

MESSEN VON STOFF- UND ENERGIESTRÖMEN

TEMPERATURMESSUNG / THERMOGRAPHIE

Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Wintersemester 2016/2017



umweltgerechte produkte und prozesse

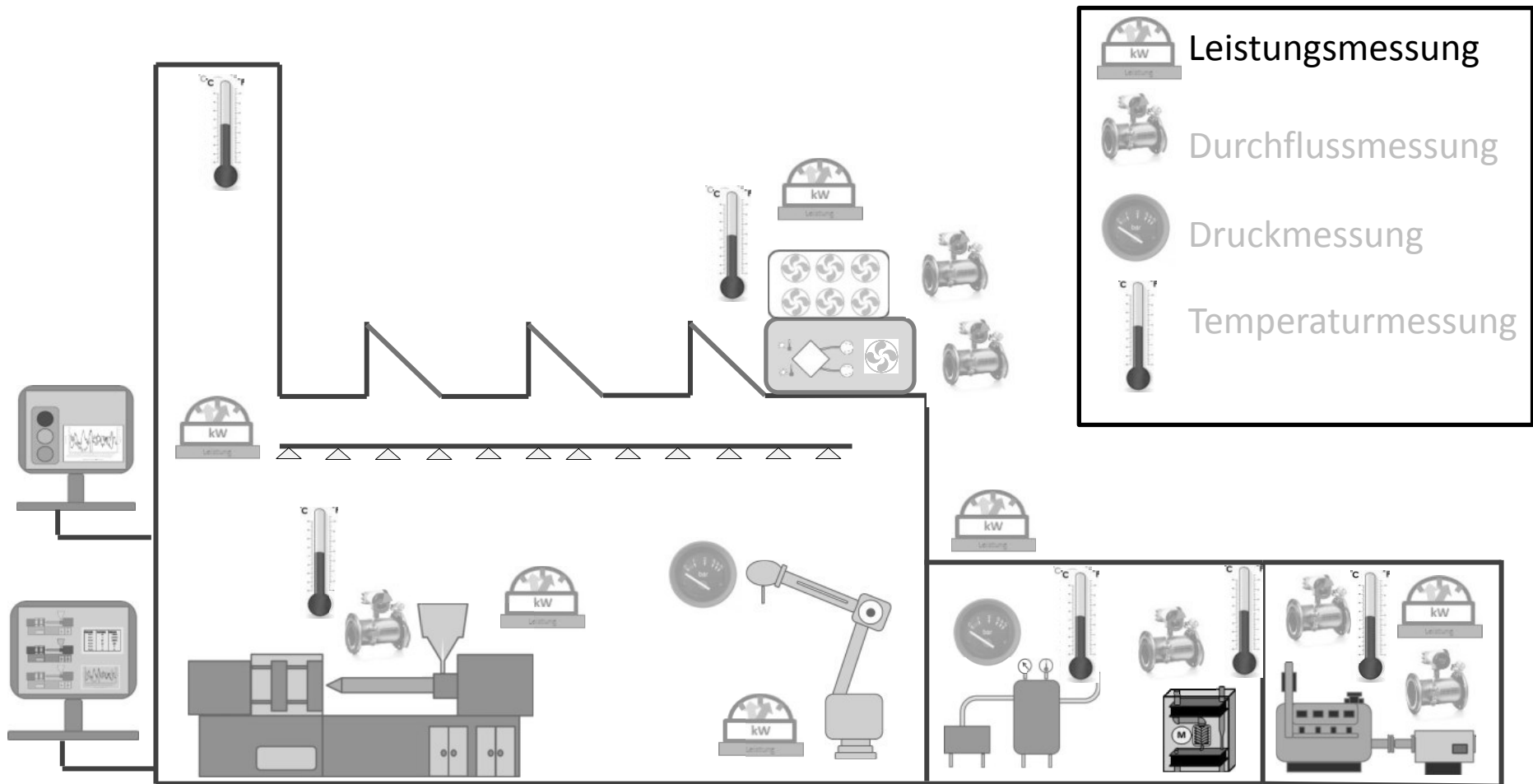
Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Inhalte der Vorlesung

- Historie / Einführung
- Grundlagen
- Berührungsthermometer
 - Mechanische Messverfahren
 - Widerstandsthermometer
 - Thermoelemente
- Strahlungsthermometer
- Anwendungsbeispiele

Messtechnik im Industriebetrieb

Temperaturmessung



Historie / Einführung

TEMPERATURMESSUNG

Bedeutung der Temperatur(-messung) in der Industrie

- Temperatur gilt allgemein als eine der wichtigsten und am häufigsten gemessenen technisch-physikalischen Größen
- Von ihr hängen viele andere Größen wie z.B. Länge, Volumen, Druck etc. ab
- Niedrige oder hohe Temperaturen lassen Prozesse langsam oder schnell ablaufen:
 - das Trocknen von Lacken,
 - Phasenumwandlungen in Werkstoffen,
 - chemische Reaktionen etc.

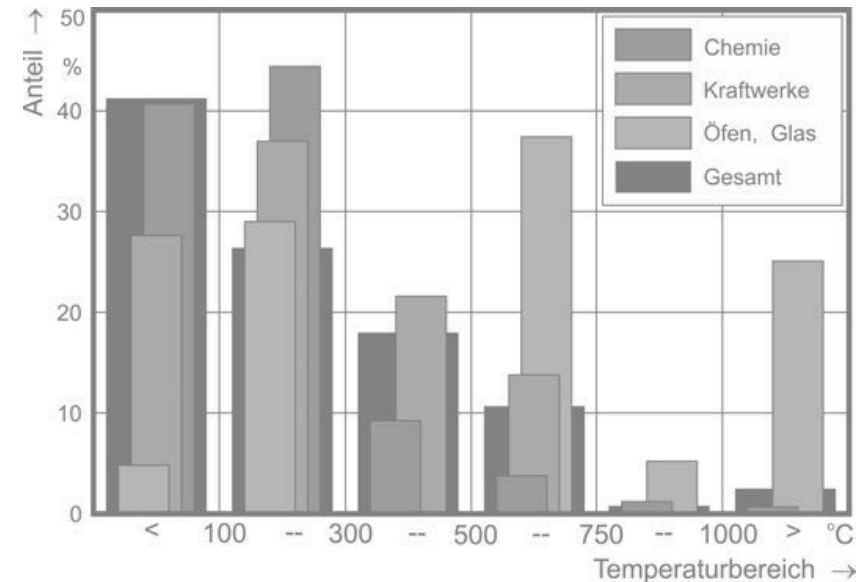
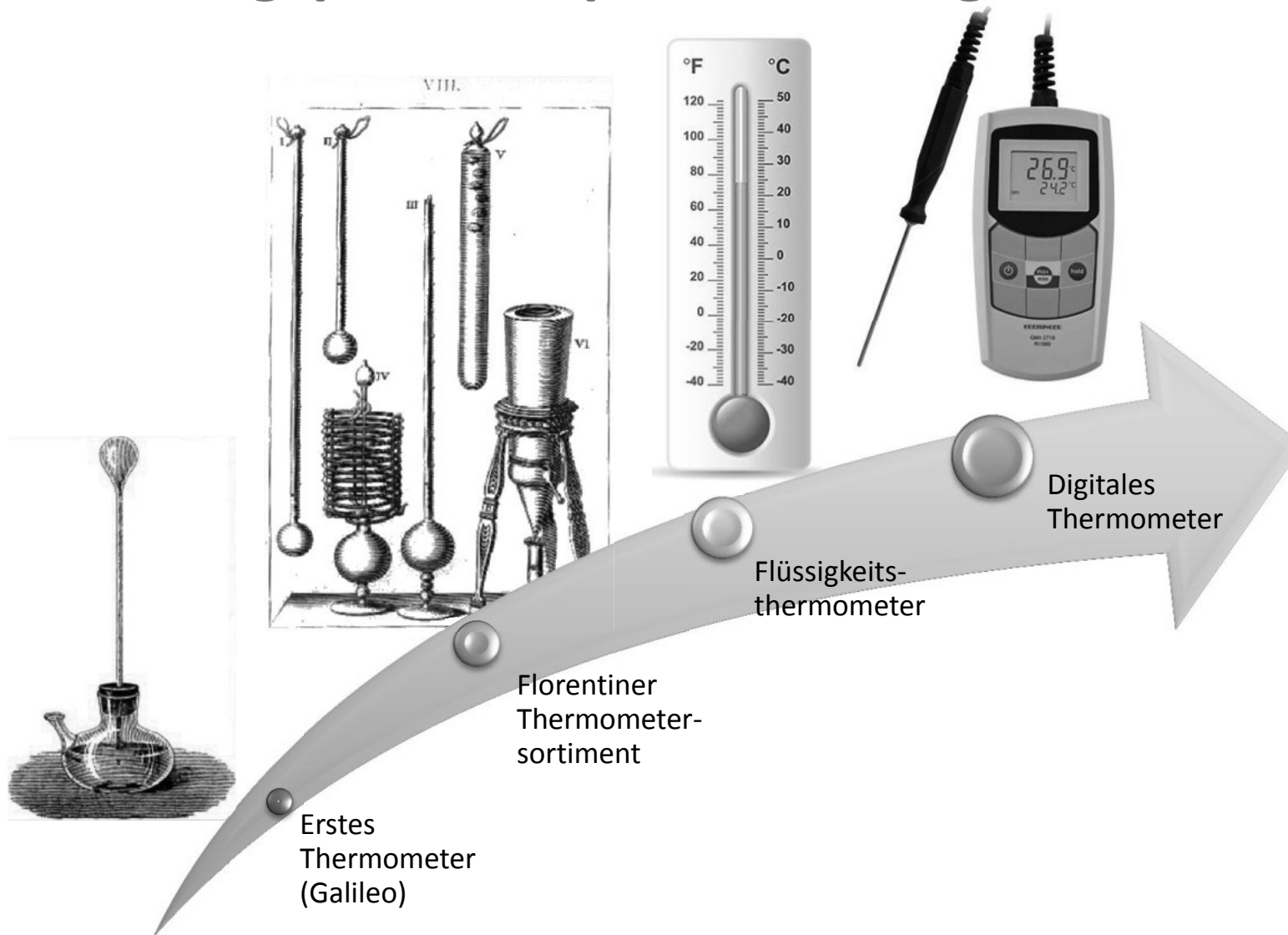


Abb.: Häufigkeit der Temperaturbereiche bei Temperaturmessungen in der Verfahrenstechnik

Quelle: Bernhard, Frank: Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, S.2

Entwicklungspfad Temperaturmessgeräte



Quellen: https://www.vde.com/de/ausschuesse/geschichte-elektrotechnik/documents/vortrag_irrgang.pdf, <http://images.iop.org/objects/ntw/news/14/6/11/pic1.jpg>, https://www.pce-instruments.com/deutsch/slot/1/artimg/large/ghm-messtechnik-gmbh-digitalthermometer-gmh-2710-mit-pt1000-fuehler-361100_819211.jpg

Grundlagen

TEMPERATURMESSUNG

Der Begriff der Temperatur

- Mit dem Begriff „Temperatur“ wird ein bestimmter thermischer Zustand eines Körpers beschrieben
- Thermodynamische Temperatur ist eine physikalische Zustandsgröße
- Eine der sieben Basisgrößen des int. universellen Größensystems mit dem Einheitensystem SI
- Einheit ist das Kelvin (K)
- Darstellung als Messgröße in der Form $T = \{T\} \cdot [T]$ als Produkt des Zahlenwertes $\{T\}$ und der Einheit $[T]$
- Temperatur ist eine intensive Größe

0. HS der Thermodynamik

- Die Temperatur unterschiedlicher Systeme hat den gleichen Wert, wenn sich diese im thermischen Gleichgewicht befinden
- Umgekehrt folgt, dass eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Körpern oder in einem Körper zu einem Wärmestrom führt

1. HS der Thermodynamik

- Nach dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre gilt für einen Carnot'schen Kreisprozess einer Wärmekraftmaschine:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

oder

$$Q_1 * T_1 = Q_2 * T_2$$

Größe	Beschreibung	Einheit
η	Wirkungsgrad des Systems	-
T_1	Temperatur des warmen Reservoirs	K
T_2	Temperatur des kalten Reservoirs	K
Q_1	Wärmemenge des Systems 1	J
Q_2	Wärmemenge des Systems 2	J

1. HS der Thermodynamik

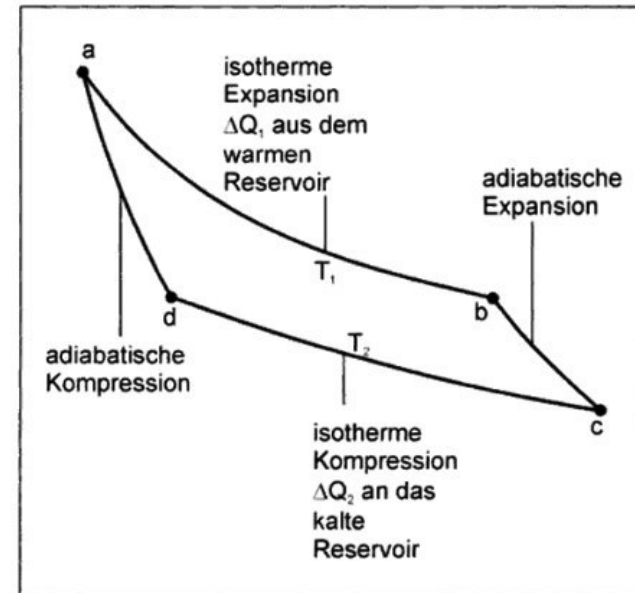
- Über die sog. Temperaturgleichung

$$Q_1 * T_1 = Q_2 * T_2$$

können mit Hilfe von Fixpunkten

Temperaturskalen erstellt werden.

