einer Wärmebildkamera
- Beurteilen der Einflussfaktoren auf Messungen mit einer Wärmebildkamera

2 Grundlagen

2.1 Allgemein

In vielen Bereichen der Solarthermie ist die Temperatur eine der zentralen Messgrößen. Wichtiger noch als die genaue Bestimmung von Absoluttemperaturen ist hierbei häufig die exakte Bestimmung von Temperaturdifferenzen z.B. bei der Regelung der Speicherbeladung.

Die Temperatur ist die am häufigsten gemessene technisch-physikalische Größe. Sie ist ein Maß für die Energie eines Körpers, hervorgerufen durch Atombewegungen im Inneren. Hierdurch ändern sich in Abhängigkeit der Temperatur eines Körpers praktisch alle seine mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften (z.B. Volumen, elektrischer Widerstand und abgegebene Strahlungsleistung). Diese (temperaturabhängigen) Effekte können für die Temperaturmessung genutzt werden.

Kalibrierhierarchie und die ITS-90 Temperaturskala¹

Um eine vergleichbare und genaue Temperaturmessung gewährleisten zu können, müssen die eingesetzten Sensoren bzw. Geräte vorher kalibriert werden. Kalibrieren bedeutet,

¹ITS-90 steht für **I**nternationale **T**emperatur**S**kala von 1990

dass eine Messabweichung zu einer Referenz bestimmt und dokumentiert wird. Als Referenz werden so genannte “Normale” definiert, die in ihrer Hierarchie (siehe Abb. 2.1) letztendlich indirekt oder direkt auf das höchste Normal zurückgeführt werden.

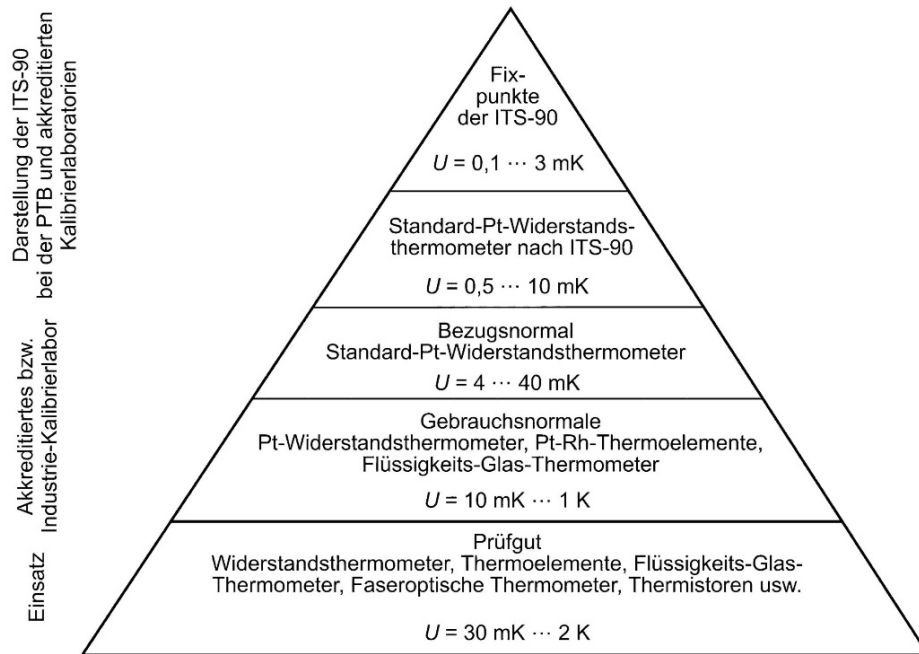


Abbildung 2.1: Kalibrierhierarchie im Temperaturbereich von $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mit typisch erreichbaren Kalibrier- bzw. Messunsicherheiten U

Für die Temperaturmessung bildet das höchste Normal die ITS-90-Temperaturskala. Hier sind mithilfe von sogenannten Fixpunkten, besonders stabile Aggregatübergänge von Reinstoffen festgelegt. In Abb. 2.2(a) sind die Fixpunkte der ITS-90 dargestellt. Es werden Erstarrungspunkte von Metallen und Tripelpunkte verwendet.

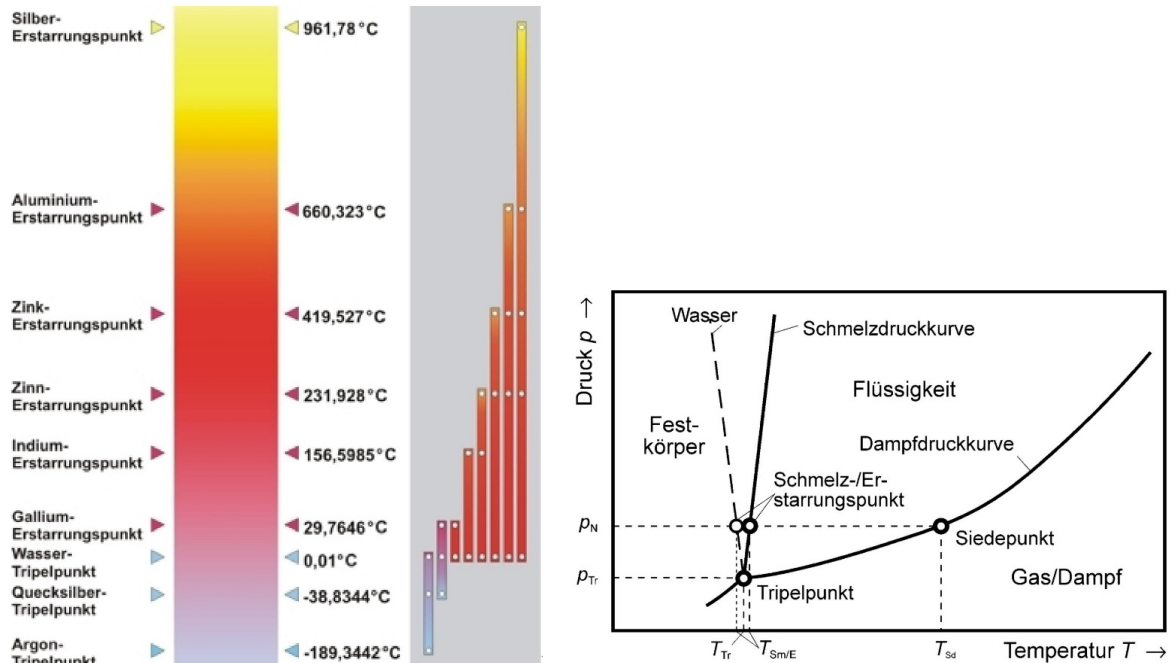
Der Wassertripelpunkt

Im Tripelpunkt eines Stoffes sind alle drei Phasen (fest, flüssig, gasförmig) vorhanden. Der Wassertripelpunkt ist einer der in der ITS-90 benutzten Fixpunkte. Er liegt bei 6,1 mbar und $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (zu sehen in Abb. 2.2(b)).

In der Temperaturmessung ist der Wasser-Tripelpunkt einer der wichtigsten definierenden Punkte. Mit ihm und dem absoluten Nullpunkt ist die Kelvin-Temperaturskala definiert. Desweiteren liegt er im Temperaturbereich vieler technischer Anwendungen und kann z.B. als hochgenaue Vergleichsstellentemperatur von Thermoelementen dienen. Die erreichbare

2.2 Berührende Temperaturmessung

Genauigkeit liegt bei 0,07 mK. Dies macht den Wassertripelpunkt zum genauesten Fixpunkt der ITS-90. Erzeugt wird er in sogenannten Wassertripelpunktzellen.



(a) Temperaturfixpunkte der ITS 90, Quelle: <http://www.kalibrierdienst-klasmeier.de/-rueckfuehrung>, Abruf 25.04.2016

(b) Phasendiagramm mit Temperaturfixpunkten aus (Bernhard, 2014), S.500

Abbildung 2.2: Temperaturfixpunkte bzw. Tripelpunkte

Messverfahren

Grundsätzlich wird die Temperaturmessung in zwei verschiedene Verfahren unterteilt, die Berührende und die Berührungslose Temperaturmessung. Beide werden im Folgenden vorgestellt.

