

Universität Siegen

Institut für Fluid- und Thermodynamik · Universität Siegen
57068 Siegen, Germany



Professor Dr. J. U. Keller
Institute Fluid- and Thermodynamics
Mechanical Engineering
University of Siegen
D-57068 Siegen, Germany

Tel. +49-271-740-2755
Fax +49-271-740-2360
e-mail: keller@ift.maschinenbau.uni-siegen.de

Wärmeübertragung

Vorlesungsmanuskript

Prof. i. R. Dr. sc. techn. J. U. Keller

Bearbeiter: O. Amer

1. Auflage, 2010

Homepage

1) <http://141.99.140.157/d/ift3/index.htm>

2) <http://www.uni-siegen.de>, Fachbereiche, Maschinenbau, Institute, Institut für Fluid- und Thermodynamik, Thermodynamik, Lehre.

Das Skriptum stellt eine Kurzfassung der Vorlesung dar und ist zum Gebrauch neben der Vorlesung bestimmt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben. Als Manuskript gedruckt. Alle Rechte vorbehalten.

Wärmeübertragung

Maschinenbauer, 4 SWS

- A Einführung, Grundbegriffe
- B Eindimensionale **stationäre** Wärmeleitung
Fourier – Gesetz
- C Wärmeübergang, Wärmedurchgang
- D Mehrdimensionale **stationäre** Wärmeleitung
- E Wärmeleitung mit Wärmequellen
Fourier – Laplace - Gleichung
- F Wärmeleitung in Rippensystemen
Rippenwände, Rippenrohre
- G Eindimensionale **instationäre** Wärmeleitung
Erwärmung/Abkühlung von Platten und Zylindern
- H Wärmeleitung in bewegten fluiden Medien
Hagen - Poiseuille - Strömung
- I Wärmeleitung in Systemen mit Phasenwechsel
- J Wärmestrahlung, schwarze und graue Strahler
- K Wärmetauscher, Wärmeübertrager

Literatur zur Wärmeübertragung VL/UE WS 2010/11

- [1] Baehr H. D., Stephan K.
Wärme- und Stoffübertragung,
Springer, Berlin etc., 1994.
- [2] Elsner N., Fischer S., Huhn J.
Grundlagen der Technischen Thermodynamik
Bd. 2, Wärmeübertragung,
Akademie Verlag, Berlin, 8. Auflage, 1993.
- [3] Faghri A.
Heat Pipes, Science & Technology
Taylor & Francis, Washington D. C. P., 874, 1995,
(Wärmerohre, Thermosyphone)
- [4] Gregorig R.
Wärmeaustausch und Wärmetauscher
Sauerländer, Aarau und Frankfurt, 1973.
- [5] Grigull U., Sandner H.
Wärmeleitung,
Springer, Berlin etc., 1979 u. f.
- [6] Gröber, Erk, Grigull U.
Die Grundgesetze der Wärmeübertragung,
Springer, Berlin etc., 1990.
- [7] Herwig H.
Wärmeübertragung A-Z
Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte,
Springer, VDI-Verlag, Berlin, Düsseldorf, 2000.
- [8] N. N.
Heat Exchange Design Handbook,
Hemisphere Publ. Corporation, N. Y. etc., 1983
- [9] Obermeier E.
Wärmeübertragung I
Manuskript einer Vorlesung, U-Siegen, WS 2007/08, Bezug über Verfasser
- [10] VDI-Wärmeatlas, Div. Autoren
Berechnungsblätter für den Wärmeübergang,
VDI-Verlag, Düsseldorf 2007, 8. Auflage, Ringbuch und / oder CD.
- [11] Wagner W.
Wärmeaustauscher, Reihe Kamprath,
Vogel Buchverlag, 1993.

A Einführung, Grundbegriffe

Wärme ist eine Übertragungsform von Energie.