- „Die Festlegung der Fixpunkte erfolgt auf der Grundlage bekannter Zusammenhänge des Druck-Temperatur-Diagrammes für Stoffe in den drei Aggregatzuständen gasförmig, flüssig, fest.“ (Quelle: Irrgang, K. et al. 2004, S.2)



Carnot-Prozess

Irrgang, K. et. Al. 2004, S.2

Temperatur und Wärme

Zusammenfassung

- Der Begriff „Temperatur“ ist unmittelbar an den Begriff "Wärmeenergie" gekoppelt
- Die Wärme ist ein Maß für die Energie im Inneren eines Körpers, welche durch die Bewegung seiner Atome erzeugt wird
- Zwei gleichartige Körper speichern den gleichen Betrag an Wärmeenergie, wenn sie die selbe Temperatur aufweisen
- Um an beiden Körpern dieselbe Erhöhung der Temperatur zu verursachen, muss beiden dieselbe Wärmeenergie zugeführt werden

Temperaturen von Objekten

>1.000.000 °C	Sonnenkorona
30.000 °C	Chromosphäre der Sonne
7.000 °C	Erdkern
6.000 °C	Oberfläche der Sonne
3.000 °C	Flamme eines Schweißbrenners (Acetylen und Sauerstoff)
2.500 °C	Glühdrähte der Lampen
950 °C	Flamme eines Gasherdes
800 °C	Streichholzflamme
ca. 230 °C	Bügeleisen (Einstellung: Leinen)
36–37 °C	Körpertemperatur eines gesunden Menschen
-78,5 °C	Trockeneis (gefrorenes CO ₂)
-273,15 °C	absoluter Nullpunkt

Formen des Wärmetransportes

Wärmeübertragung durch Transmission

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T$$

Für eine ebene Platte gilt:

$$\frac{1}{U * A} = \frac{1}{\alpha_i * A} + \frac{s}{\lambda * A} + \frac{1}{\alpha_a * A}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
\dot{Q}	Wärmestrom	W
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(K*m ²)
A	Fläche	M ²
ΔT	Temperaturdifferenz	K
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(K*m ²)
s	Wanddicke	m
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(K*m ²)

Formen des Wärmetransportes

Wärmeübertragung durch Konvektion

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T$$

$$\dot{Q} = \dot{m} * r$$

- Die spezifische Wärmekapazität c_p gibt an, welche Wärmemenge einem Kilogramm eines Stoffes zugeführt werden muss, um die Temperatur des Stoffes um ein Kelvin zu erhöhen

Größe	Beschreibung	Einheit
\dot{Q}	Wärmestrom	W
c_p	Wärmekapazität	kJ/(kg*K)
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
ΔT	Temperaturdifferenz	K
r	Verdampfungsenthalpie	J/kg

Formen des Wärmetransportes

Wärmeübertragung durch Strahlung

$$\dot{Q} = \varepsilon * \sigma * A * (T_0^4 - T_{sky}^4)$$

Größe	Beschreibung	Einheit
\dot{Q}	Wärmestrom	W
ε	Emissionsfaktor	-
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8}$)	W/(m ² K ⁴)
A	Fläche	m ²
T_{sky}	Strahlungsaustauschtemperatur	K

Allgemeines zum Thema Wärmestrahlung

- Bei Wärmestrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung, in einem Wellenlängenbereich von ca. $0,1 \mu\text{m} < \lambda < 1000 \mu\text{m}$
- Bei üblichen Temperaturen liegt das Strahlungsmaximum im infraroten Wellenlängenbereich
- Wärmestrahlung wird von jedem Festkörper/Flüssigkeit/Plasma/genügend großer Gasmasse mit einer Temperatur von über 0 Kelvin (thermisch erregter Zustand) emittiert
- Elektromagnetische Wellen, die auf einen Körper auftreffen, werden von diesem je nach Eigenschaften teilweise reflektiert, durchgelassen oder absorbiert. Es gilt entsprechend:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Größe	Beschreibung	Einheit
α	Absorptionsgrad	-
ρ	Reflektionsgrad	-
τ	Transmissionsgrad	-

Kirchhoff'sches Gesetz

- Ein sogenannter „schwarzer Körper“ ist in der Lage, bei einer bestimmten Temperatur Strahlen mit maximaler Intensität auszusenden
- Der **Emissionsgrad** ϵ eines Körpers gibt an, wie viel Strahlung er abgibt
- Für einen idealen Strahler gilt:

$$\epsilon = 1 \quad \rightarrow \quad \alpha = 1 \quad \rightarrow \quad \text{„schwarzer Körper“}$$

- Das **Kirchhoff'sche Gesetz** sagt aus, dass das Emissionsverhältnis ϵ eines schwarzen Körpers gleich seines Absorptionsverhältnisses α ist

$$\epsilon = \alpha$$

- Der Emissionsgrad eines realen Körpers ist das Verhältnis der Strahlungsintensität eines realen Körpers bei einer bestimmten Temperatur, verglichen mit der Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur

Prinzipielle Einteilung der Temperatur-Messverfahren

- Direkte Messung
- Indirekte Messung
- Primäre und sekundäre Temperaturmessverfahren
- Unmittelbare Temperaturmessung
- Mittelbare Temperaturmessung

Einteilung der Temperaturmessverfahren

Direkte Messung

- Quantitativer Vergleich der (analogen) Messgröße X_M mit bekannter Größe X_N gleicher Art
- **Ziel:** den Zahlenwert $\{X_M\}$ der Größe X_M bezogen auf deren Einheit $[X]$ zu bestimmen

Dazu muss:

1. Die Vergleichsgröße X_N hinreichend feinstufig einstellbar sein (nur über additive extensive Größen)
 2. Die Gleichheit von Mess- und Vergleichsgröße oder das Vorzeichen ihrer Differenz mit einem Indikator feststellbar sein (z.B. mit Wärmestromsensor)
- Prinzipiell nicht möglich

Indirekte Messung

- Gemäß den Erkenntnissen zur direkten Messung ist eine Temperaturmessung immer mit einer Messgrößenwandlung verbunden

Einteilung der Temperatur-Messverfahren

Primäre Temperaturmessverfahren

- Wandlung der Messgröße Temperatur T in primäre Abbildungsgröße X_A erfolgt über nur mit natürlichen Konstanten ausdrückbare physikalische Beziehung, ohne die Verwendung stoff- oder temperaturabhängiger Parameter
- **Beispiele:** - Gasthermometer konstanten Volumens auf der Basis der Zustandsgleichung für ideale Gase
- die Strahlungstemperaturmessung nach dem Planck'schen Gesetz
- Sehr aufwändig, nur unter idealen Bedingungen

Sekundäre Temperaturmessverfahren

- Kennlinie $X_A(T)$ des Temperaturmessverfahrens bzw. des Temperatursensors ist durch eine Kalibrierung an Fixpunkten der Internationalen Temperaturskala ITS-90 oder durch einen Vergleich mit Normalthermometern experimentell zu ermitteln

Einteilung der Temperatur-Messverfahren

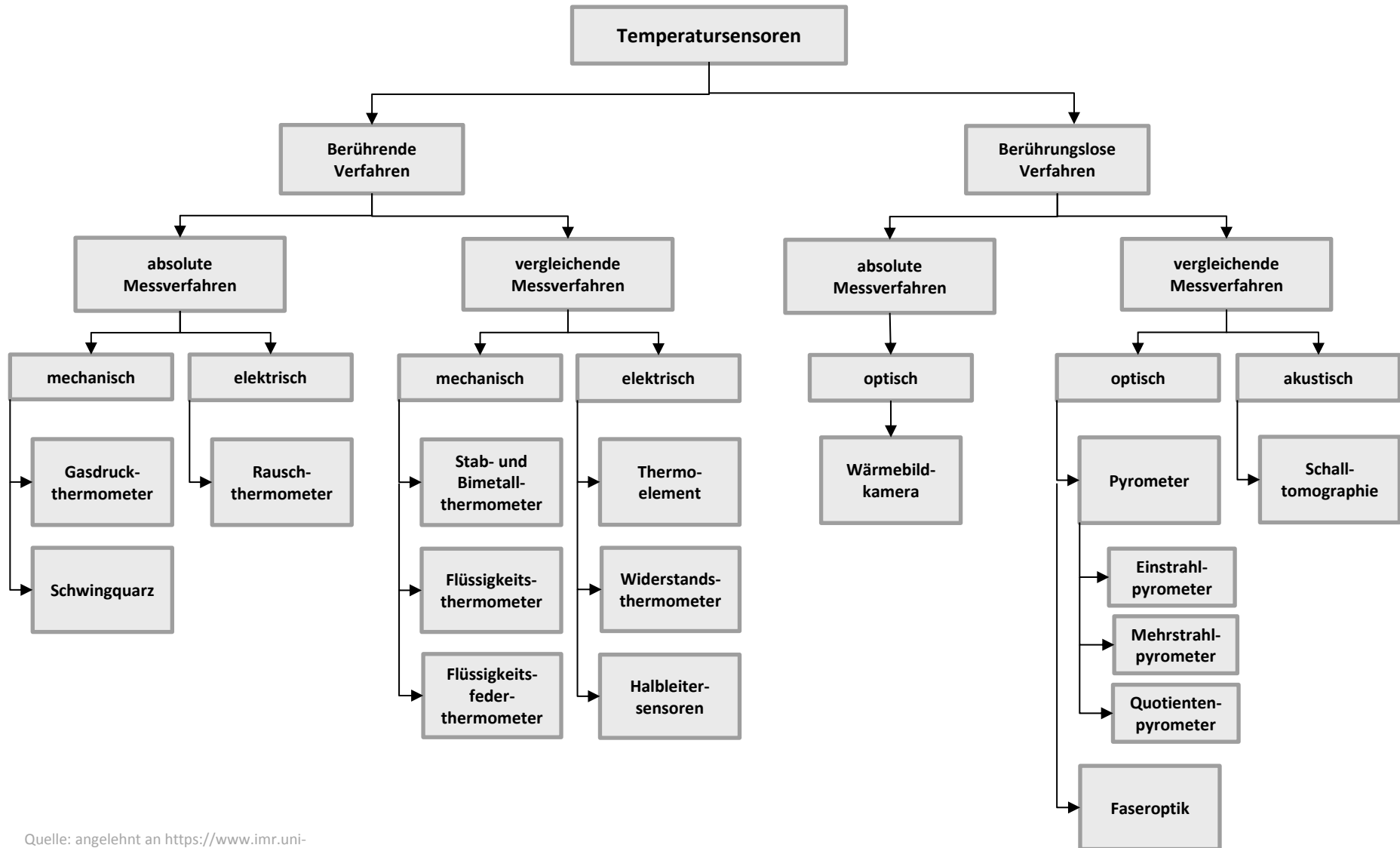
Unmittelbare Temperaturmessung

- die Messgrößenwandlung findet bereits im ersten Glied der Messkette, im Messobjekt statt
- **Beispiele:** - Bestimmung einer Gastemperatur aus der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit in dem Gas
- Messung der Temperatur von Kabeln oder Wicklungen elektrischer Maschinen über deren temperaturabhängigen elektrischen Widerstand