2.2 Berührende Temperaturmessung

Bei der Berührenden Temperaturmessung wird ein Berührungsthermometer mit dem Messobjekt in ein thermisches Gleichgewicht gebracht. Dafür ist eine gute Wärmeanbindung an das Messobjekt nötig. Die Wärmeübertragung kann, je nach Messaufgabe, durch Wärmeleitung, Konvektion und/oder Wärmestrahlung geschehen.

Vorteile der Berührenden gegenüber der Berührungslosen Temperaturmessung sind unter anderem

- Hohe Genauigkeiten erreichbar
- Schnelle Ansprechzeiten
- Einfache und preiswerte Sensoren vorhanden
- Großer Temperaturbereich

Die Temperaturmessung erfolgt durch Umrechnung einer physikalischen Größe in die Messgröße Temperatur. Verschiedene Effekte werden hierfür benutzt, wovon einige im Folgenden beschrieben werden.

2.2.1 Metall-Widerstandsthermometer

Die elektrische Leitfähigkeit eines Metalls basiert auf der Beweglichkeit der Leitungselektronen, dem so genannten Elektronengas. Wird eine Spannung an die Enden eines Metallstabes gelegt, bewegen sich die Elektronen zum Pluspol. Fehler in der Kristallstruktur des Metalls stören diese Bewegung. Hierzu zählen fremde oder fehlende Gitteratome, Korngrenzen und Atome auf Zwischengitterplätzen. Da diese Fehlstellen temperaturabhängig sind, ergeben sie einen konstanten Widerstand. Mit wachsender Temperatur schwingen die Atome des Metallgitters verstärkt um ihre Ruhelage und behindern dadurch die Bewegung der Leitungselektronen. Da diese Bewegung linear mit der Temperatur zunimmt, hängt die dadurch verursachte Widerstandszunahme in erster Näherung direkt von der Temperatur ab. Der Zusammenhang zwischen der Temperatur T und dem elektrischen Widerstand R lässt sich im Allgemeinen über ein Polynom höherer Ordnung approximieren:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots) \quad (2.1)$$

$A \dots C$ sind hierbei stoffabhängige Koeffizienten, R_0 ist der Nennwiderstand bei $0\text{ }^\circ\text{C}$.

Für möglichst genaue und reproduzierbare Messungen muss das verwendete Metall unter anderem folgende Eigenschaften besitzen:

- Reproduzierbare und stetige Kennlinie ohne Hysterese
- Auch in hohen Temperaturen stabile Kennlinie
- Hoher Temperaturkoeffizient des Widerstandes, d.h. große Änderung des Widerstandes mit der Temperatur

- Druckabhängiger Widerstand
- Der Widerstand ändert sich nicht durch chemische Einflüsse, Korrosion oder Verformung

Als genormte Metall-Widerstandsthermometer in technischen Anlagen kommen vor allem Platin (z.B. Pt100 oder Pt1000), Nickel und Kupfer als Sensormaterial zum Einsatz. Bei speziellen Messungen z.B. Messungen bei tiefen Temperaturen können noch eine Vielzahl anderer Materialien eingesetzt werden.

Platinwiderstandsthermometer (Pt)

Platin ist das am häufigsten eingesetzte Widerstandsmaterial in der industriellen Messtechnik. Es zeichnet sich durch seine hohe chemische Beständigkeit, seine vergleichsweise leichte Verarbeitbarkeit, der Möglichkeit seiner hochreinen Darstellung und der guten Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften (vgl. (Schreier *et al.*, 2002)) aus. In der Norm DIN EN 60751:2009-05 werden diese Eigenschaften genau festgelegt. Dazu gehört die Temperaturabhängigkeit, der Nennwert und die Standard-Kennlinien, die für den definierten Temperaturbereich $-200 \dots 850 \text{ °C}$ in zwei Bereiche unterteilt ist.

Für $0 \text{ °C} \leq T \leq 850 \text{ °C}$:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (2.2)$$

Für $-200 \text{ °C} \leq T \leq 0 \text{ °C}$:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100 \text{ °C}) \cdot T^3] \quad (2.3)$$

Mit den Koeffizienten:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}; \quad B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}; \quad C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-1};$$

Weiterhin festgelegt sind die zulässige Grenzabweichung bedingt durch Herstellungstoleranzen. Die Platin-Widerstandsthermometer werden nach Klassen gemäß Tab. 2.1 eingeteilt.

Tabelle 2.1: Zulässige Grenzabweichung von Pt-Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751:2009:05 mit dem jeweiligen gültigen Temperaturbereich

Klasse	Grenzabweichung T_G	Gültiger Temp.bereich
AA	$\pm (0,1 \text{ °C} + 0,0017 \cdot T)$	$(-50, +250) \text{ °C}$
A	$\pm (0,15 \text{ °C} + 0,002 \cdot T)$	$(-100, +450) \text{ °C}$
B	$\pm (0,3 \text{ °C} + 0,005 \cdot T)$	$(-196, +600) \text{ °C}$
C	$\pm (0,6 \text{ °C} + 0,001 \cdot T)$	$(-196, +600) \text{ °C}$

2.2.2 Halbleiter-Widerstandsthermometer

In Festkörpern werden die möglichen Energiezustände von Elektronen durch das sog. Bändermodell beschrieben. Dieses beruht darauf, dass es im Festkörper mehrere Energiebereiche gibt, in denen die möglichen Zustände, welche die Elektronen annehmen können, energetisch so dicht beieinander liegen, dass sie als Kontinuum - als Energieband - angesehen werden können. Neben diesen Energiebändern existieren „verbotene Zonen“, also Energiebereiche in denen keine erlaubten Zustände der Elektronen liegen.

Bei der Betrachtung der Leitfähigkeit eines Festkörpers sind vor allem das Valenz- und das Leitungsband von Bedeutung. Das am absoluten Nullpunkt höchstgelegene vollbesetzte Energieband ist das Valenzband, das energetisch darüber liegende Band ist das Leitungsband. Ob es sich bei einem Festkörper nun um einen Leiter, einen Halbleiter oder einen Isolator handelt, lässt sich anhand des Besetzungsgrades des Leitungsbandes und der Breite der sog. Bandlücke entscheiden. Halbleiter und Isolatoren besitzen eine verbotene Zone zwischen Valenz- und Leitungsband, die Bandlücke. Des Weiteren ist bei ihnen am absoluten Nullpunkt das Leitungsband unbesetzt, es existieren also keine freien Ladungsträger. Der Unterschied zwischen ihnen liegt in der Breite der Bandlücke: Während bei Halbleitern z.B. bei Zimmertemperatur die thermische Energie ausreicht, um Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband anzuregen, ist dies bei Isolatoren auch bei sehr hohen Temperaturen nicht möglich. Die angeregten Elektronen im Leitungsband sind frei beweglich und können daher am Ladungstransport teilnehmen. Durch die Anregung eines Elektrons entsteht im Valenzband jeweils ein Loch, wodurch das Valenzband nicht mehr vollständig besetzt ist und so ebenfalls zur Leitfähigkeit beitragen kann.

Halbleitertemperatursensoren, die auch als Thermistoren (engl.: temperature sensitive resistors) bezeichnet werden, gehören wie Metallthermometer zur Gruppe der Widerstandsthermometer. Sie haben im Vergleich zu Platin-Widerstandsthermometern deutlich größere Temperaturkoeffizienten. Man unterscheidet zwischen Heißeiter / NTC-Thermis-

toren (NTC - negative temperature coefficient) und Kaltleiter / PTC-Thermistoren (PTC - positive temperature coefficient). Heißeleiter bestehen aus polykristallinen Halbleitern und Metalloxiden (von Eisen, Zink, Kupfer usw.). Beim Kaltleiter handelt es sich um polykristalline, ferroelektrische Halbleiter-Keramiken (dotiertes Bariumtitanat).

2.2.3 Thermoelemente

Das Thermoelement basiert auf dem 1821 von Seebeck beschriebenen Effekt, dass ein geringer Strom fließt, wenn zwei metallische Leiter aus unterschiedlichem Werkstoff A und B in Verbindung stehen und entlang der beiden Leiter ein Temperaturunterschied vorliegt. Einen solchen Thermokreis zeigt Abb. 2.3.