Wärme wird zwischen Körpern verschiedener Temperatur durch

- | | | |
|---|---|-------------------------------|
| a) Massentransfer | — | Konvektiver Wärmeaustausch |
| b) Berührung, Kontakt | — | Wärmeübergang
Wärmeleitung |
| c) Elektromagnetische Strahlung ausgetauscht. | — | Wärmestrahlung |

Beispiel: Teekessel auf Gasherd



Wärmeübertragung (WÜ)

Massentransfer Flammengase steigen auf. Wasserdampf entweicht Kessel.

→ Konvektion

Kontakt Flammengase streichen entlang der Teekanne und geben Wärme an diese ab.

→ Wärmeübergang

Strahlung

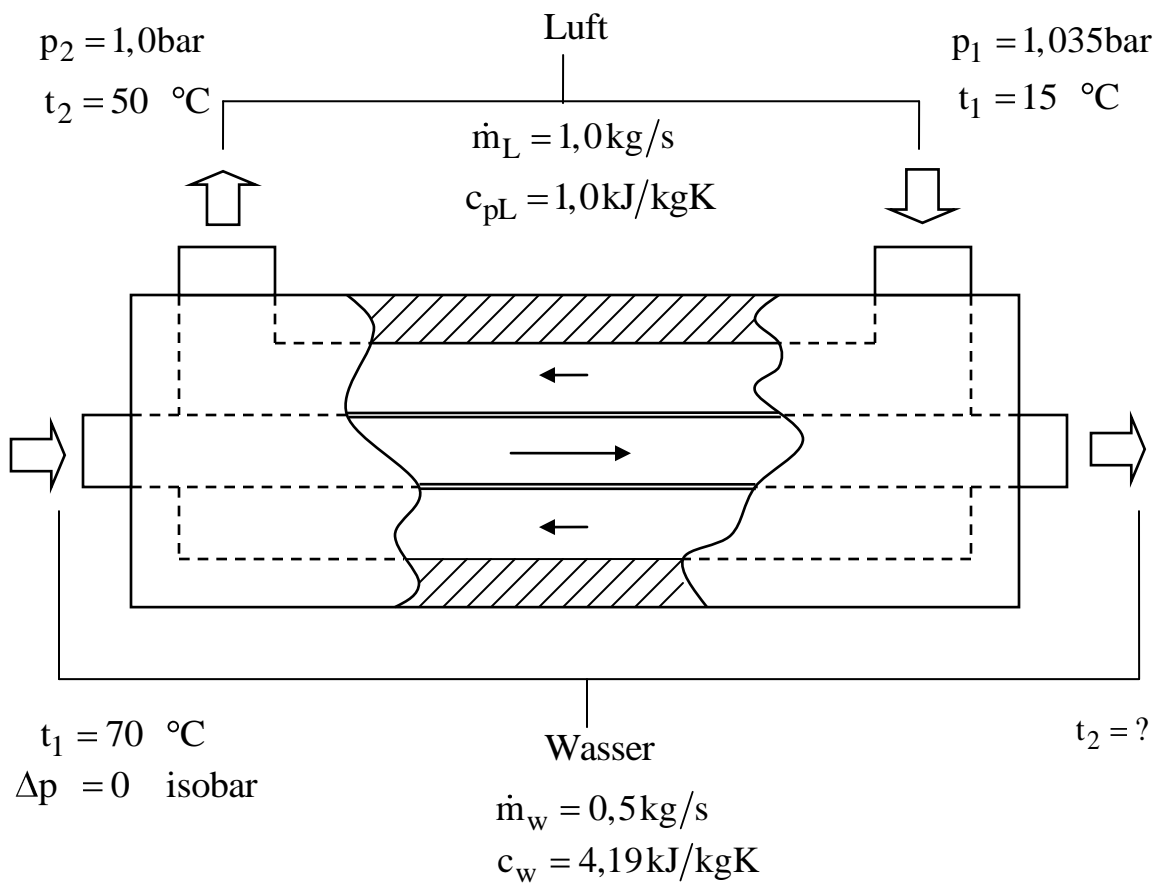
Flamme sendet Strahlung aus, die von Teekessel / Wasser absorbiert wird.