Mittelbare Temperaturmessung

- ein Berührungsthermometer der Temperatur T_S wird mit einer ausreichend bekannten und stabilen Kennlinie $X_A(T_S)$ benutzt („foreign body sensor“)
- zur Temperaturmessung muss es über eine thermische Kopplung in ein Temperaturgleichgewicht mit dem Messobjekt der Temperatur T_M gebracht werden

Übersicht Temperatursensoren



Quelle: angelehnt an https://www.imr.uni-hannover.de/fileadmin/institut/Studium/Labore/IMR_AML2011_Skript.pdf

Übersicht Temperaturmesssensoren

Messbereich

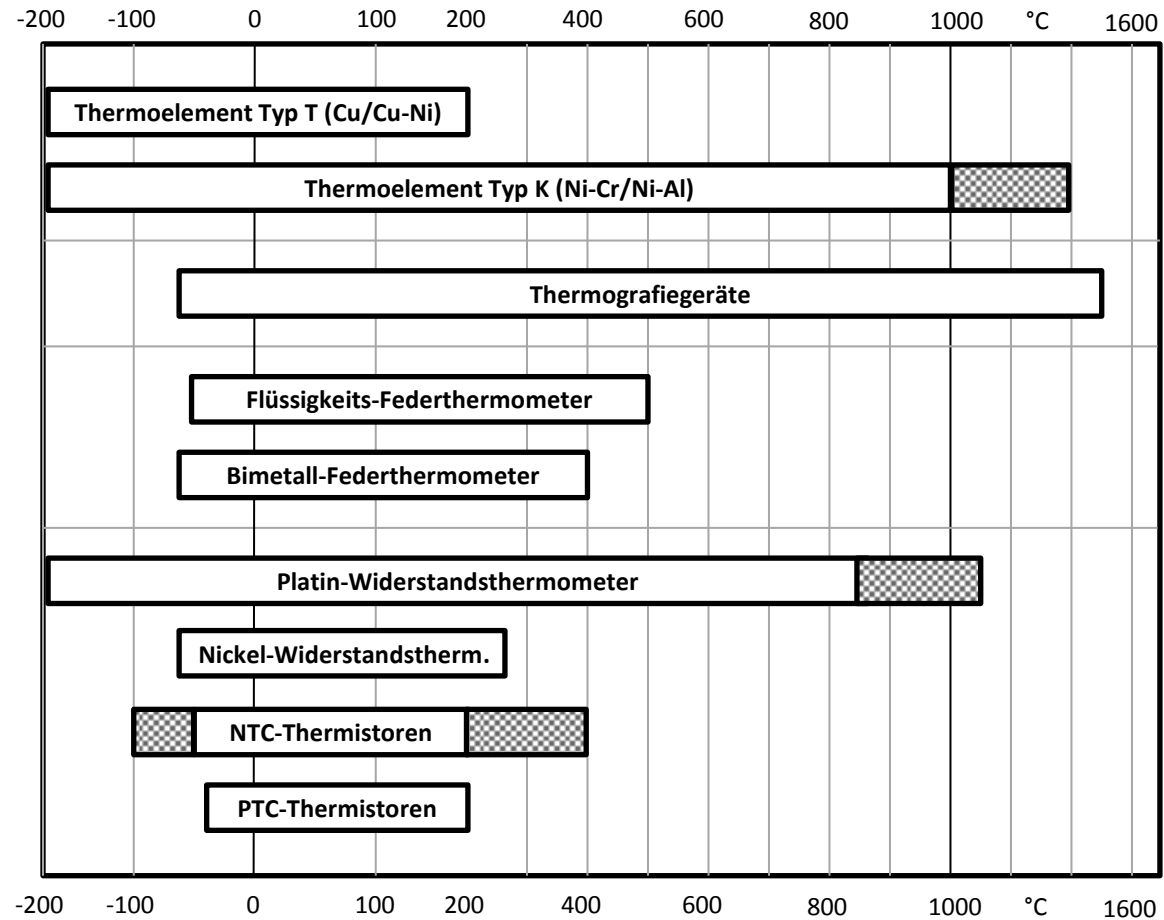


Abb.: Übersicht über technische Temperaturmessverfahren und ihre Temperaturmessbereiche

Quelle: angelehnt an Bernhard, Frank; Technische Temperaturmessung, Band III, Springer 2004, S.4

Wichtige Messverfahren für den industriellen Einsatz

Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe von wärmesensitiven Messgeräten

- **Mechanische Erfassung:**
 - Gas- oder Flüssigkeitsthermometer
 - Bimetallthermometer
 - Temperaturmessfarben
 - Seeger-Kegel Formkörper
- **Elektrische Erfassung:**
 - Resistive Temperatureaufnehmer
 - Thermoelemente
 - Rauschthermometer
- **Optische Erfassung**
 - Pyrometer
 - Wärmebildkamera
- **Akustische Erfassung**

Anwendung	Temperaturbereich in °C	Messunsicherheit in K
Stahlguss	1.400 – 1.700	1 – 5
Stahlvergütung	400 – 800	1 – 3
Kraftwerke	550 – 600	1
Kernkraftwerke	250 – 350	0,1 – 0,25
Chem. Reaktoren	200 – 350	0,3 – 1
Chemiefaser	200 – 250	0,3 – 0,5
Zuckerproduktion	100 – 125	0,1
Bioreaktoren	35 – 45	0,1
Heizung/Lüftung	-30 – 120	0,5
Wärmemengemessung	30 – 150	0,1 – 0,5
Kühltruhen	-30 – 0	0,5
Medizin	35 – 42	0,1

Allgemeine Anforderungen an die Messung

1. Bei kontaktierenden Sensoren muss der Sensor die zu messende Temperatur annehmen (Berührthermometer messen nur ihre eigene Temperatur).
2. Die Herstellung des thermodynamischen Gleichgewichts erfordert einen Energieaustausch und beansprucht hierfür Zeit. Damit ist festgelegt, wann der Sensor die richtige Temperatur anzeigt bzw. welche Messabweichung zu erwarten ist.
3. Sofern die Wärmekapazität des Sensors gegenüber der des Messobjekts nicht vernachlässigt werden darf, kann der Sensor dessen Temperatur auch verändern.
4. Die Sensoren führen i.d.R. über ihre Zuleitungen Wärmeenergie nach außen ab und verändern so die Temperatur des Messobjektes.

Stand der Technik

TEMPERATURMESSUNG

MECHANISCHE MESSVERFAHREN

Volumen- und Längenänderung

- Messprinzipien beruhen auf der Tatsache, dass bei den meisten Substanzen das Volumen bzw. die Länge mit zunehmender Temperatur monoton steigt
- **Ausnahme:** z.B. Dichteanomalie des Wassers bei 4 °C
- In Flüssigkeitsthermometern kann die Volumenzunahme der Arbeitsflüssigkeit an einem Steigrohr beobachtet werden
- für das Volumen V gilt näherungsweise:

$$V(T) = V(T_0) * [1 + \gamma(T - T_0) + \dots]$$

Größe	Beschreibung	Einheit
T_0	Bezugstemperatur, für die das gemessene Volumen $V(T_0)$ bzw. die Länge $x(T_0)$ des Sensormaterials bekannt ist	K
γ	thermischer Volumenausdehnungskoeffizient	m ³ /K

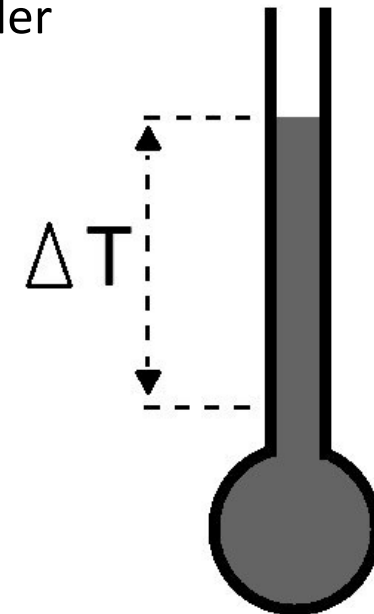


Abb.: Flüssigkeitsthermometer

Volumen- und Längenänderung

- Bei Bimetallthermometern sind zwei Metalle mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten miteinander verschweißt; Temperaturänderungen bewirken so eine messbare Durchbiegung

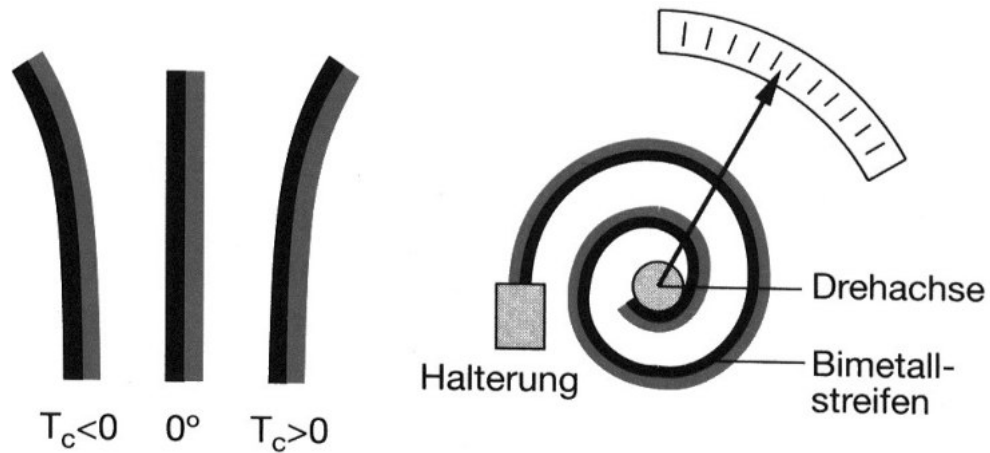


Abb.: Bimetallthermometer

Quelle: <http://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/Images/Bimetall-rwth-aachen.jpg>

- Für die Länge X gilt näherungsweise: $x(T) = x(T_0) * [1 + \alpha(T - T_0) + \dots]$

Größe	Beschreibung	Einheit
T_0	Bezugstemperatur, für die das gemessene Volumen $V(T_0)$ bzw. die Länge $x(T_0)$ des Sensormaterials bekannt ist	K
α	thermischer Längen- Ausdehnungskoeffizient	m/K

WIDERSTANDSTHERMOMETER

Widerstandsthermometer

- Abhängigkeit des elektr. Widerstands eines Leiters oder Halbleiters von der Temperatur
- Einsatz metallischer Widerstände, deren Widerstand gut reproduzierbar mit der Temperatur ansteigt (Platin und Nickel)
- Mit entsprechendem Aufwand lassen sich Temperaturen mit einer relativen Unsicherheit von nur 10^{-4} bestimmen

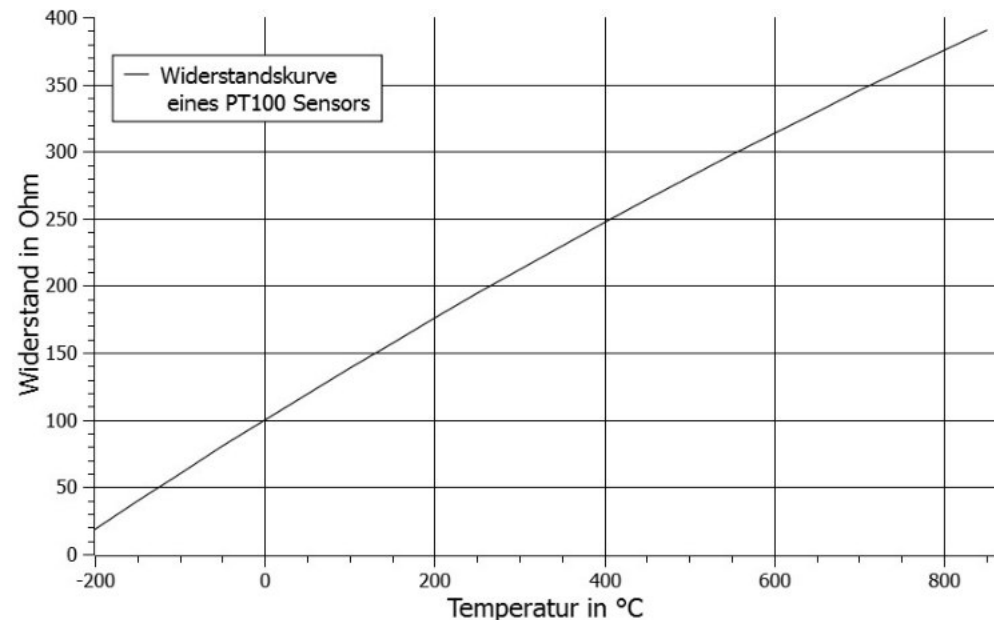


Abb.: Widerstand/Temperatur-Diagramm

Daten aus: www.ces.karlsruhe.de/culm/culm/culm2/th_messtechnik/sensoren/pt100.xls