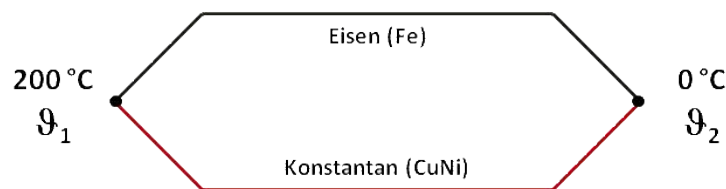


Abbildung 2.3: Thermokreis, vgl. z.B. (Bernhard, 2014), S. 919

Die Spannung selbst hängt sowohl von den beiden Materialien als auch dem Temperaturunterschied ab.

Ein metallischer Leiter ist durch seine so genannten freien Leitungselektronen ausgezeichnet, die für den Stromfluss verantwortlich sind. Befindet sich ein metallischer Leiter auf gleicher Temperatur, so bewegen sich die Elektronen auf Grund ihrer thermischen Energie innerhalb des Kristallgitters. Nach außen zeigt der Leiter keinen Ladungsschwerpunkt, er ist neutral (Abb. 2.4 links). Wird der Leiter an der einen Seite erwärmt, so wird den freien Elektronen thermische Energie zugeführt und ihre mittlere Geschwindigkeit erhöht sich gegenüber dem kalten Ende des Leiters. Die Elektronen diffundieren vom erwärmten Ende zum kalten Ende und geben dabei ihre Energie wieder ab; sie werden langsamer (Abb. 2.4 rechts).

Da sich die Elektronen durch die einseitige Wärmezufuhr verlagern, bildet sich am kalten Ende ein negativer Ladungsschwerpunkt aus. Andererseits stellt sich zwischen dem positiven Ladungsschwerpunkt am heißen Ende und dem negativen Ladungsschwerpunkt am kalten Ende ein elektrisches Feld ein, dessen Kraft die Elektronen wieder zum warmen Ende hin treibt. Das elektrische Feld baut sich solange auf, bis ein dynamisches Gleichgewicht vorliegt zwischen den Elektronen, die durch den Temperaturgradienten zum kalten

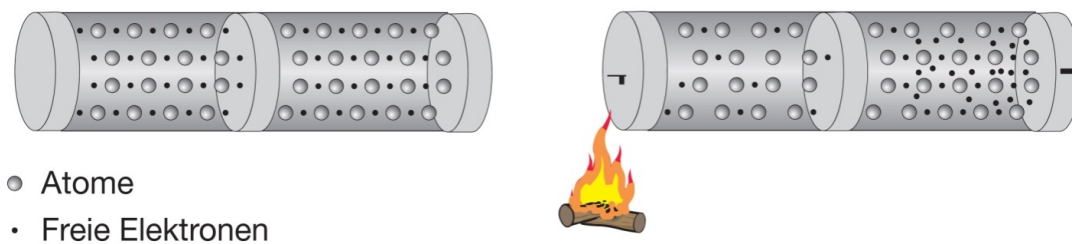


Abbildung 2.4: Aufbau metallischer Leiter und Ladungsverschiebung bei Wärmezufuhr aus (Nau, 2004), S. 17

Ende getrieben werden und der rücktreibenden Kraft des elektrischen Feldes.

Soll nun die Spannungsdifferenz zwischen dem warmen und kalten Ende des Leiters gemessen werden, muss zum Beispiel das warme Ende des Leiters mit einem elektrischen Leiter verbunden werden. Ist der zweite Leiter aus dem gleichen Material hergestellt, so liegt ein symmetrischer Aufbau mit gleichen Ladungsschwerpunkten an den beiden offenen Enden vor. Es kann keine Spannungsdifferenz zwischen den beiden Ladungsschwerpunkten gemessen werden. Besteht der zweite Leiter aus einem anderen Werkstoff mit einer anderen elektrischen Leitfähigkeit, so stellt sich auch ein anderes dynamische Gleichgewicht innerhalb des Drahtes ein. Die Folge ist, dass sich an den beiden Enden der Leiter unterschiedliche Ladungsschwerpunkte ausbilden, die mit einem Spannungsmessgerät gemessen werden (Abb. 2.5). Das Material der Anschlussleitung (in diesem Beispiel Kupfer) ist für

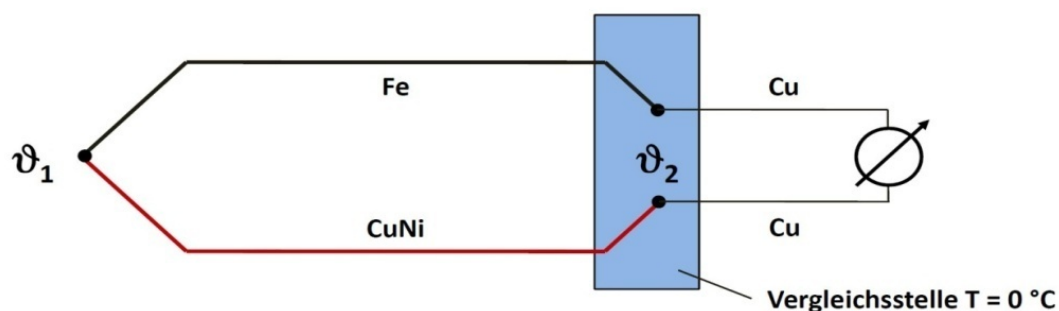


Abbildung 2.5: Thermokreis mit Anschlussleitung, vgl. z.B. (Bernhard, 2014), S. 919

die in diesem Kreis herrschende Thermospannung nicht von Bedeutung. Wichtig hingegen ist die Temperatur ϑ_2 der Verbindungsstelle mit den Kupferleitungen. Diese Temperatur wird häufig als Vergleichstemperatur bezeichnet, da Thermoelement und Anschlussleitung zusammengeklemt sind. Ist die Klemmentemperatur bekannt, kann von der gemessenen

Thermospannung direkt auf die Messstellentemperatur geschlossen werden. Dazu wird die Temperatur ϑ_2 entweder konstant (z.B. auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) gehalten oder zusätzlich durch einen weiteren Messfühler bestimmt. Für die Bestimmung dieser Temperatur wird in der Praxis der Übergang auf das Kupfer in das Messgerät verlagert, in dem mit Hilfe eines zusätzlichen Temperatursensors die Messung der Vergleichstemperatur durchgeführt wird.

Die durch den thermoelektrischen Effekt verursachte Spannung ist sehr gering und beträgt nur wenige Mikrovolt pro Kelvin. Thermoelemente werden daher im Allgemeinen nicht zur Messung im Bereich von $-30 \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet, da hier der Unterschied zur Vergleichsstellentemperatur zu gering ist, um ein störungssicheres Messsignal zu erhalten. Anwendungsfälle, bei denen die Vergleichsstelle auf eine deutlich höhere oder niedrigere Temperatur - z. B. durch Eintauchen in flüssigen Stickstoff - gebracht wird, sind zwar denkbar, in ihrer Anwendung aber selten.

Die Größe der Thermospannung hängt neben den Temperaturen von den verwendeten Metallen ab. Gängige Thermoelemente mit den entsprechenden Farbcodes nach DIN EN 60584-3 finden sich in nachfolgender Tabelle 2.2.

In der Solarthermie werden Thermoelemente zur Erfassung sehr schnell ablaufender Temperaturänderungen oder zur Temperaturmessung in freien Konvektionsströmungen verwendet. Mit Thermoelementen kann direkt im Medium oder auch von außen als Anlegefühler gemessen werden.