A2

Beispiel

Gegenstrom – Wärmeübertrager [7]

Thermodynamisches System



**Wärmeaustausch zwischen Luft – und Wasserstrom
durch Wärmeleitung und Wärmeübergang.**

Konvektion

Transport von Wärme (thermischer Energie) durch Massentransport in Gebiete anderer Temperatur.

Blutkreislauf

Fernwärmesysteme

Golfstrom, Geothermie (Atmosphäre, Erdinneres)

Wärmeleitung

Transport von Wärme (thermischer Energie) durch Stöße von Molekülen, Gitteratomen, Elektronen.

Energietransport ohne Massentransport aber an Materie gebunden.

Motorkühlrippe – Luft

Raumluft – Hausmauer- Außenluft

Mensch, Tier – Umgebungsluft

Wärmestrahlung

Übertragung von Wärme (thermischer Energie) durch elektromagnetische Strahlung besonderer Wellenlänge.

Energietransport ohne Bindung an Masse oder Massentransport.

Kein materieller Träger zwischen strahlenden Körpern notwendig!

Sonne – Erde

Erde – Weltraum

Infrarotstrahler

Grundbegriffe

Wärme

Übertragungsform thermischer Energie. Sie wird zwischen **thermodynamischen Systemen** bzw. Körpern verschiedener Temperaturen ausgetauscht.

Wärme ist eine extensive Größe und hat die Einheit einer Energie, d.h. Joule (J).

Wärme, die pro Zeiteinheit zwischen Systemen ausgetauscht wird oder durch die Grenzfläche eines Systems hindurch tritt, heißt Wärmestrom und hat die Einheit Joule pro Sekunde (J/s =Watt).

Wärmeströme müssen bei Energiebilanzen thermodynamischer Systeme grundsätzlich berücksichtigt werden.

Die Entwicklung des Begriffes „Wärme“ als Übertragungsform von Energie ist erfolgt durch [1, 4, 7]:

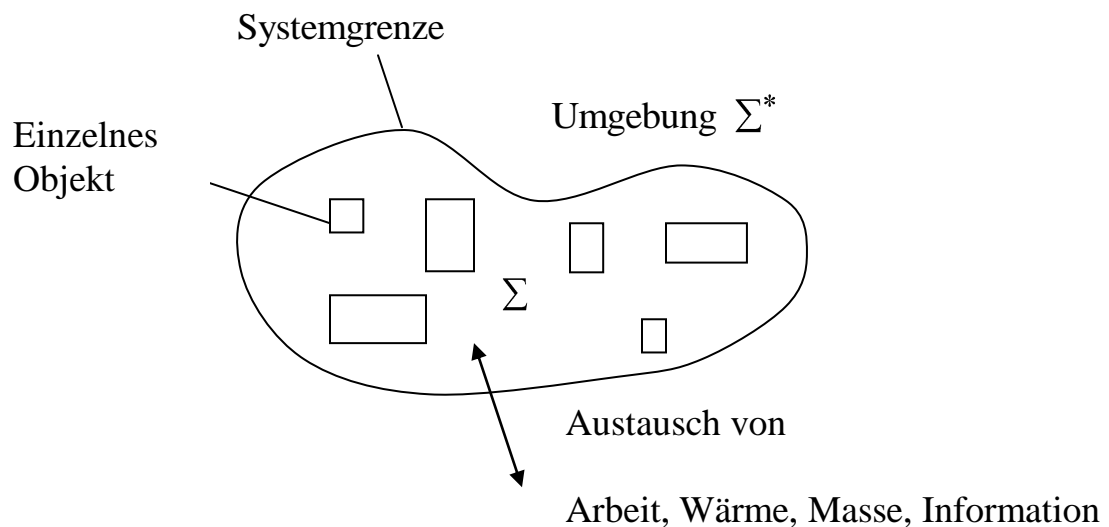
- J. B. Fourier, Paris, 1722
- C. Rumford, München, 1790
- J. R. Mayer, Heilbronn, 1840
- J. P. Joule, Manchester, 1845
- R. Clausius, Bonn, 1870