Temperaturabhängigkeit

- Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur kann beschrieben werden durch:

$$R(T) = R_0 * [1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots]$$

- In der Regel genügt es, in der Nähe der Bezugstemperatur von einer linearen Näherung auszugehen:

$$R(T) = R_0 * (1 + \alpha' T)$$

$$\alpha' = \frac{R(T = 100^\circ\text{C}) - R(T = 0^\circ\text{C})}{R(T = 0^\circ\text{C}) * 100^\circ\text{C}}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
α	linearer thermischer Widerstandskoeffizient	1/K
α'	mittlerer Temperaturbeiwert	1/K
β	quadratischer thermischer Widerstandskoeffizient	1/K ²
R	Widerstand	Ω
T	Temperatur	K

Halbleiter- Widerstände

- Neben Metall-Widerstandsthermometern werden auch temperaturabhängige Halbleiter-Widerstände verwendet
- Diese haben einen höheren Temperaturbeiwert
- Unterschieden werden Halbleiterwiderstände
 - mit *positivem* Temperaturkoeffizienten PTC und
 - mit *negativem* Temperaturkoeffizienten NTC
- HNTC werden für den Hochtemperaturbereich eingesetzt

Widerstandverläufe

- PTC- Widerstände weisen zumeist nur geringe Stabilität bzw. Wiederholpräzision auf und sind nur in einem kleinen Messbereich einsetzbar
- zu beachten ist der nichtlineare Verlauf bei PTC, NTC und HNTC
- für Temperaturbereiche, in denen die Kennlinien eine geringe Steigung aufweisen, sind die betreffenden Typen nicht zur Temperaturmessung geeignet

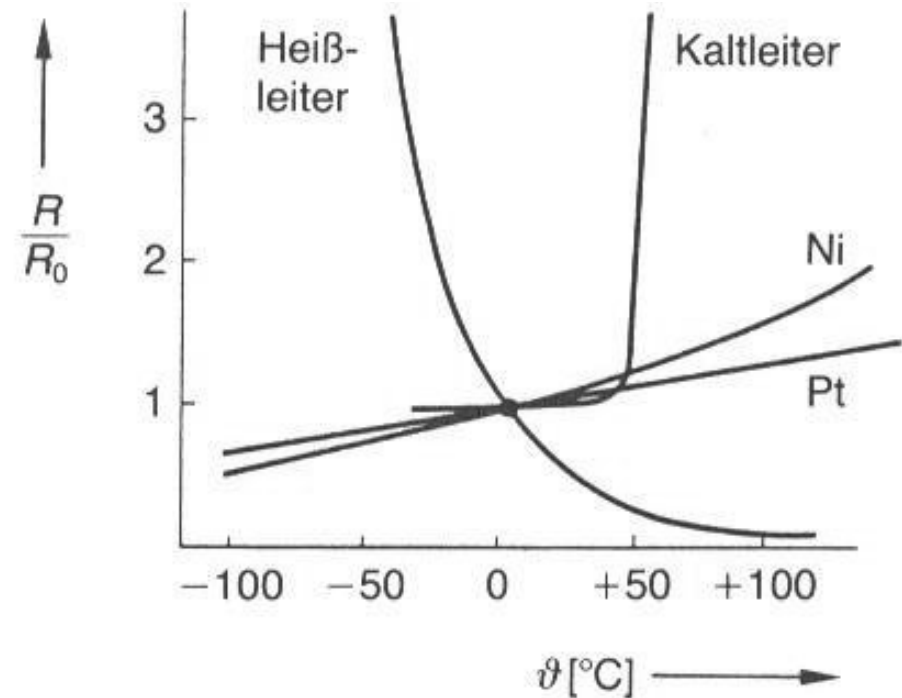


Abb.: Kennlinien von Heißleitern, Kaltleitern und Metallen

Quelle: <http://www.umnicom.de/Elektronik/Sonstiges/Messtechnik/tmKap2/tmKap223/Bild0246.gif>

Messwiderstand

- der temperaturempfindliche Widerstand wird in Form einer Messwicklung auf einen geeigneten Träger aufgebracht
- diese Messwicklung wird entweder in Glas eingeschmolzen oder in eine keramische Masse eingebettet
- dünnste Platinschichten werden anstelle von Drähten auf ein Keramiksubstrat aufgebracht

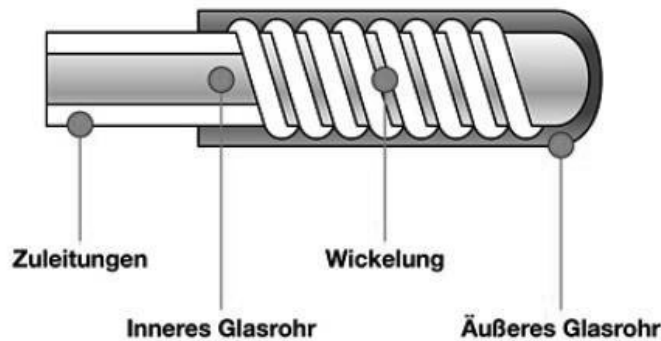


Abb.: Gewickelter Messwiderstand in Glasrohr

Quelle: <http://www.guenther.eu/techn-informationen/widerstandsthermometer/2-gewickelte->

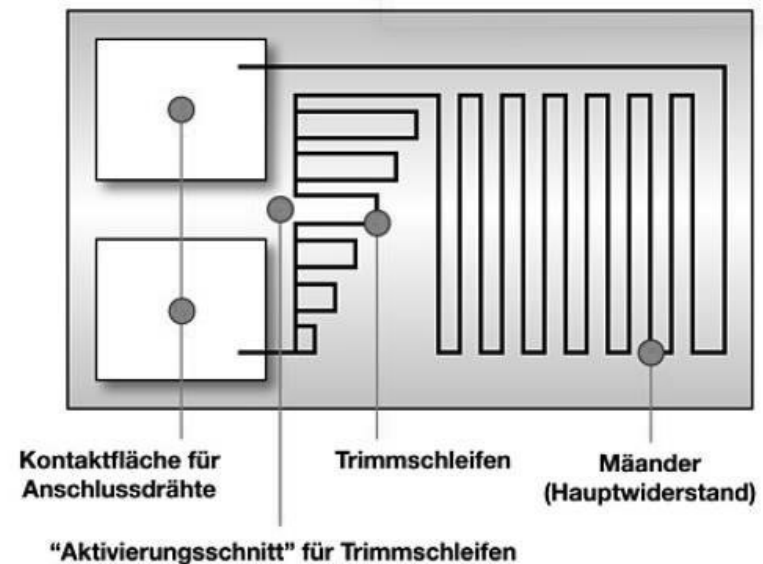


Abb.: Messwiderstand auf Keramikträger

Quelle: <http://www.guenther.eu/techn-informationen/widerstandsthermometer/4-messwiderstaende-auf-keramiktraeger>

Zweileiterschaltung

- Die Verbindung zwischen Auswertelektronik und Messwiderstand erfolgt mit einer zweiadrigen Leitung
- Der elektrische Widerstand der Leitung addiert sich zum Widerstand des Messfühlers, was von der Elektronik als höhere Temperatur interpretiert wird
- Um diesen Fehler zu beheben, kompensiert man mit modernen Messumformern den Leitungswiderstand auf rechnerischem Weg

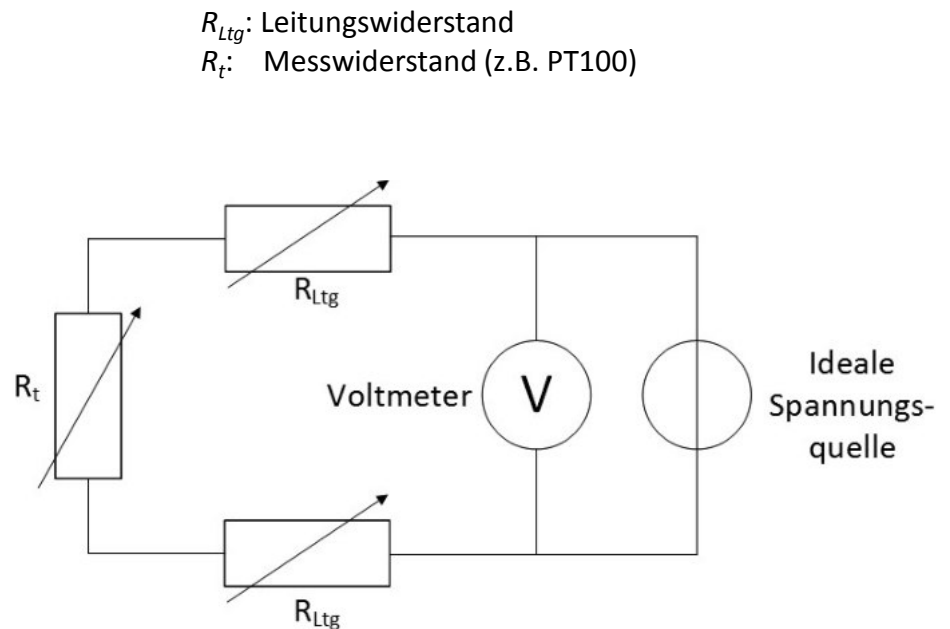


Abb.: Zweileiterschaltung

Quelle: <http://www.guenther.eu/techn-informationen/widerstandsthermometer/13-anschlussarten-von-messwiderstaenden>

Dreileiterschaltung

- Bei der Dreileiterschaltung wird ein zweiter Messkreis an den Messwiderstand angeschlossen
- Dieser stellt immer den aktuellen Leitungswiderstand dar und kann vom Messkreis mit dem Messwiderstand verrechnet werden um den tatsächlichen Messwiderstand zu berechnen
- Geringere Messabweichungen

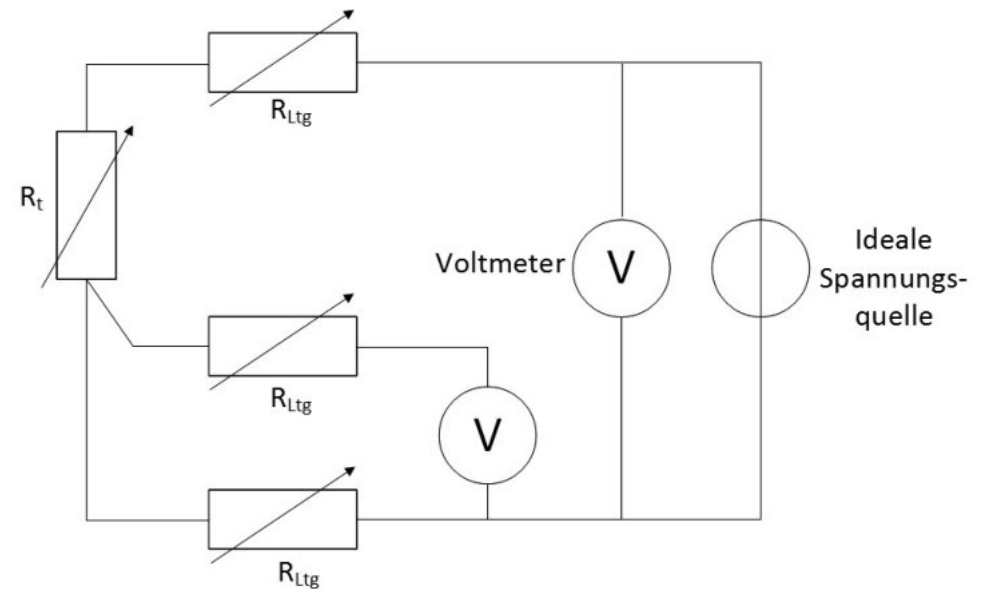


Abb.: Dreileiterschaltung

Quelle: <http://www.guenther.eu/techn-informationen/widerstandsthermometer/13-anschlussarten-von-messwiderstaenden>