Tabelle 2.2: Gängige Thermoelemente und deren Farbcodes

Metallkombination		Kenn- buchstabe	Farbcodes*	
			Mantel	Plus-Pol
Eisen-Konstantan	Fe-CuNi	J	Schwarz	Schwarz
Kupfer-Konstantan	Cu-CuNi	T	Braun	Braun
Nickelchrom-Nickel	NiCr-Ni	K	Grün	Grün
Nichelchrom-Konstantan	NiCr-CuNi	E	Violett	Violett
PlatinRhodium-Platin	Pt10Rh-Pt	S	Orange	Orange

*Der Minus-Pol ist bei allen aufgeführten Thermoelementen weiß

2.2.4 Kalibrierung von Widerstandsthermometern und Thermoelementen

Widerstandsthermometer und Thermoelemente können mithilfe von Fixpunktzellen direkt kalibriert werden (Fixpunkt-Kalibrierung). Hierzu wird der zu kalibrierende Sensor in das Kalibriervolumen der Fixpunktzelle eingesetzt. Nach Erreichen des Fixpunktzustandes kann die vom Sensor angezeigte Temperatur mit der bekannten Temperatur der

Fixpunktzelle verglichen werden. Es findet eine direkte Rückführung auf die ITS-90 statt. Der Nachteil ist, dass die Fixpunktzellen meist ein kleines Kalibriervolumen besitzen, welches die Anzahl an gleichzeitig zu kalibrierenden Sensoren einschränkt.

Eine andere Möglichkeit bildet die sogenannte Vergleichs-Kalibrierung. Hier werden z.B. mithilfe eines temperierten Flüssigkeitsbades bestimmte Temperaturen eingestellt (je nach Messbereich) und die zu kalibrierenden Sensoren mit einem Referenzsensor verglichen. Als Referenzsensor wird dann ein Sensor benutzt, der genauer ist und auf die ITS-90 zurückgeführt wurde. Diese Methode besitzt in der Regel durch eine längere Messkette eine größere Messunsicherheit. Der Vorteil ist, dass gegenüber der Fixpunktmethode größere Sensoren-Sätze kalibriert werden können und im Allgemeinen die Umsetzung auch einfacher ist.

2.3 Berührungslose Temperaturmessung

Jeder Körper über dem absoluten Nullpunkt sendet Infrarotstrahlung aus. Die Strahlungspyrometrie und die Thermografie machen sich diesen Effekt zunutze. Es kann die Strahlungsleistung eines Punktes bei Einelementsensor-Strahlungspyrometern oder einer Linie bzw. einer Fläche bei Mehrelementsensor-Strahlungspyrometern, Linienscannern und Wärmebildkameras (u. a.) gemessen werden. Über die Grundlagen des Planckschen Strahlungsgesetzes kann so auf die Temperatur des Körpers geschlossen werden.

Bei nicht transparenten Körpern kann nur die Oberflächentemperatur bestimmt werden. Bei steigender Transparenz haben die tieferen Schichten des Körpers / Fluides einen steigenden Einfluss. Bei Gasen wird grundsätzlich vom ganzen Volumen Strahlung emittiert. (Bernhard, 2014)

Es können Messbereiche zwischen -200 °C und 3000 °C gemessen werden. In Spezialfällen können auch Messbereiche bis 5000 °C realisiert werden. Vorteile und spezielle Einsatzgebiete der Berührungslosen gegenüber Berührenden Temperaturmessungen sind unter anderem:

- Berührungsloses und damit rückwirkungsfreies Messen
- Messung an Objekten kleiner Wärmekapazität bzw. schlechter Wärmeleitfähigkeit
- Messung an ruhenden und bewegten Objekten
- Messung über kleine und große Distanzen

- Messung an spannungsführenden Objekten
- Kontaminationsfreie Messungen an biologischen Materialien

Grundlegender Aufbau einer Wärmebildkamera

In Abb. 2.6 ist der grundlegende Aufbau einer Wärmebildkamera dargestellt. Die vom

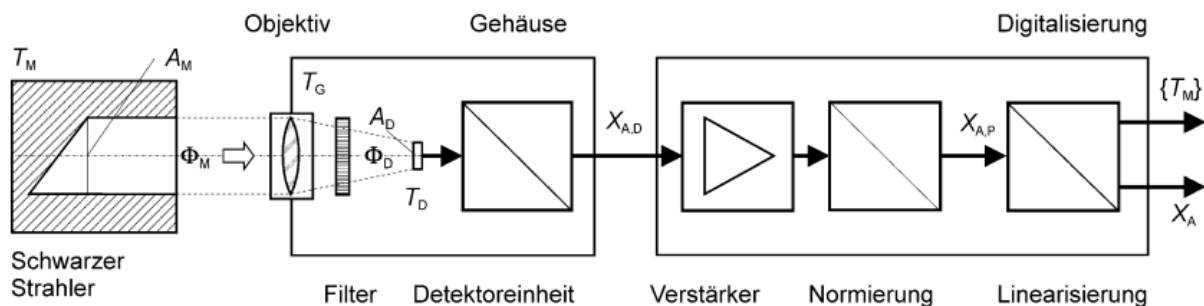


Abbildung 2.6: Strahlungstemperaturmessung an einem Schwarzen Strahler bzw. Prinzipskizze einer Thermographiekamera aus (Bernhard, 2014), S. 1188

Messobjekt ausgesendete elektromagnetische Strahlung wird vom Objektiv aufgenommen. Der verwendete spektrale Anteil wird entweder vom Objektiv direkt herausgefiltert oder durch einen zusätzlichen Filter hinter dem Objektiv von der restlichen Strahlung getrennt. Der verbleibende spektrale Anteil wird von einem Strahlungsempfänger erfasst. Das durch den Empfänger abgegebene elektrische Signal wird verstärkt und durch die elektrische Auswerteeinheit verarbeitet. Die Ausgabe der Daten kann entweder von einem am Thermografie-Gerät verbauten Display oder durch ein externes Anzeigegerät geschehen.

2.3.1 Wichtige Begriffe und Definitionen

Strahlung, die auf einen Körper, trifft kann reflektiert, absorbiert oder transmittiert (durchgelassen) werden. Hierzu sind drei wichtige Größen definiert:

- der Absorptionsgrad $\alpha(\lambda, T)$ ist das Verhältnis von absorbierte Strahlungsleistung zur gesamten am Körper ankommenden Strahlungsleistung
- der Reflexionsgrad $\rho(\lambda, T)$ ist das Verhältnis von reflektierter Strahlungsleistung zur gesamten am Körper ankommenden Strahlungsleistung

- der Transmissionsgrad $\tau(\lambda, T)$ ist das Verhältnis von durch den Körper hindurchtretender Strahlungsleistung zur gesamten am Körper ankommenden Strahlungsleistung

Diese drei Kenngrößen sind bei den meisten Stoffen von der Wellenlänge λ und der Temperatur T abhängig. Durch die Abhängigkeit von der Wellenlänge wird oft auch vom spektralen Absorptions- / Reflexions- / Transmissionsgrad gesprochen. Die Summe dieser drei Größen ist stets 1:

$$\alpha(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1 \quad (2.4)$$

Bei der berührungslosen Temperaturmessung von Objekten ist vor allem interessant wie viel Strahlung das Messobjekt emittiert (aussendet). Hierzu ist der Emissionsgrad ϵ als das Verhältnis von abgegebener Strahlungsleistung zur abgegebenen Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers definiert. Des Weiteren gilt für einen Körper im Strahlungsgleichgewicht (nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz), dass er genauso viel Strahlung emittiert wie er absorbiert. Demnach gilt:

$$\alpha(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \quad (2.5)$$

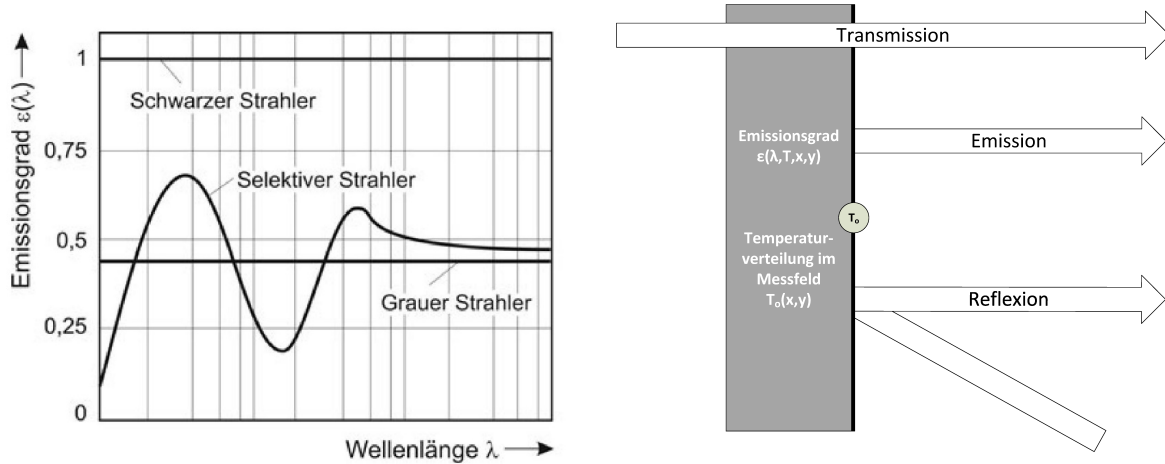
Ein schwarzer Körper (auch schwarzer Strahler) ist ein idealisierter Körper. Für ihn gilt, dass er alle auf ihn auftreffende Strahlung absorbiert. Sein Absorptionsgrad ist unabhängig von der Temperatur für den gesamten Spektralbereich gleich 1:

$$\alpha(\lambda, T) \stackrel{!}{=} 1 \quad (2.6)$$

Mit Gleichung 2.6 folgt für den schwarzen Körper im Strahlungsgleichgewicht:

$$\alpha(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \stackrel{!}{=} 1 \quad (2.7)$$