Thermodynamisches System

W. Schottky (ca. 1925)

Es gibt in der Natur Systeme, d.h. eine Menge von Objekten oder Körpern, abgegrenzt von ihrer Umgebung durch wohldefinierte Grenzen, die mit ihrer Umgebung nur dadurch in Wechselwirkung stehen, dass sie (mechanische oder elektrische) Arbeit, Wärme und Masse austauschen.

Solche Systeme nennen wir thermodynamische Systeme (Σ).



Thermodynamisches System

Erweiterungen: Unscharfe Grenzen

→ Fuzzy Logik!

Beispiele für einfache* thermodynamische Systeme

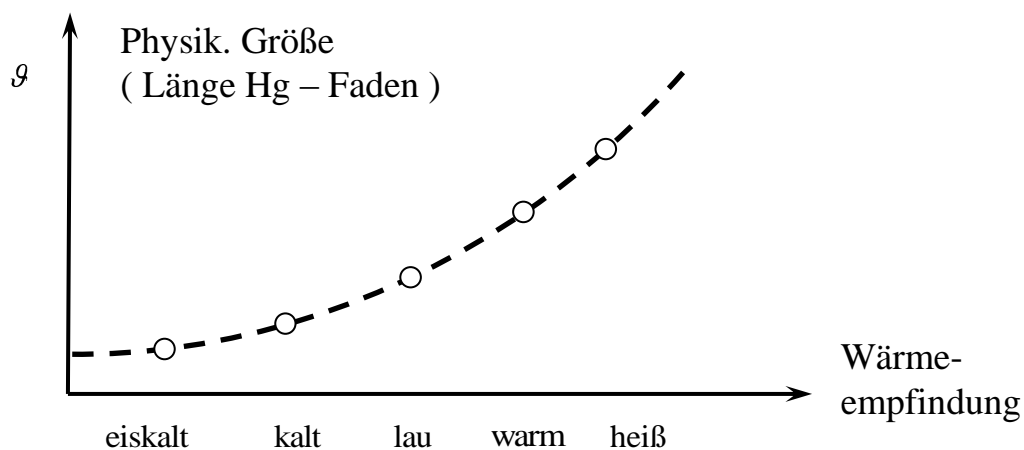
Einteilung nach Austauschgrößen

Arbeit	Wärme	Masse	System	Eigenschaft
×	×	×	Dieselmotor	offen
×	×		Kühlschrank	geschlossen
×		×	Wasserturbine	offen adiabat
	×	×	Verdampfer Kondensator Heizkörper	offen arbeitsisoliert
	×		Ziegelstein Wärmeflasche	wärmeleitend
×			Batterie, Akku	geschlossen, adiabat
×	×	×	Brennstoffzelle	offen

* Vernachlässigung von Äußeren Kräften (Schwerkraft),
Oberflächeneffekten, Strahlungsphänomenen.