Vierleiterschaltung

- Der Messwiderstand und das Messgerät verfügen über je vier Anschlüsse zur Widerstandsmessung
- Über zwei Leiter wird dem Widerstand ein konstanter Strom I aus dem Messgerät zugeführt
- Die anderen zwei Leiter dienen zur Messung des Spannungsabfalls ΔU am Widerstand

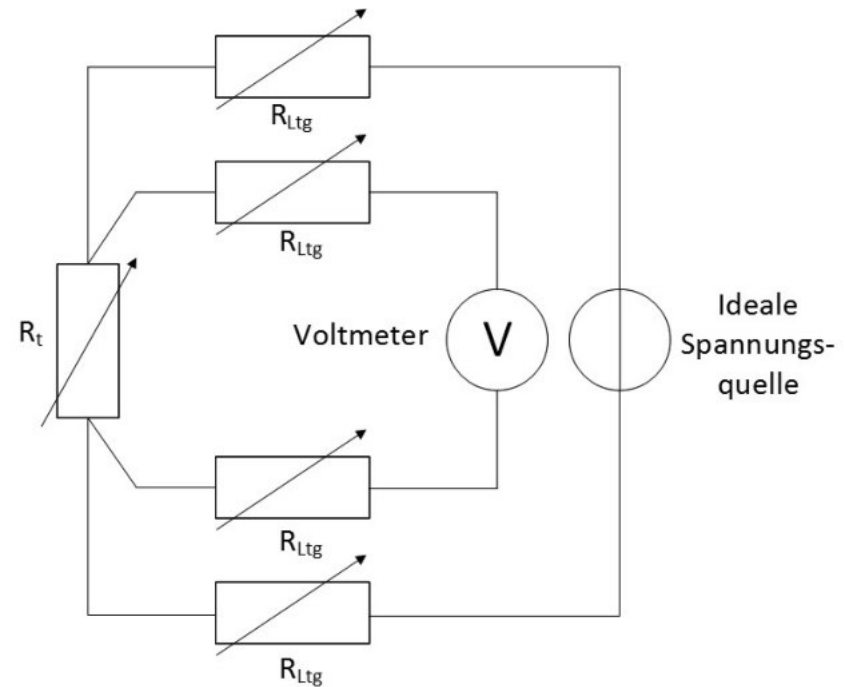


Abb.: Vierleiterschaltung

Quelle: <http://www.guenther.eu/techn-informationen/widerstandsthermometer/13-anschlussarten-von-messwiderstaenden>

Widerstandthermometer

Vor- und Nachteile

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Einsatzfähigkeit in hohen Temperaturbereichen	<ul style="list-style-type: none">• Lange Antwortzeiten
<ul style="list-style-type: none">• Langzeitstabilität	<ul style="list-style-type: none">• Relativ teuer
<ul style="list-style-type: none">• Hohe Robustheit	<ul style="list-style-type: none">• Nicht für Oberflächentemperaturmessung geeignet
<ul style="list-style-type: none">• Hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Messungen	
<ul style="list-style-type: none">• Keine Vergleichsstelle erforderlich	<ul style="list-style-type: none">• Selbsterwärmung muss berücksichtigt werden

Quelle: <http://www.inelektro.de/Grundlagen/Messgrossen/Temperatur/temperatur.html>

THERMOELEMENTE

Thermospannung

- Es werden zwei verschiedene Metalle A und B miteinander in Kontakt gebracht (z.B. geschweißt)
- Elektronen wandern vom Metall A mit der kleineren Elektronenaustrittsarbeit auf das Metall B mit der größeren Elektronenaustrittsarbeit
- Somit lädt sich Metall A gegenüber Metall B positiv auf
- Die in der Berührungsschicht entstehende Thermospannung steigt mit der Temperatur an

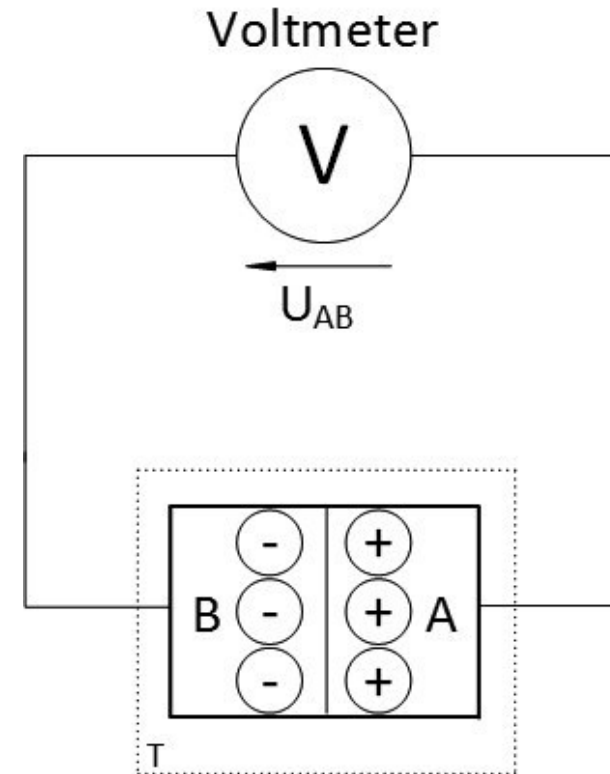


Abb.: Ladungsverschiebung zwischen zwei Metallen

Messaufbau

- Die Kontaktstelle der beiden Leiter A und B befindet sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Messobjekt
- Eine zweite Kontaktstelle (gleiche Leitermaterialien) befindet sich auf einem Temperaturniveau T_0
- Das Temperaturniveau T_0 ist bekannt

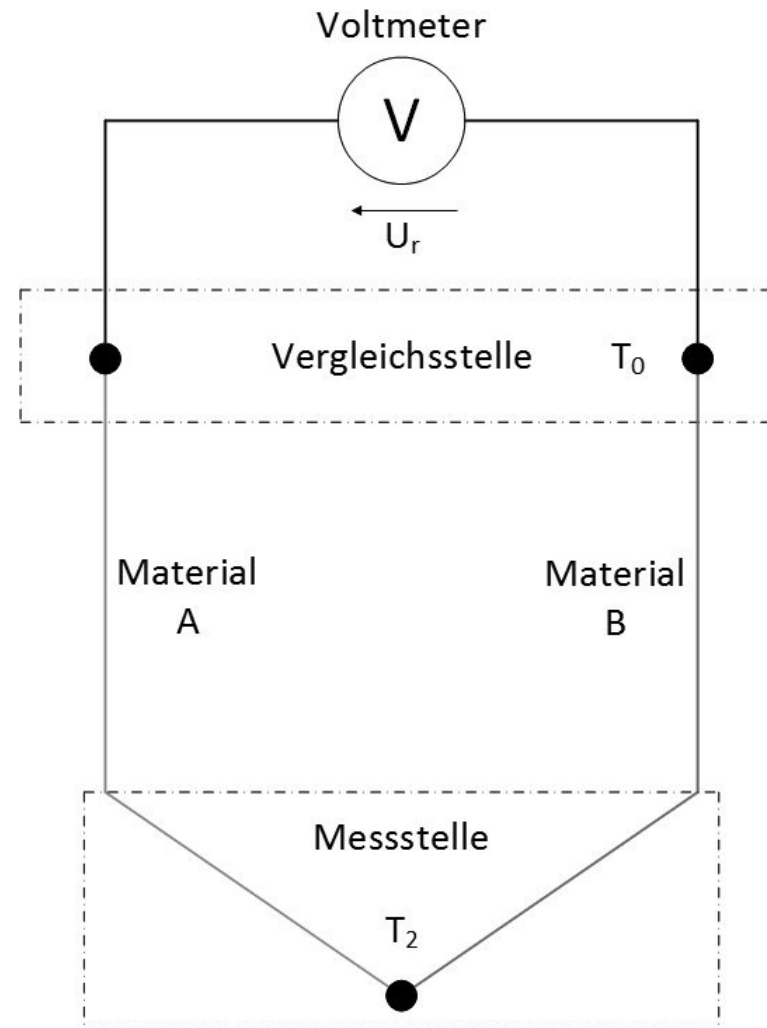


Abb.: Aufbau eines Thermoelements

Quelle: Parthier 2004, S. 60

Messung der Thermospannung

- Die Spannung ΔU , die sich z.B. mit einem Multimeter messen lässt, ergibt sich unter Anwendung der Maschenregel zu:

$$\Delta U + U_{ACu}(T_2) + U_{AB}(T_1) - U_{AB}(T_0) - U_{ACu}(T_2) = 0$$

- Man erkennt, dass die Thermospannungen, die beim Übergang zu den Kupferleitungen entstehen, sich kompensieren, sofern diese Klemmstellen dieselbe Temperatur T_2 aufweisen
- Für die zu messende Spannung gilt schließlich:

$$\Delta U = U_{AB}(T_0) - U_{AB}(T_1)$$

Spannungsreihe

- Alle leitenden Materialien können in einer "thermo-elektrischen Spannungsreihe" geordnet werden
 - gibt an, welche Thermospannungsdifferenz ein Leiter mit einem Referenzleiter ausbildet, wenn eine Kontaktstelle 0 °C und die andere 100 °C aufweist
- Als Referenzmaterial wird häufig Kupfer, Blei oder Platin angegeben

Material	Thermospannung in mV
Germanium	+29,7
Eisen	+1,34
Zink	+0,03
Kupfer	0
Gold	-0,01
Blei	-0,26
Aluminium	-0,32
Platin	-0,59
Quecksilber	-0,6
Kalium	-1,43
Nickel	-2,04

Tabelle: Spannungsreihe bezogen auf Cu

Bewährte Metallkombinationen für TE

Thermoelementpaar	Typ	Temperaturbereich	Temperaturspannungskoeffizient	
Platin-Platinrhodium (Pt-PtRh)	R,S	0 bis 1300°C	$k = \frac{0,634mV}{100K}$	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr genau und reproduzierbar - Relativ beständig gegen Oxidation und Korrosion in höheren Temperaturbereichen - Relativ teuer
Kupfer-Konstantan (Cu-CuNi)	T	-250 bis 400°C	$k = \frac{4,25mV}{100K}$	<ul style="list-style-type: none"> - Schlechte Linearität - Cu bei höheren Temperaturen nicht beständig gegen Luftsauerstoff
Eisen-Konstantan (Fe-CuNi)	J	-250 bis 700°C	$k = \frac{5,37mV}{100K}$	<ul style="list-style-type: none"> - Fe ist stark korrosionsanfällig - Keine zeitliche Konstanz der thermoelektrischen Eigenschaften
Nickelchrom-Nickel-Aluminium (NiCr-NiAl)	K	-200 bis 1000°C	$k = \frac{4,1mV}{100K}$	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ genau und beständig - Ausreichende Linearität - Verzunderung durch Oxidation ab 600°C

Thermoelemente

Vor- und Nachteile

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Weiter Temperaturbereich von -200 °C bis über 1000 °C	<ul style="list-style-type: none">• Kleine Spannungen
<ul style="list-style-type: none">• schnelle Ansprechzeiten	<ul style="list-style-type: none">• Ausgleichsleitungen erforderlich
<ul style="list-style-type: none">• kleine Bauformen, einfache Herstellung	<ul style="list-style-type: none">• Nichtlineare Kennlinie
<ul style="list-style-type: none">• extreme Erschütterungsfestigkeit	<ul style="list-style-type: none">• Komplexe Signalaufbereitung
<ul style="list-style-type: none">• hohe Robustheit	<ul style="list-style-type: none">→ sehr zeitaufwendig→ viele Fehlerquellen

Quelle: http://www.carl-engler-schule.de/culm/culm/culm2/th_messtechnik/sensoren/thermoelement.pdf

