

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

Universität Kassel

Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

Inhaltsverzeichnis

1	Temperaturmessung	3
1.1	Lernziele	4
1.2	Grundlagen - allgemein	4
1.3	Grundlagen - Berührende Temperaturmessung	6
1.3.1	Metall-Widerstandsthermometer	7
1.3.2	Halbleiter-Widerstandsthermometer	9
1.3.3	Thermoelemente	9
1.3.4	Kalibrierung von Widerstandsthermometern und Thermoelementen	12
1.4	Teil I - Metallblockkalibrator	13
1.4.1	Metallblockkalibrator-Prüfstand	13
1.4.2	Versuchsaufbau - Metallblockkalibrator	13
1.4.3	Durchführung - Metallblockkalibrator	15
1.4.4	Auswertung - Metallblockkalibrator	17
1.5	Grundlagen - Berührungslose Temperaturmessung	18
1.5.1	Wichtige Begriffe und Definitionen	19
1.5.2	Haupteinflüsse auf die Messung mit der Wärmebildkamera	20
1.6	Teil II - Wärmebildkamera	22
1.6.1	Wärmebildkamera-Prüfstand	22
1.6.2	Durchführung - Wärmebildkamera-Messung	23
1.6.3	Auswertung - Wärmebildkamera-Messung	24
1.7	Keywords	24
	Literaturverzeichnis	25
	Anhang	26

1 Temperaturmessung

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 Speicherbe-
ladung.

1.1 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

1.2 Grundlagen - allgemein

Die Temperatur ist die am häufigsten gemessene technisch-physikalische Größe. Sie ist ein Maß für die durch Atombewegungen hervorgerufene sich in einem Körper befindende Energie. Damit verbunden ändern sich in Abhängigkeit der Temperatur eines Körpers praktisch alle seine mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften (z.B. sein Volumen, sein elektrischer Widerstand und seine abgegebene Strahlungsleistung). Diese verschiedenen temperaturabhängigen Effekte werden sich für die Temperaturmessung zunutze gemacht.

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, dass eine Messabweichung zu einer Referenz bestimmt und dokumentiert wird. Als Referenz werden so genannte “Normale” definiert, die in ihrer Hierarchie (siehe Abb. 1.1) letztendlich indirekt oder direkt auf das höchste Normal zurückgeführt werden.

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. 1.2(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