Schwarze Körper können in der Realität nur über Hohlraumstrahler angenähert werden. Reale Körper besitzen einen Emissionsgrad kleiner 1. Sie werden in graue und selektive Strahler unterteilt. Ein grauer Strahler besitzt über seinen gesamten Wellenlängenbereich einen konstanten Emissionsgrad, der aber kleiner als 1 ist. Ein selektiver Strahler besitzt einen wellenlängenabhängigen Emissionsgrad, der kleiner als 1 ist. In Abbildung 2.7(a) sind alle drei Strahler schematisch dargestellt.



(a) Schematische Darstellung des Emissionsgrads in Abhängigkeit der Wellenlänge für schwarze, graue und selektive Strahler aus (Bernhard, 2014), S. 1184

(b) Reflexion, Emission und Transmission eines Messobjektes nach (Bernhard, 2014), S. 115

Abbildung 2.7: Strahlertypen, Strahlungsarten

2.3.2 Haupteinflüsse auf die Messung mit der Wärmebildkamera

Analog zu der auf den Körper eintreffenden Strahlung kann auch die vom Körper abgegebene Strahlung betrachtet werden. Die an der Wärmebildkamera registrierte Strahlung setzt sich aus der vom Messobjekt emittierten Strahlung, der vom Messobjekt reflektierten Strahlung und der vom Messobjekt durchgelassenen Strahlung zusammen (siehe Abbildung 2.7(b)).

$$\Phi_{Ges} = \varepsilon \cdot \Phi_M + \rho \cdot \Phi_U + \tau \cdot \Phi_U \quad (2.8)$$

Hierbei ist Φ_M die vom Messobjekt ausgehende Strahlungsleistung und Φ_U ist die von der Umgebung ausgehende Strahlungsleistung. Damit sind folgende Teilstrahlungsleistungen definiert:

- Die Eigenstrahlungsleistung $\varepsilon \cdot \Phi_M$, die durch die vom Messobjekts emittierte Strahlung verursacht wird
- Die Fremdstrahlungsleistung $\rho \cdot \Phi_U$, die durch die von der Umgebung am Messobjekt Richtung Wärmebildkamera reflektierte Strahlung verursacht wird
- Die Fremdstrahlungsleistung $\tau \cdot \Phi_U$, die durch die von der Umgebung am Messobjekt durchgelassen Strahlung verursacht wird

Wird die Fremdstrahlungsleistungen weiter zusammengefasst, ergibt sich die Formel (6.11):

$$\Phi_{Ges} = \varepsilon \cdot \Phi_M + (1 - \varepsilon) \cdot \Phi_U \quad (2.9)$$

Bei einem realen Objekt mit $\varepsilon < 1$, wird eine Fremdstrahlungsleistung $(1 - \varepsilon) \cdot \Phi_U$ registriert. Diese kann je nach Emissionsgrad und Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur T_U und der Messobjekttemperatur T_M eine Messabweichung verursachen. Für den Fall $T_U = T_M$ entsteht kein Fehler, da die Strahlungsleistungen Φ_M und Φ_U gleich sind. Mit steigender Differenz zwischen T_U und T_M aber auch durch einen sinkenden Emissionsgrad (für $T_U \neq T_M$), wird die Messabweichung größer. Für eine Messung mit einer möglichst hohen Messgenauigkeit ist es daher wichtig, den Emissionsgrad bei der zu untersuchenden Temperatur sowie die Umgebungstemperatur möglichst genau zu kennen. Sofern keine Emissionsgradkorrektur direkt an der Wärmebildkamera stattgefunden hat, kann mit Gleichung 2.10 die tatsächliche Messobjekttemperatur T_M bestimmt werden.

$$T_M = T_A \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon} - \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) \left(\frac{T_U}{T_A}\right)^4} \quad (2.10)$$

T_A ist die angezeigte Temperatur und T_U ist die Umgebungstemperatur (T_M , T_A und T_U in Kelvin). Des Weiteren müssen Einflüsse durch die Messtrecke und Störstrahlungsquellen beachtet werden. Durch Gase oder eine zu hohe Luftfeuchtigkeit kann es zu einer Verringerung des Transmissionsgrades der Übertragungsstrecke kommen. Dies führt zu Störreflexionen und somit zu Messabweichungen. Durch Objekte mit $T_{Objekt} \neq T_U$ (wie z.B. Heizungsrohre, Wärmequellen an Maschinen) kann eine Störstrahlung auftreten. Je nach Reflexionsgrad des Messobjektes kann dies einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Messung haben.

3 Teil I - Kalibrierung

3.1 Versuchsaufbau - Kalibrierung

Die beiden Kalibrieraufgaben finden am Metallblockkalibrator statt (siehe Abb. 3.1). Er besteht aus verschiedenen Fühlern, die über Anschlussklemmen an ein Messdatenerfassungssystem der Firma Agilent angeschlossen sind. Zur Temperierung ist der Einsatz-Kalibrator „Venus“ der Firma Isotech vorhanden. Die vorhandenen Einsätze sind ein Metallzylinder und eine Wassertripelpunktzelle. Der Pt100 Referenzfühler besitzt die Klasse

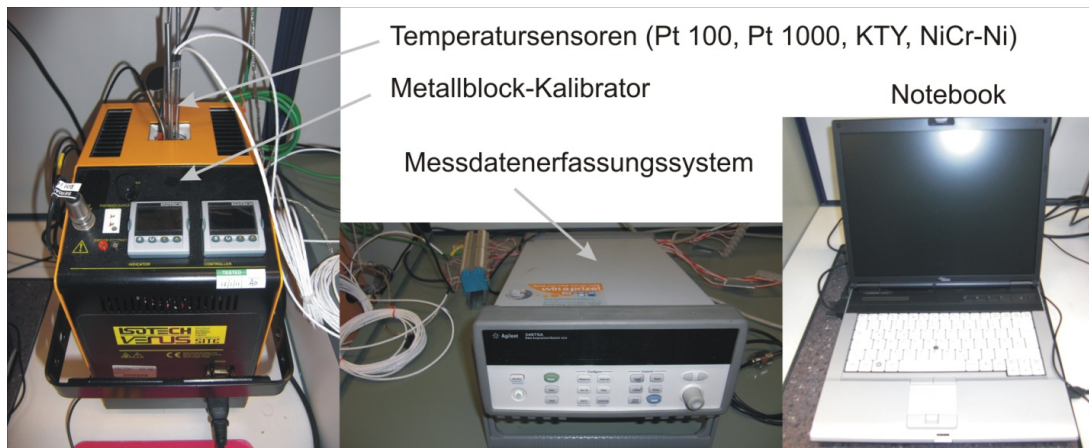


Abbildung 3.1: Aufbau des Temperaturfühler-Kalibrierstandes

AA nach DIN EN 60751:2009-05. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die verwendeten Fühler. Von links nach rechts sind der angeschlossene Kanal, das im Programm verwendete Kürzel, die vollständige Bezeichnung und die am Fühler aufgeklebte Nummer aufgeführt.