Exkurs

KALIBRIERUNG

Vergleichstemperatur

- Soll nicht eine Temperaturdifferenz, sondern "nur" die Temperatur einer Messstelle bestimmt werden, muss die zweite Temperatur künstlich geschaffen werden
- Die Vergleichstellentemperatur sollte zweckmäßigerweise konstant sein, damit aus der gemessenen Temperaturdifferenz ($T_{Mess} - T_{Vergl}$) die gesuchte Temperatur T_{Mess} leicht errechnet werden kann
- Häufig verwendet: 0 °C (Eispunkt)

Kalibrierung

Kalibrierung an Fixpunkten

- Nur für Pt-Widerstandsthermometer
- Fixpunkte sind Phasengleichgewichte reiner Stoffe
- Vorgehen beschrieben in der ITS 90
- Sehr geringe Messunsicherheit (0,5 mK - 5 mK), aber aufwendig

Kalibrierung nach der Vergleichsmethode

- Die meisten Industrie/Thermofühler
- Prüfling mit Normalthermometer (Widerstandsthermometer) in Flüssigkeitsbad

Flüssigkeit	Temperaturbereich
Ethanol	von -100°C bis 0°C
Wasser	0°C bis 99°C
Silikonöl	50°C bis 250°C
Salzmischungen	180°C bis 630°C
Zinn	250°C bis 630°C

Abb.: Kalibrierung nach Vergleichsmethode

Quelle: <https://www.guenther.eu/techn-informationen/kalibrierung/grundlagen>

Kalibrierkurve

- Bei der Kalibrierung wird „der Zusammenhang zwischen den Messwerten und dem vereinbarten richtigen Wert der Messgröße ermittelt.“ (DIN 1319-1)
- Dieser Zusammenhang dient als Grundlage für die Erstellung einer Korrektionstabelle, die Ermittlung von Kalibrierfaktoren oder einer Kalibrierfunktion
- Bei der Kalibrierung erfolgt **kein** Eingriff, der das Messgerät verändert
- Um aus der gemessenen Thermospannung auf die Temperatur schließen zu können, ist eine Kalibrierkurve oder -tabelle notwendig

Kalibrierkurve

- Tabellen für die Beziehung zwischen Thermospannung und der Temperatur gibt es z.B. in der DIN EN 60584-1
- Liegt die erwünschte Messgenauigkeit innerhalb der Norm-Toleranzen, so ist die Norm verwendbar
- Wenn eine höhere Messgenauigkeit notwendig ist, muss eine entsprechende Kalibrierkurve erstellt werden

Grenzabweichung

- Die Einteilung der standardisierten Thermoelemente bezüglich der zulässigen **Grenzabweichungen** erfolgt in drei Klassen (**Toleranzen**) nach DIN EN 60584-2, wobei Klasse 1 die geringsten Grenzabweichungen erlaubt und Klasse 3 die größten
- Weiterhin werden die verschiedenen Thermoelementpaare in Typen aufgeteilt, die innerhalb dieser Klassen verschiedene Grenzabweichungen besitzen
- Üblicherweise wird im industriellen Bereich die Klasse 2 verwendet

Grenzabweichung

- Zulässige Grenzabweichungen der Toleranzklasse 2 für verschiedene Thermoelementpaare:

Typ	Temperaturbereich	Grenzabweichung
T	-40°C bis 133°C	±1°C
	133°C bis 350°C	±0,0075* T in °C
E	-40°C bis 333°C	±2,5°C
	333°C bis 900°C	±0,0075* T in °C
K,N	-40°C bis 333°C	±2,5°C
	333°C bis 1200°C	±0,0075* T in °C
R,S	0°C bis 600°C	±1,5°C
	600°C bis 1600°C	±0,0025* T in °C

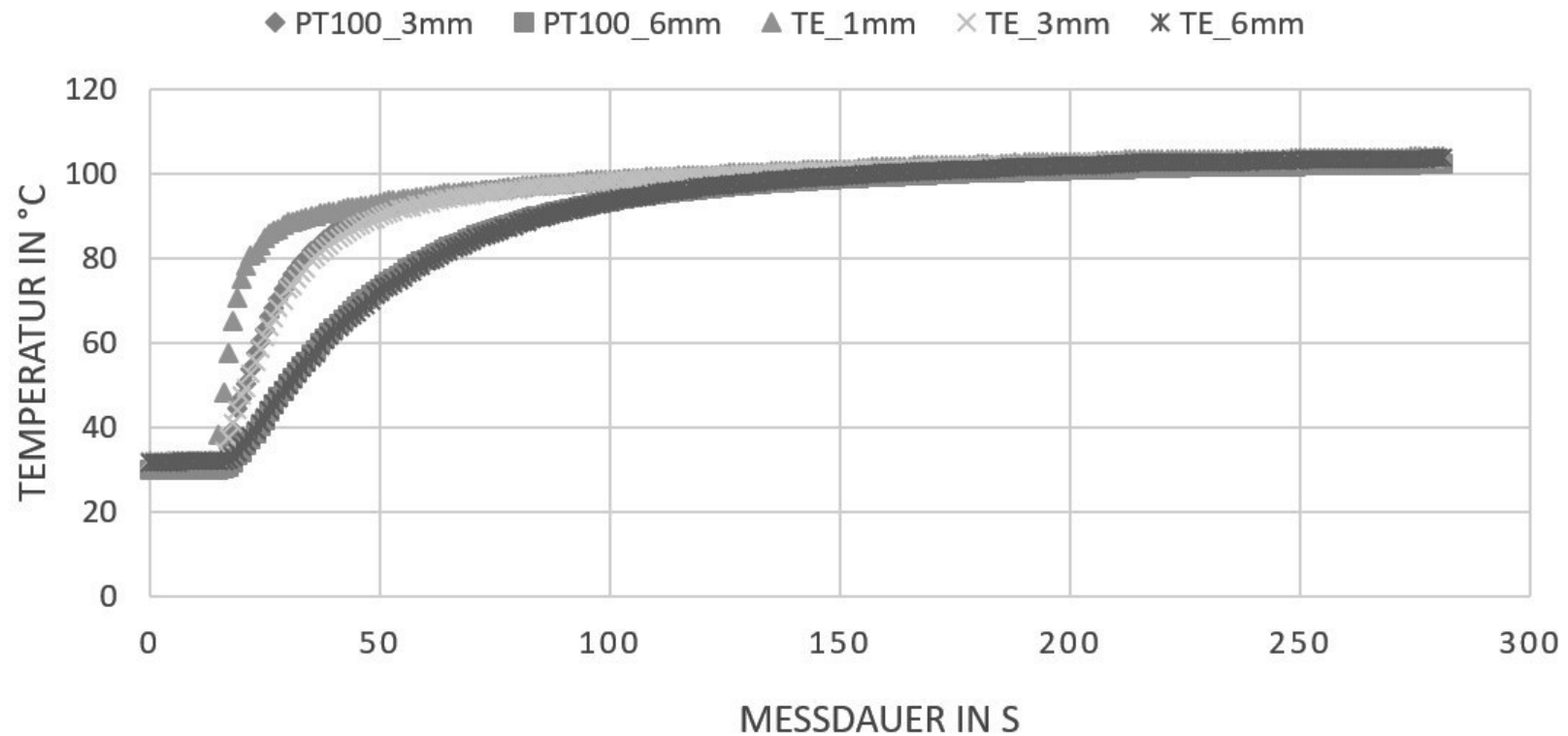
Tabelle: Auszug aus der DIN EN 60584-2

Quelle: DIN EN 60584-2

ANWENDUNGSBEISPIELE

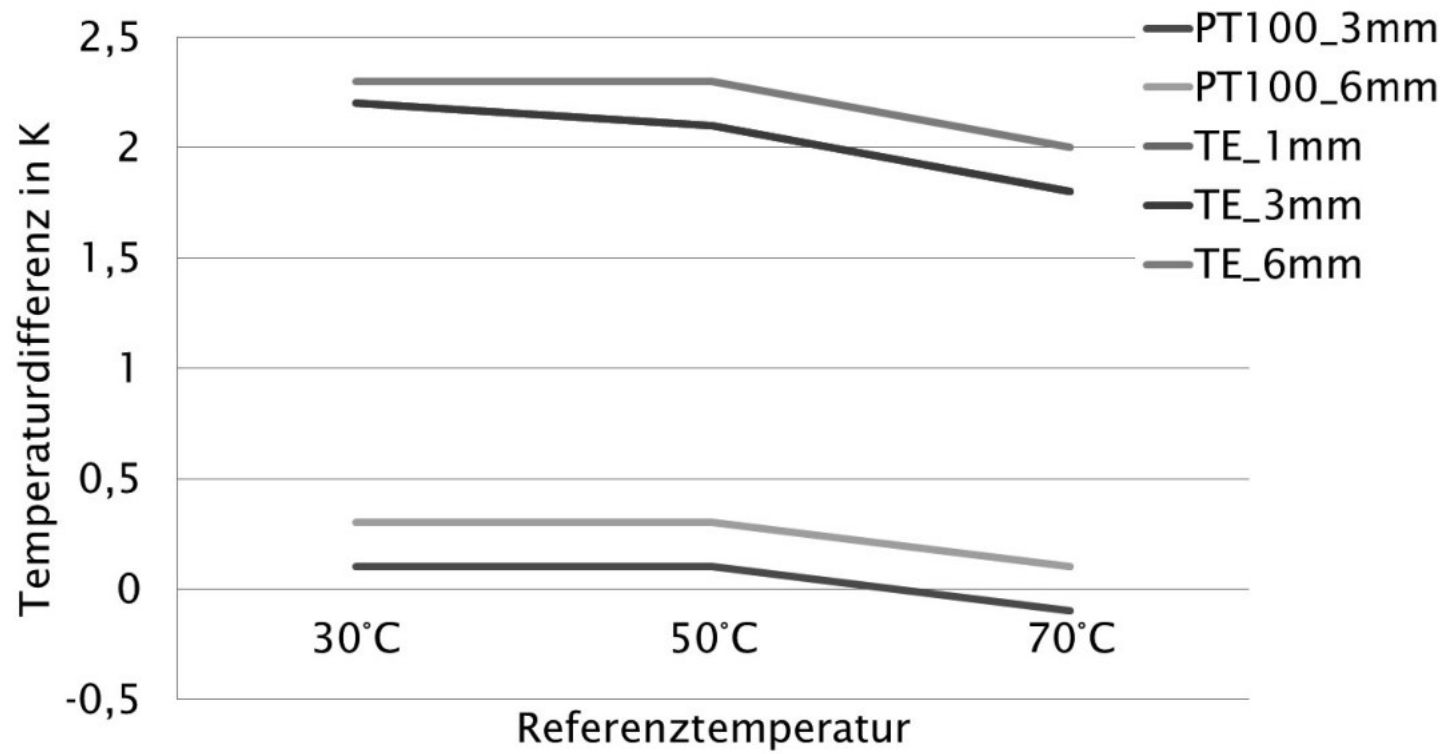
Ansprechzeit

Laborversuch



Kalibrierung

Laborversuch



Bauarten von Thermoelementen



THERMOGRAFIE

Thermografie

Grundlegendes Prinzip

- Jeder Körper mit $T > 0$ K emittiert Wärmestrahlung (thermische Strahlung)
- Wärmestrahlung kennzeichnet Energietransport durch elektromagnetische Wellen
- Thermografie nutzt den Zusammenhang von abgestrahlter Energie und Oberflächentemperatur

Wärmestrahlung im elektromagnetischen Spektrum

- Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung: ca. 0,1 μm – 1 mm (Infrarotstrahlung)
- Körper strahlen bei Raumtemperatur im IR-Bereich
- Erst bei $T > 800$ K sichtbare Strahlung
- Charakterisierung der elektromagnetischen Strahlung durch den Zusammenhang von Frequenz (f), Lichtgeschwindigkeit (c) und Wellenlänge (λ):