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

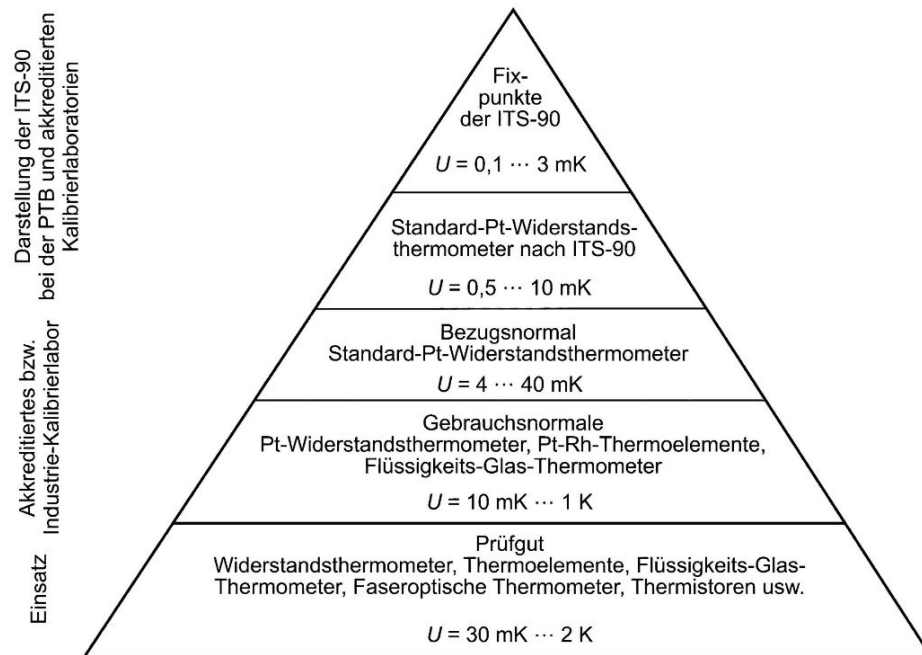


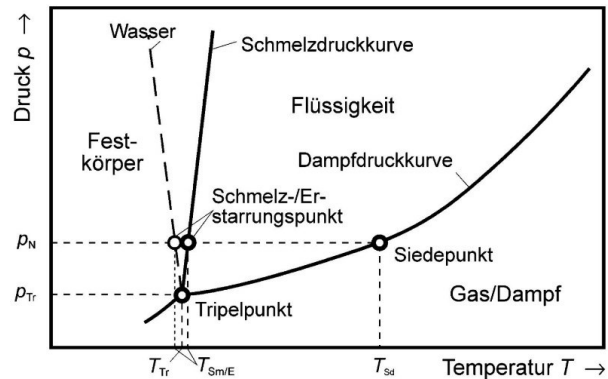
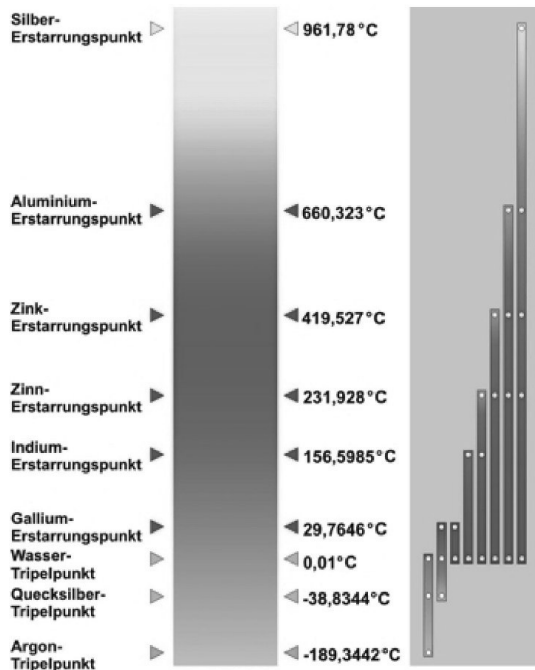
Abbildung 1.1: Kalibrierhierarchie im Temperaturbereich von $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit typisch erreichbaren Kalibrier- bzw. Messunsicherheiten U

und $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zu sehen in Abb. 1.2(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 Genauigkeit liegt bei $0,07\text{ mK}$. Dies macht den Wassertripelpunkt zum genauesten Fixpunkt der ITS-90. Erzeugt wird er in sogenannten Wassertripelpunktzellen.

Messverfahren

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



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

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

Abbildung 1.2: Temperaturnullpunkte bzw. Tripelpunkte

1.3 Grundlagen - 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.

1.3.1 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 temperaturunabhängig 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:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots) \quad (1.1)$$

$A \dots C$ 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, 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

Platin ist das am häufigsten eingesetzte Widerstandsmaterial in der industriellen Messtechnik. Es zeichnet sich durch seine hohe chemische Beständigkeit, seine vergleichsweise leichte Verarbeitbarkeit sowohl zu Draht- als auch zu (Dünn-)Schicht- oder Folien-Messwiderständen, 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 $-200 \dots 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in zwei Bereiche unterteilt ist.

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

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \quad (1.2)$$

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

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100 \text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot T^3] \quad (1.3)$$

Mit den Koeffizienten:

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

Weiterhin festgelegt sind die zulässige Grenzabweichung bedingt durch Herstellungstoleranzen. Die Platin-Widerstandsthermometer werden nach Klassen gemäß Tab. 1.1 eingeteilt.

Tabelle 1.1: Zulässige Grenzabweichung von Pt-Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751:2009:05 mit dem jeweiligen gültigen Temperaturbereich

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