Tabelle 3.1: Verwendete Temperaturfühler im Praktikum

Kanal	Kürzel im Programm	Name	Aufgeklebte Nummer
1	Ref	Pt100 (Vierleiter) als Referenzsensor	1
2	P1	Pt100 (Vierleiter)	2
3	P2	Pt100 (Zweileiter)	3
4	P3	Pt1000 (Zweileiter)	4
5	KTY	KTY (Zweileiter)	5
6	NTC	NTC (Zweileiter)	6
7	TE	Thermoelement Typ K	7

Der Versuchsaufbau zur Kalibrierung der Temperatursensoren ist in Abb. 3.2 schematisch dargestellt. Als Temperatur-Referenz-Fühler (T_{ref}) für den Versuch dient ein Pt100 1/10 DIN Klasse B in Vierleiterschaltung (Kanal 1). Die zu kalibrierenden Temperatursensoren (NiCr-Ni, Pt100 in Zweileiterschaltung, Pt100 in Vierleiterschaltung, Pt1000, KTY) werden ebenso wie der Referenzfühler in das Kalibriervolumen (hier Metallblockeinsatz) gegeben. Die Datenaufnahme erfolgt mit Hilfe eines modularen Messdatenerfassungssystems (Firma AGILENT). Zur Messdatenvisualisierung und -speicherung ist das Messdatenerfassungssystem mit einem Notebook verbunden.

Bitte überprüfen Sie, ob der Temperaturfühler in dem Metallblockeinsatz komplett eingetaucht ist (**Vorsicht:** Der Metallblock könnte noch eine (deutlich) erhöhte Temperatur haben).

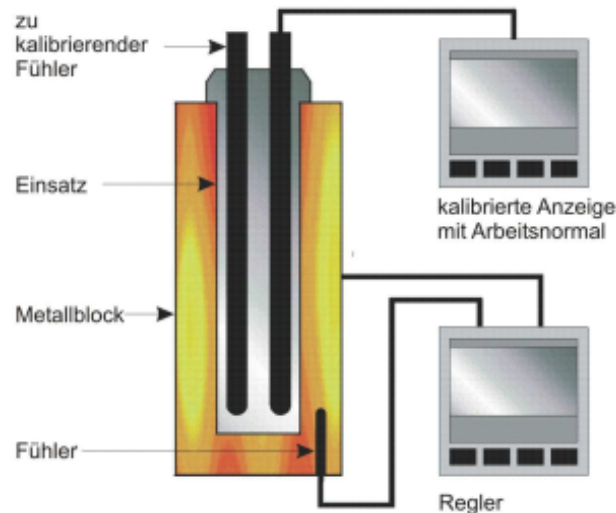


Abbildung 3.2: Schematischer Versuchsaufbau – Metallblockkalibrator, Quelle: www.klasmeier.com/blockkalibrator, Abruf 26.04.2016

3.2 Versuchsdurchführung - Kalibrierung

Sicherheitshinweis: Vorsicht bei höheren Temperaturen! Es besteht die Gefahr von Verbrennungen der Haut.

Fixpunktkalibrierung

Es wird zunächst der Referenzsensor (PT100 Vierleiter Schaltung) mithilfe einer Wasser-Tripelpunktzelle kalibriert. Diesen Referenzsensor benutzen Sie im nächsten Versuchsteil (Vergleichskalibrierung) als Referenz für die Kalibrierung von weiteren Sensoren.

Die Fixpunktkalibrierung des Referenzsensors wurde im Vorfeld bereits vom Laboringenieur vorbereitet. Die Wasser-Tripelpunktzelle ist in den Metallblock-Kalibrator eingesetzt und auf eine Temperatur von -6°C abgekühlt. Der Referenzsensor steckt in der dafür vorgesehenen Öffnung in der Tripelpunktzelle. Für einen besseren Wärmeübergang zwischen Tripelpunktzelle und Sensor wird ein Wasser/Alkohol-Gemisch genutzt.

- Starten Sie die Messdatenerfassung am Laptop mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Sekunde.

- Der Laboringenieur entnimmt den Referenzsensor und die Wasser-Tripelpunktzelle aus dem Metallblock-Kalibrator und initiiert den Kristallisationsvorgang.
- Nach Abschluss der Kristallisation platziert der Laboringenieur die Wasser-Tripelpunktzelle und den Referenzsensor zurück in den Metallblock-Kalibrator.
- Die Temperatur am Metallblock-Kalibrator wird nun vom Laboringenieur auf 0,01 °C eingestellt.
- Beobachten Sie den Temperaturverlauf des Referenzsensors auf dem Bildschirm.
- Nachdem die Temperatur stationär erscheint, warten Sie bitte noch eine Minute.
- Stoppen Sie dann die Messdatenerfassung und speichern Sie Ihre Daten ab. Legen Sie sich hierfür einen Dateiordner mit dem Namen Ihrer Gruppe auf dem Desktop an, in dem Sie auch Ihre Messdaten der folgenden Versuche abspeichern.

Vergleichskalibrierung

- Die bereitgestellten Sensoren sollen für einen Bereich von 0 bis 80 °C kalibriert werden. Legen Sie hierfür 4 sinnvolle Kalibrierpunkte fest.
- Setzen Sie bitte die zu kalibrierenden Sensoren in den Metallblock ein. Stellen Sie dabei sicher, dass alle Sensoren die gleiche Eintauchtiefe wie der Referenzsensor haben.
- Stellen Sie den Temperatur-Controller (rechte Anzeige) mit Hilfe der orangen Dreieck-Tasten auf die Temperatur des ersten Kalibrierpunktes ein.
- Starten Sie am Laptop die Messdatenerfassung mit einem Messintervall von 1 Sekunde und überprüfen Sie ob alle Sensoren logisch richtige Werte auf anzeigen.
- Beobachten Sie den Temperaturverlauf der Sensoren über die Zeit (Skalierung nicht zu groß, aber auch nicht zu klein wählen!). Sind alle Sensoren im quasistationären thermischen Gleichgewicht mit der Metallblocktemperatur, erfolgt nun eine Minute Messzeit.
- Stoppen Sie dann die Messung und speichern Sie die Daten in Ihrem Dateiordner ab. In der Auswertung berücksichtigen Sie bitte nur die letzten 60 Messwerte.

- Wiederholen Sie den Vorgang für die weiteren Kalibrierpunkte. Legen sie für jede der 4 Temperatur-Stufen eine separate Messdatei an.
- Nachdem Sie ihre Messungen beendet haben, stellen Sie bitte am Controller 20 °C ein und lassen das Gerät abkühlen.

3.3 Versuchsauswertung - Kalibrierung

- Legen Sie eine Excel-Tabelle an. Das Dokument sollte so aufgebaut sein, dass die importierten Rohdaten jeweils auf einem eigenen Tabellenblatt und die Ergebnisse zusammengefasst auf einem separaten Tabellenblatt dargestellt sind.
- Berechnen Sie aus den Ergebnissen der Fixpunktkalibrierung die Messabweichung des Referenzsensors. Legen Sie dazu eine Tabelle an, in der Sie die Temperatur des Tripelpunktes, den Mittelwert und die Standardabweichung des Referenzsensors sowie die Abweichung (Offset) angeben. Korrigieren Sie im Folgenden mit diesem Offset den Messwert des Referenzsensors.
- Stellen Sie die $R(T)$ -Verläufe der Widerstandssensoren dar. Geben Sie hierzu jeweils die korrigierte Referenztemperatur und die jeweiligen gemessenen Widerstände in einer Tabelle an und lassen Sie sich diese dann in einem Diagramm darstellen.
- Bestimmen Sie für jeden $R(T_{ref})$ -Verlauf die Kennlinie (z.B. mittels Trendlinien-Funktion). Benutzen Sie dabei sinnvolle Regressionsfunktionen.
- Erstellen Sie die $R(T_{ref})$ -Verläufe für die beiden identischen Pt100 Sensoren (Zweileiter, Vierleiter) mit gleicher Kabellänge. Vergleichen Sie die Kurvenverläufe und erklären Sie ggf. erkennbare Abweichungen.
- Schätzen Sie bitte die Länge des Kabels der Pt100 Sensoren auf Basis der Abweichung zwischen Zweileiter und Vierleiter ab. Nehmen Sie dabei einen spezifischen Widerstand einer Ader des Kabels mit $\rho = 0,0278 \, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ an (Annahme: temperaturunabhängig). Die Querschnittsfläche einer Ader beträgt $A = 0,1 \, \text{mm}^2$.
- Stellen Sie den $U(T_{ref})$ -Verlauf für das Thermoelement in einem Diagramm dar, mit der Referenz-Temperatur auf der x-Achse und der Spannung auf der y-Achse. Bestimmen Sie auch hier die Regressionsgerade und geben Sie die gefundene Formel im Diagramm an.