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

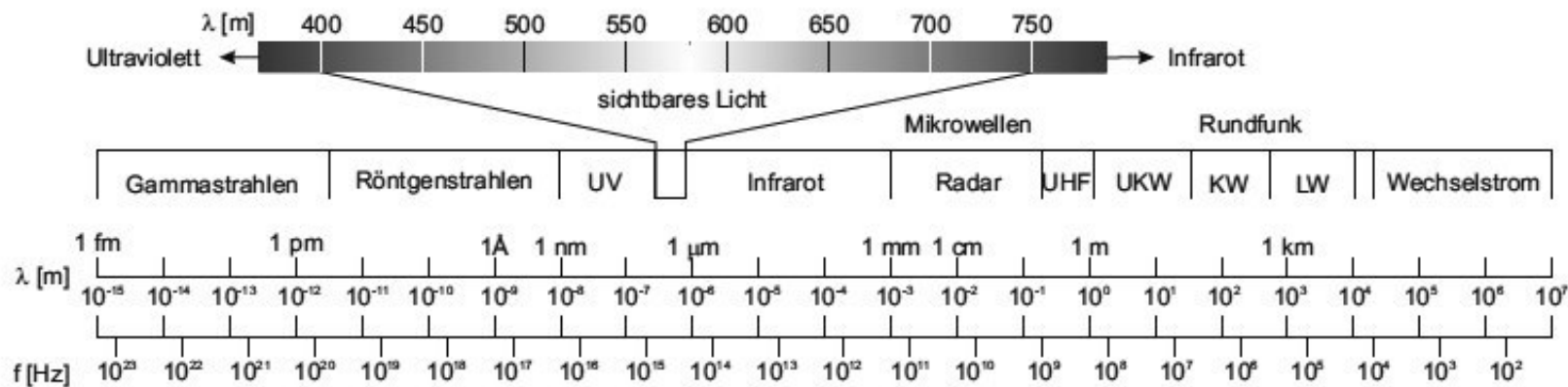


Abb.: elektromagnetisches Spektrum

Quelle: Nietsche (2006), S. 142

Berührungslose Temperaturmessung

Für folgende Messaufgaben vorteilhaft:

- Bildeindruck der Temperaturverteilung zur besseren Übersicht notwendig
- Simultane Messung an vielen Messstellen notwendig
- Messobjekt steht unter elektrischer Spannung
- Messobjekt ist schwer zugänglich
- Messobjekt hat nur geringe Temperaturkapazität
- Messobjekt bewegt sich
- Messobjekt darf nicht berührt werden (Hygiene)

Infrarotthermografie

Fehlerquellen

- Wie alle Messgeräte besitzt auch ein Thermografiesystem eine begrenzte Genauigkeit, deren Wert allerdings deutlich höher als der von Berührungsthermometern ist. Jedoch sind folgende Fehlerquellen in Betracht zu ziehen:
 - Fehleinstellung von Emissionsgrad und Umgebungstemperatur am Messgerät
 - Reflexion von Störstrahlungsquellen aus dem Vordergrund des Objektes
 - Signalverluste durch Strahlungsabschwächung auf der Übertragungsstrecke (z.B. durch Wasserdampf oder Kohlendioxid in der Luft)
 - Transmission von Störstrahlungsquellen aus dem Hintergrund des Objektes

Energiebilanz der Wärmestrahlung (I)

- Die einfallende Strahlung kann von der Oberfläche absorbiert, transmittiert und reflektiert werden:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{reflektiert}} + \dot{Q}_{\text{transmittiert}} + \dot{Q}_{\text{absorbiert}}$$

- Ein Körper selbst kann Strahlung emittieren:

$$\dot{Q}_{\text{Strahlung}} = \dot{Q}_{\text{reflektiert}} + \dot{Q}_{\text{transmittiert}} + \dot{Q}_{\text{emittiert}}$$

- Wird dem Körper Energie zugeführt (Leitung, Konvektion), ergibt sich die Energiebilanz:

$$\dot{Q} + \dot{Q}_{\text{zu}} - \dot{Q}_{\text{Strahlung}} = 0$$

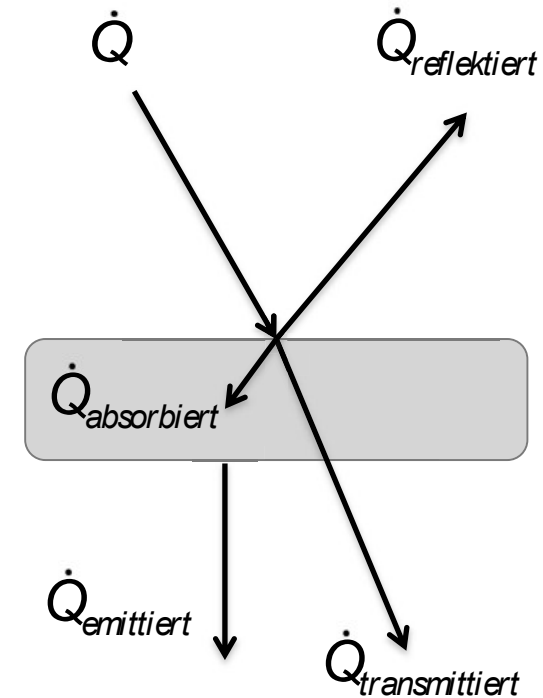


Abb.: Wärmestrahlungsbilanz eines Körpers

Energiebilanz der Wärmestrahlung (II)

Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsgrad

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{\text{absorbiert}}}{\dot{Q}} \quad \text{Absorptionsgrad}$$

$$\rho = \frac{\dot{Q}_{\text{reflektiert}}}{\dot{Q}} \quad \text{Reflexionsgrad}$$

$$\tau = \frac{\dot{Q}_{\text{transmittiert}}}{\dot{Q}} \quad \text{Transmissionsgrad}$$

- Aus diesen Kennzahlen ergibt sich die dimensionslose Bilanzgleichung zu:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Schwarzer Körper/ schwarzer Strahler

- Bei der thermischen Strahlung ist das Idealbild der „schwarze Strahler“ immer die Bezugsgröße
- Absorbiert ein Körper für alle Temperaturen und Wellenlängen sämtliche Strahlung, spricht man von einem schwarzen Körper bzw. einem schwarzen Strahler
- Keine Verluste durch Transmission und Reflexion
- Sie bilden die Bezugsquelle für reale Körper und Strahler
- Bei gleicher Temperatur besitzt dieser die höchst mögliche Intensität der abgegebene Strahlung
- Ein schwarzer Körper mit $\alpha = 1$ kommt in der Realität nie vor (max. $\alpha \approx 0,95$)

Planck'sches Strahlungsgesetz

- Das Planck'sche Gesetz beschreibt die spezifische spektrale Strahlungsleistungsdichte (M) eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur (T) und der Wellenlänge (λ):

$$M_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5 * (\exp\left(\frac{c_2}{\lambda * T}\right) - 1)}$$

- Strahlungskonstanten:

$$c_1 = 3,741 * 10^8 (W\mu m^4)/m^2$$

$$c_2 = 1,493 * 10^4 \mu m K$$

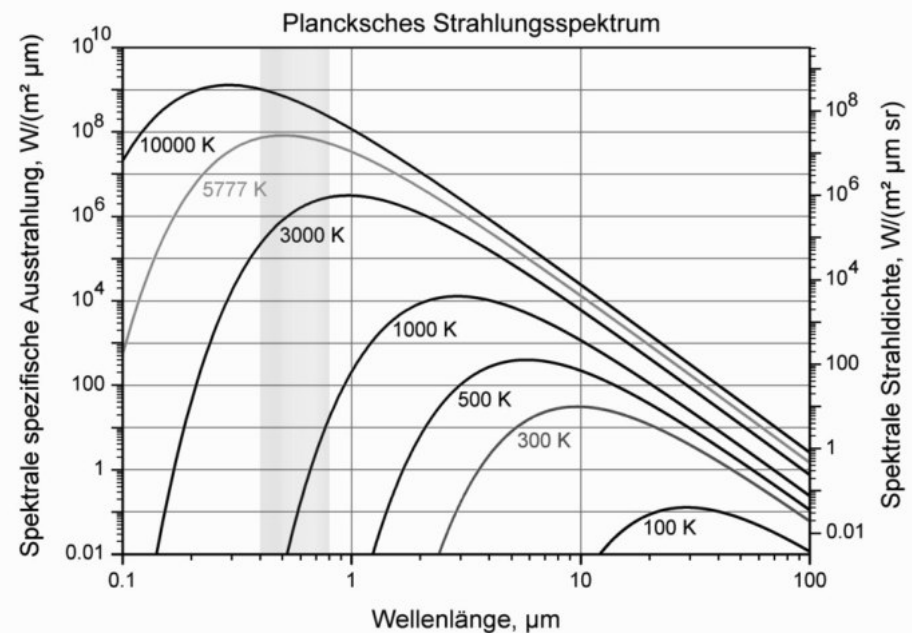


Abb.: Spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers

Quelle: http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/wp-content/blogs.dir/28/files/2012/07/i-4c08a4ea550331e661b4a020c47b51ef-1024px-BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_de.png

Wien'sches Verschiebungsgesetz

- Das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschreibt das Auftreten der maximalen Emissionen für verschiedene Wellenlängen und Temperaturen
- Es gilt: $\lambda_{max} = \frac{2897,8\mu mK}{T}$
- Bei sinkenden Temperaturen verschiebt sich das Maximum der Spektren zu längeren Wellenlängen

Stefan-Boltzmann'sches Gesetz

- Das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz gibt durch Integration des Planck'schen-Strahlungsgesetzes, über alle Wellenlängen hinweg, die Gesamtstrahlungsdichte bzw. die abgegebene Wärmeenergie eines schwarzen Strahlers an

$$M = \varepsilon * \sigma * T^4$$

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} W / (m^2 K^4)$$

- Im Idealfall würde eine IR-Kamera diese Wärmemenge anzeigen

Kirchhoff'sches Gesetz

- Das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Absorptions- und Emmisionsgrad eines Körpers bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen Sender und Empfänger

$$\boldsymbol{\varepsilon(T) = \alpha(T)}$$
 Formel für diffuse graue und schwarze Strahler

$$\boldsymbol{\varepsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T)}$$
 Formel für alle diffusen Strahler

Emissionsgrad (I)

Definition

- Der Emissionsgrad kennzeichnet das Verhältnis der von einer realen Oberfläche emittierten Strahlung zu der eines schwarzen Strahlers bei bestimmter Temperatur:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_s(T)}$$

- Kann Werte von 0 - 1 annehmen
- Ist ein Maß dafür, wie ähnlich eine Oberfläche einem schwarzen Strahler ist
- In der Realität hängt der Emissionsgrad von der Temperatur, der Wellenlänge und der Richtung der emittierten Strahlung ab

Emissionsgrad (II)

Bestimmung des Emissionsgrades

- **Referenztemperatur**

- Mit einem zusätzlichen Messgerät (z.B. einem Thermoelement) wird an einer Stelle des Messobjektes dessen Oberflächentemperatur gemessen
- Zugleich wird an dieser Stelle mit dem Strahlungsthermometer das Signal gemessen. Damit lässt sich der Emissionsgrad entsprechend der kontaktierenden Messung einstellen

- **Referenzfläche**

- Auf dem Messobjekt muss eine Stelle mit einem bekannten Emissionsgrad hergestellt werden, welches einen schwarzen Strahler simuliert (z.B. Loch bohren)
- Die Temperatur des Loches, bei einem angenommenen Emissionsgrad $\varepsilon = 1$, sowie die Oberflächentemperatur messen und den Emissionsfaktor entsprechend der Formel 10 bestimmen

Emissionsgrad (III)

Bestimmung des Emissionsgrades

- **Schwärzung der Messfläche**

- Anstatt ein Loch zu bohren, um einen schwarzen Strahler zu realisieren, kann die Messfläche mit einem Lack oder einer Folie, dessen Emissionsgrad bekannt ist, behandelt werden
- Diese Methode kann jedoch zu Rückwirkungen auf das Messobjekt führen, wie z.B. eine Änderung des Abstrahlverhaltens

- **Vergleichsmessung**

- Das Messobjekt muss auf die Temperatur des schwarzen Strahlers aufgeheizt werden
- Zur Bestimmung des Emissionsfaktors wird die gemessene Strahlungsenergie des Messobjekts und des schwarzen Strahlers ins Verhältnis gesetzt
- Diese Art der Emissionswertbestimmung eignet sich auf Grund des Messaufbaus nur für kleine Messobjekte