-
- Für welchen Einsatzbereich favorisieren Sie die unterschiedlichen Widerstandssensoren/Messschaltungen?
 - Welchen Sensor würden Sie für eine lange zweiadrige Messleitung auswählen und warum?

Hinweis: Die Excel-Tabelle soll zusammen mit dem Versuchsprotokoll abgegeben werden.

4 Teil II - Identifizierung von Temperatursensoren

Dieser Versuchsteil findet parallel zur Kalibrierung (Teil I) statt. Nutzen Sie die Wartezeiten während der einzelnen Kalibrierschritte (bis sich stationäre Zustände eingestellt haben) zur Identifizierung der Sensoren.

4.1 Versuchsaufbau - Identifizierung

Zur Identifizierung verschiedener Temperatursensoren stehen Ihnen ein Multimeter und sechs Temperatursensoren unbekannten Typs zur Verfügung. Hinweis: Bei einem der Sensoren handelt es sich um ein Thermoelement.

4.2 Durchführung - Identifizierung

- Identifizieren Sie zunächst das Thermoelement und dessen Typ.
- Sie haben mit Abbildung 5.2 ein Kennliniendiagramm gegeben. Benutzen Sie dieses um die restlichen Sensoren zu identifizieren. Achten Sie bei der Benutzung des Multimeters darauf, dass die richtige Messart und der richtige Anzeigebereich eingestellt ist.

4.3 Versuchsauswertung - Identifizierung

Geben Sie an, welche Sensoren Sie identifiziert haben. Beschreiben Sie ihr Vorgehensweise.

5 Teil III - Wärmebildkamera

5.1 Versuchsaufbau - Wärmebildkamera

Der Prüfstand mit Wärmebildkamera besteht aus der Wärmebildkamera E60 der Firma FLIR. Mit dieser werden die Temperaturen von Proben aus verschiedenen Materialien bestimmt, welche in einem Wasserbad auf 60 °C temperiert werden. Tabelle 5.1 führt die vorhandenen Proben auf. Die Proben 3 und 5 besitzen einen schwarzen Messpunkt mit bekanntem Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,95$.



Abbildung 5.1: Aufbau des Wärmebildkamera Prüfstandes

Tabelle 5.1: Verwendete Temperaturfühler im Praktikum

Nr.	Bezeichnung	Gruppe	Messpunkt
1	Alu. silber eloxiert	Metall	Nein
2	Kupfer glänzend	Metall	Nein
3	POM weiß	Kunststoff	Ja
4	Alu. rau	Metall	Nein
5	Alu. glänzend	Metall	Ja
6	POM schwarz	Kunststoff	Nein

5.2 Versuchsdurchführung - Wärmebildkamera

- Schalten Sie die Wärmebildkamera ein.
- Analysieren Sie die Messszene: Notieren Sie sich Auffälligkeiten. Gehen Sie dabei auf den angezeigten Temperaturunterschied (ungefähr abgeschätzt anhand der Skalierung) zwischen Proben und Messpunkten ein, sowie die Temperaturunterschiede der Metallproben zueinander und der Kunststoffproben zueinander.
- Nehmen Sie nun die Kamera vom Stativ und variieren Sie Abstand und Winkel der Kamera. Beobachten Sie welche Faktoren die Messung beeinflussen und notieren Sie Ihre Beobachtungen.
- Bestimmen Sie nun die Temperaturen der Proben sowie die der Messpunkte. Halten Sie die Kamera hierfür möglichst senkrecht in einem Abstand von ca. 1 m über die Proben. Fokussieren Sie mit dem Fadenkreuz der Wärmebildkamera die jeweilige Probe und lesen die angezeigte Temperatur ab.
- Notieren Sie die aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Proben- und der Messpunkt-Temperaturen sowie die Raumtemperatur.
- Messen Sie abschließend mit Hilfe eines Oberflächensensors die Temperaturen der Proben (berührende Temperaturmessung) und notieren Sie die Messwerte.

5.3 Versuchsauswertung - Wärmebildkamera

- Beschreiben Sie die Auffälligkeiten bei der ersten Beurteilung der Messszene.
- Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen bei der Variation von Abstand und Winkel. Treffen Sie Aussagen über mögliche Einflussfaktoren auf die Messung mit der Wärmebildkamera.
- Wenn Sie Schwierigkeiten bei der Bestimmung einiger Proben-Temperaturen und Messpunkt-Temperaturen hatten, beschreiben Sie diese. Mit welchen Effekten können diese zusammenhängen?
- Geben Sie an, was beim Messpunkt auf Probe 3 zu sehen war. Welche Abweichungen konnten Sie zwischen Probe 3 und 6 feststellen unter der Berücksichtigung, dass die Kamera einen Messfehler von $\pm 2^\circ\text{C}$ besitzt. Was sagt Ihnen das über den Einfluss der Farbe bei POM auf den Emissionsgrad?

- Diskutieren Sie die unterschiedlichen Messergebnisse der Wärmebild-Kamera für die beiden Messpunkte auf den Proben 3 und 5. Berücksichtigen Sie dabei die mit dem Oberflächensensor gemessenen Temperaturen.
- Nehmen Sie die Messwerte des Oberflächensensors als “wahre Temperaturen“ an. Berechnen Sie nun die Emissionsgrade aller Proben. Stellen Sie hierfür die Formel (2.10) nach ε um.

Literaturverzeichnis

- BERNHARD, F. 2014. *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg.
- NAU, M. 2004. *Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*. Jumo GmbH u. Co. KG.
- SCHREIER, N., WAGNER, A., ORTHS, R., & ROTARIUS, T. 2002. *So baue ich eine Solaranlage. Handbuch für Technik, Planung und Montage*. Wagner & Co Verlag.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kalibrierhierarchie Temperatursensoren	5
2.2	Temperaturfixpunkte bzw. Tripelpunkte	6
2.3	Thermokreis	10
2.4	Aufbau metallischer Leiter und Ladungsverschiebung bei Wärmezufuhr . .	11
2.5	Thermokreis mit Anschlussleitung	11
2.6	Strahlungstemperaturmessung an einem Schwarzen Strahler	14
2.7	Strahlertypen, Strahlungsarten	16
3.1	Aufbau des Temperaturfühler-Kalibrierstandes	18
3.2	Schematischer Versuchsaufbau Metallblockkalibrator	19
5.1	Aufbau des Wärmebildkamera Prüfstandes	23
5.2	Kennliniendiagramm verschiedener Widerstandssensoren	27

Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzabweichungen von Pt-Widerstandsthermometern	9
-----	--	---

2.2	Gängige Thermoelemente und deren Fabcodes	12
3.1	Verwendete Temperaturfühler im Praktikum	18
5.1	Verwendete Temperaturfühler im Praktikum	23
5.2	Spannungstabelle für Thermoelemente Typ K	27
5.3	Widerstandstabelle KTY Silizium-Temperatursensor	28
5.4	Widerstandstabelle für Pt-1000 Sensoren	28
5.5	Widerstandstabelle für Pt-100 Sensoren	29

Anhang

Mögliche Anschlussfehler von Thermoelementen und ihre Auswirkungen

- Anzeige stimmt dem Betrag nach, hat aber negatives Vorzeichen:
Polarität am Anzeigegerät vertauscht.
- Deutlich zu hohe oder zu niedrige Anzeige:
 - a) Falsche Linearisierung im Anzeigegerät.
 - b) Verpolt angeschlossen
- Anzeige um einen festen Betrag zu hoch oder zu niedrig: Falsche Vergleichsstellentemperatur.
- Anzeige korrekt, aber driftet langsam: Vergleichsstellentemperatur nicht konstant oder nicht separat erfasst.
Messpunkt noch nicht im thermischen Gleichgewicht.
- Anzeige um ca. 20 bis 25 °C falsch: Die Vergleichsstellentemperatur ist die Raumtemperatur oder Geräte-Anschlussstemperatur, nicht 0 °C.