Detektoren

- Das wichtigste Element der Infrarotkameras sind die Strahlungsempfänger (Detektoren)
- Diese wandeln die IR-Strahlung in ein elektronisches Signal um
- Es gibt zwei Arten von Detektoren:
 - Thermische Detektoren
 - Quantendetektoren

Thermische Detektoren

- Thermische Detektoren reagieren nicht auf Photonen, sondern auf eine Strahlungsleistung

→ Sie sind von der Wellenlänge unabhängig

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Detektoren sind sehr preiswert	<ul style="list-style-type: none">• langsames Ansprechverhalten
<ul style="list-style-type: none">• Einsatzgebiet u.a. als pyroelektrische Detektoren oder als Strahlungsthermoelemente	<ul style="list-style-type: none">• geringes Nachweisvermögen der Strahlung (dies kann selbst durch Kühlung nicht wesentlich verbessert werden)

Quantendetektoren

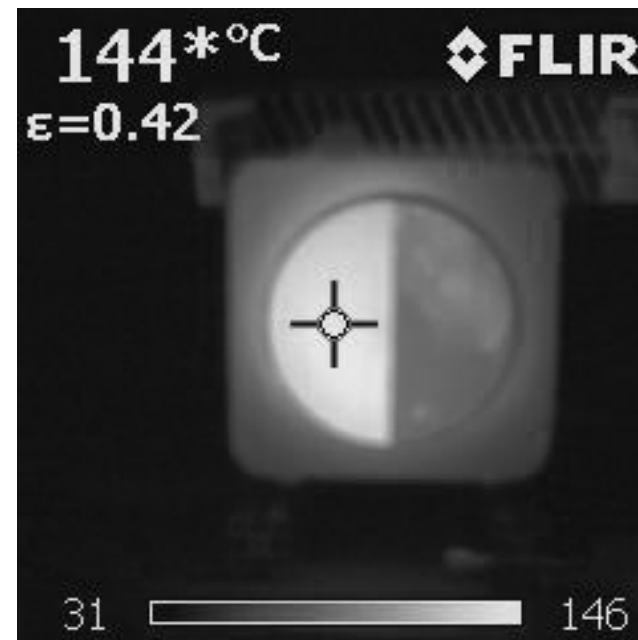
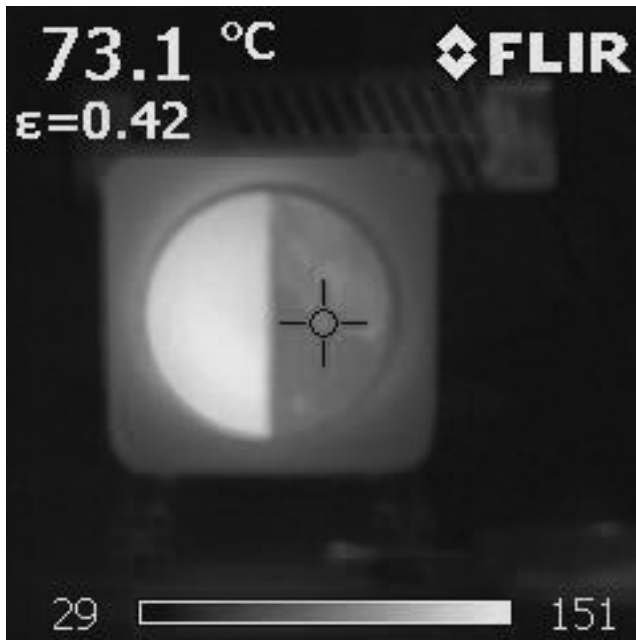
- Quantendetektoren nutzen zwei Effekte:
 - innerer Fotoeffekt (innerer lichtelektrischer Effekt)
 - äußerer Fotoeffekt (äußerer lichtelektrischer Effekt)
- Beim inneren FE werden durch Absorption von Quanten Elektronen befreit
- Beim äußeren FE ändert der Detektor seine Leitfähigkeit bei einer Befreiung von Elektronen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Sehr hohes Nachweisvermögen	<ul style="list-style-type: none">• Sie sind wellenlängenabhängig
<ul style="list-style-type: none">• Schnelle Ansprechzeit (im Gegensatz zu thermischen Detektoren)	<ul style="list-style-type: none">• Momentan noch sehr teuer• Durch Rauscherzeugung der Ladungsträger (Verslechterung Signal-Rausch-Verhältnis) müssen diese Detektoren gekühlt werden
	<ul style="list-style-type: none">• Je langwelliger die Strahlung, umso tiefer muss die Kühltemperatur sein

ANWENDUNG AM BEISPIEL

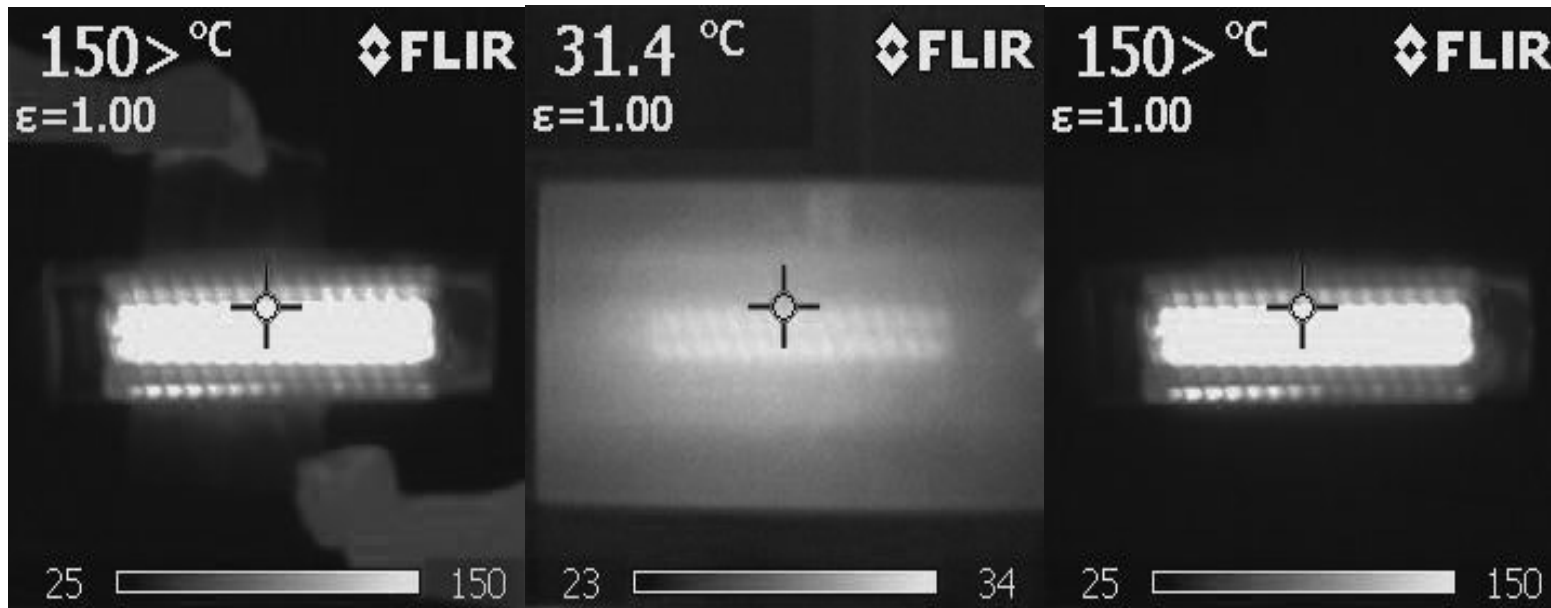
Emissionskoeffizient

Laborversuch

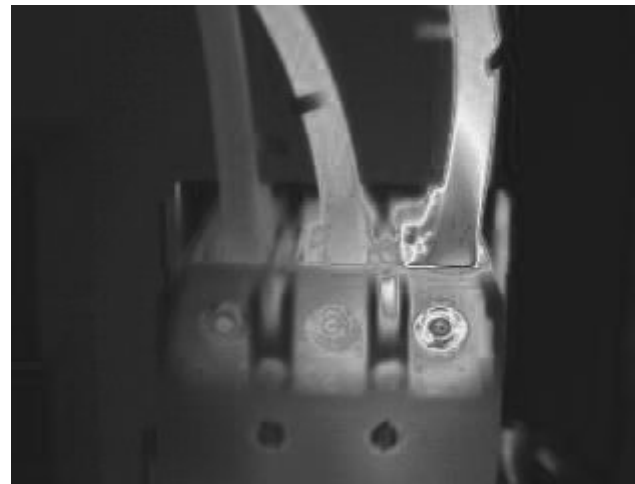
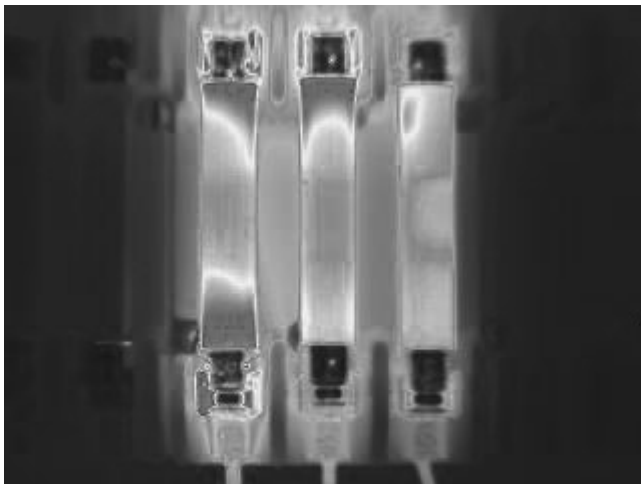
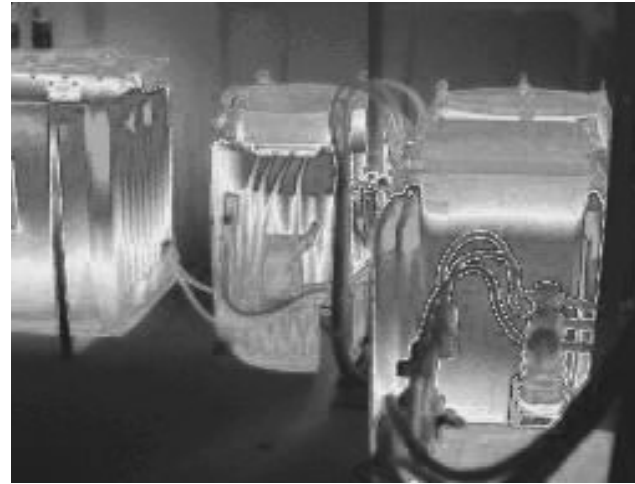


Durchlässigkeit von Wärmestrahlung

Laborversuch



Thermografiebilder



Thermografiegeräte

Gebäude-Thermografie



Quelle: <http://www.3n17.com.cn/images/upfile/200611915442457971.jpg>

Forschung & Entwicklung



Quelle: http://www.thermografie-xtra.de/fileadmin/user_upload/pics/products/flir-thermacam-p60-2.jpg

Prozesskontrolle



Quelle: <http://www.thermoscan.co.th/A20M.jpg>

Hochleistungsthermografie



Quelle: http://www.elektroniknet.de/uploads/media_uploads/images/1430229382-202-meilhaus0.jpg

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT

Quellen (Auszug)

- Tränkler, H.-R.: ***Taschenbuch der Meßtechnik – mit Schwerpunkt Sensortechnik***. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 4. Auflage, 1996
- Parthier, R.: ***Messtechnik. Grundlagen für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure***. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2004
- Hesse, S., Schnell, G.: ***Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation***. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 3. Auflage, 2004
- Irrgang, K.; Michalowsky, L. (Hrsg.): ***Temperaturmesstechnik***. Vulkan-Verlag, Essen, 1. Auflage, 2004
- Bernhard, F.: ***Handbuch der Technischen Temperaturmessung***, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,2014

Quellen (Auszug)

- Nietsche, W. & Brunn, A.: Strömungsmesstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 2006
- Hesselbach et. al.: Energie- und klimaeffiziente Produktion – Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Springer Vieweg Verlag, 1. Auflage 2012.
- Marek, R & Nitsche, K: Praxis der Wärmeübertragung, Grundlagen – Anwendung – Übungsaufgaben, Fachbuchverlag Leipzig, 1. Auflage, 2007