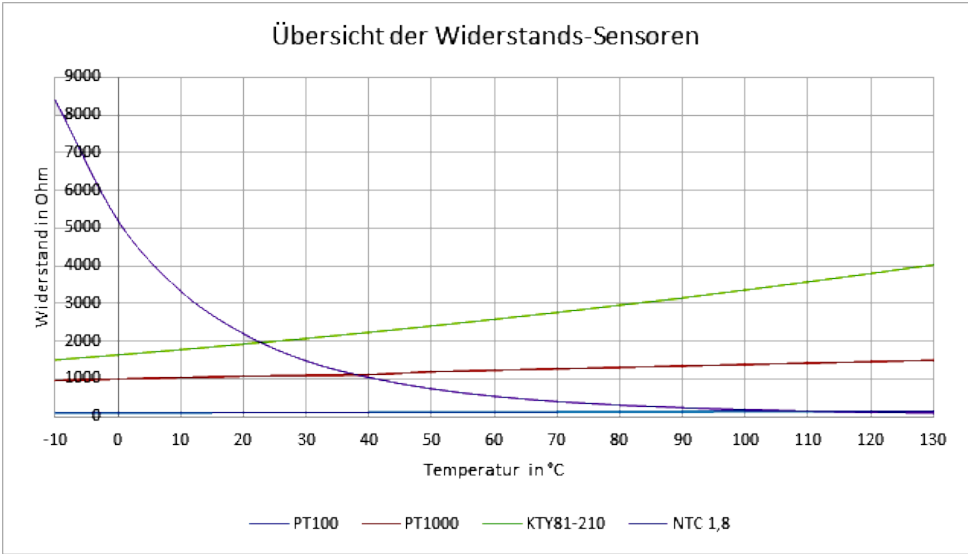


Abbildung 5.2: Kennliniendiagramm verschiedener Widerstandssensoren

Tabelle 5.2: Spannungstabelle für Thermoelemente Typ K

Temperaturbereich: -100..1370 °C; EPHY-MESS GmbH
alle Spannungswerte in μV , Vergleichstellentemperatur: 0 °C

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-40	-1527	-1490	-1453	-1417	-1380	-1343	-1305	-1268	-1231	-1194	-1156
-30	-1156	-1119	-1081	-1043	-1006	-968	-930	-892	-854	-816	-778
-20	-778	-739	-701	-663	-624	-586	-547	-508	-470	-431	-392
-10	-392	-353	-314	-275	-236	-197	-157	-118	-79	-39	0
0	0	39	79	119	158	198	238	277	317	357	397
10	397	437	477	517	557	597	637	677	718	758	798
20	798	838	879	919	960	1000	1041	1081	1122	1163	1203
30	1203	1244	1285	1326	1366	1407	1448	1489	1530	1571	1612
40	1612	1653	1694	1735	1776	1817	1858	1899	1941	1982	2023
50	2023	2064	2106	2147	2188	2230	2271	2312	2354	2395	2436
60	2436	2478	2519	2561	2602	2644	2685	2727	2768	2810	2851
70	2851	2893	2934	2976	3017	3059	3100	3142	3184	3225	3267
80	3267	3308	3350	3391	3433	3474	3516	3557	3599	3640	3682
90	3682	3723	3765	3806	3848	3889	3931	3972	4013	4055	4096
100	4096	4138	4179	4220	4262	4303	4344	4385	4427	4468	4509
110	4509	4550	4591	4633	4674	4715	4756	4797	4838	4879	4920
120	4920	4961	5002	5043	5084	5124	5165	5206	5247	5288	5328

Bsp.-Wert: Eine Temperaturdifferenz von 107 K liefert 4385 μV

Tabelle 5.3: Widerstandstabelle KTY Silizium-Tempersensor

T in °C	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
R in Ω	1459	1525	1592	1661	1732	1805	1879	1956	2035	2115	2197	2282
T in °C	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
R in Ω	2368	2456	2546	2638	2732	2828	2925	3025	3126	3230	3335	
Toleranz Fühler = $\pm 1\%$ vom Widerstandswert												

Tabelle 5.4: Widerstandstabelle für Pt-1000 Sensoren ähnlich DIN EN 60751 (ITS68)

Temperaturbereich: -200..850 °C; EPHY-MESS GmbH

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-40	842,71	846,66	850,62	854,57	858,53	862,48	866,43	870,38	874,33	878,27	882,22
-30	882,22	886,16	890,10	894,04	897,99	901,92	905,86	909,80	913,73	917,67	921,60
-20	921,60	925,53	929,46	933,39	937,32	941,24	945,17	949,09	953,02	956,94	960,86
-10	960,86	964,78	968,70	972,61	976,53	980,44	984,36	988,27	992,18	996,09	1000,00
0	1000,00	1003,91	1007,81	1011,72	1015,62	1019,53	1023,43	1027,33	1031,23	1035,13	1039,03
10	1039,03	1042,92	1046,82	1050,71	1054,60	1058,50	1062,39	1066,27	1070,16	1074,05	1077,94
20	1077,94	1081,82	1085,70	1089,59	1093,47	1097,35	1101,23	1105,10	1108,98	1112,86	1116,73
30	1116,73	1120,60	1124,47	1128,35	1132,22	1136,08	1139,95	1143,82	1147,68	1151,55	1155,41
40	1155,41	1159,27	1163,13	1166,99	1170,85	1174,70	1178,56	1182,41	1186,27	1190,12	1193,97
50	1193,97	1197,82	1201,67	1205,52	1209,36	1213,21	1217,05	1220,90	1224,74	1228,58	1232,42
60	1232,42	1236,26	1240,10	1243,93	1247,77	1251,60	1255,43	1259,26	1263,09	1266,92	1270,75
70	1270,75	1274,58	1278,40	1282,23	1286,05	1289,87	1293,70	1297,52	1301,33	1305,15	1308,97
80	1308,97	1312,78	1316,60	1320,41	1324,22	1328,03	1331,84	1335,65	1339,46	1343,26	1347,07
90	1347,07	1350,87	1354,68	1358,48	1362,28	1366,08	1369,88	1373,67	1377,47	1381,26	1385,06
100	1385,06	1388,85	1392,64	1396,43	1400,22	1404,01	1407,79	1411,58	1415,36	1419,14	1422,93
110	1422,93	1426,71	1430,49	1434,26	1438,04	1441,82	1445,59	1449,37	1453,14	1456,91	1460,68
120	1460,68	1464,45	1468,22	1471,98	1475,75	1479,51	1483,28	1487,04	1490,80	1494,56	1498,32

Bsp.-Wert: Für eine Temperatur von 107 °C ergeben sich 1407,79 Ω

Tabelle 5.5: Widerstandstabelle für Pt-100 Sensoren gem. DIN EN 60751 (ITS68)

Temperaturbereich: -200..850 °C; EPHY-MESS GmbH

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-40	84,27	84,67	85,06	85,46	85,85	86,25	86,64	87,04	87,43	87,83	88,22
-30	88,22	88,62	89,01	89,40	89,80	90,19	90,59	90,98	91,37	91,77	92,16
-20	92,16	92,55	92,95	93,34	93,73	94,12	94,52	94,91	95,30	95,69	96,09
-10	96,09	96,48	96,87	97,26	97,65	98,04	98,44	98,83	99,22	99,61	100,00
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51	103,9
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40	107,79
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29	111,67
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15	115,54
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01	119,4
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86	123,24
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69	127,08
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52	130,9
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33	134,71
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13	138,51
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,4	140,78	141,16	141,54	141,91	142,29
110	142,29	142,67	143,05	143,43	143,80	144,18	144,56	144,94	145,31	145,69	146,07
120	146,07	146,44	146,82	147,20	147,57	147,95	148,33	148,70	149,08	149,46	149,83

Bsp.-Wert: Für eine Temperatur von 107 °C ergeben sich 140,78 Ω