Temperatur ϑ :

Objektives Maß für subjektive Wärmeempfindung

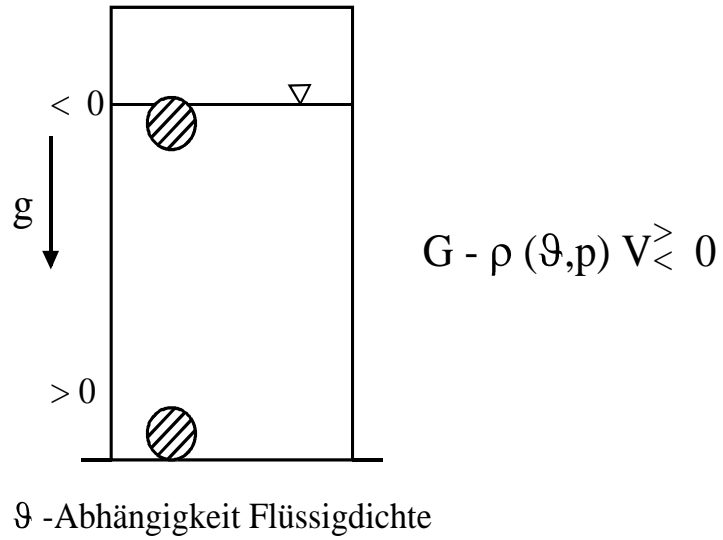


Thermometer

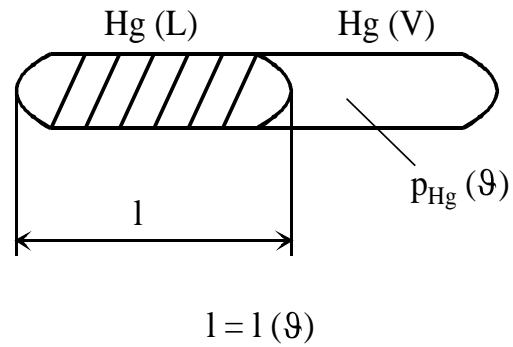
Thermometer

Physikalische Eigenschaft

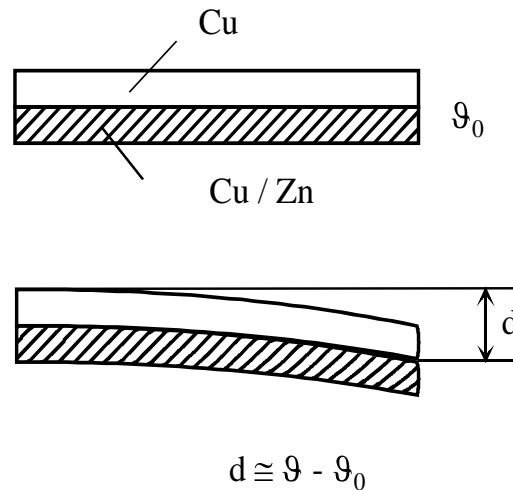
1) Galilei - Thermometer



2) Quecksilberfaden-
thermometer



3) Bimetallthermometer



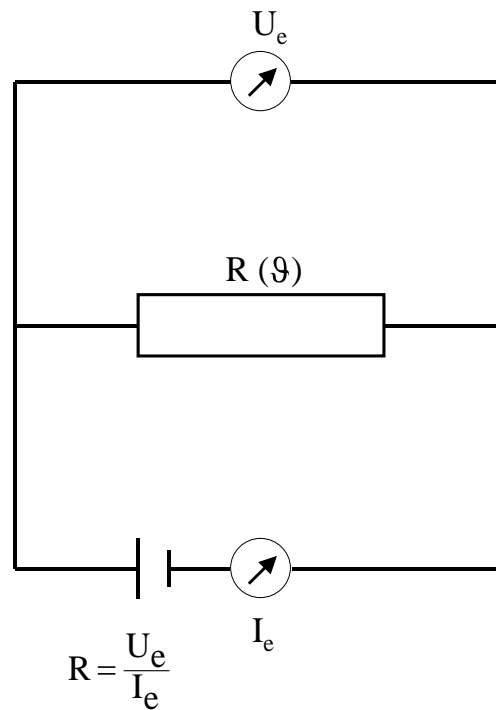
Thermometer

4) Widerstandsthermometer

Beispiel
Pt 100: Platin
100 Ohm

Physikalische Eigenschaft

Elektrischer Widerstand

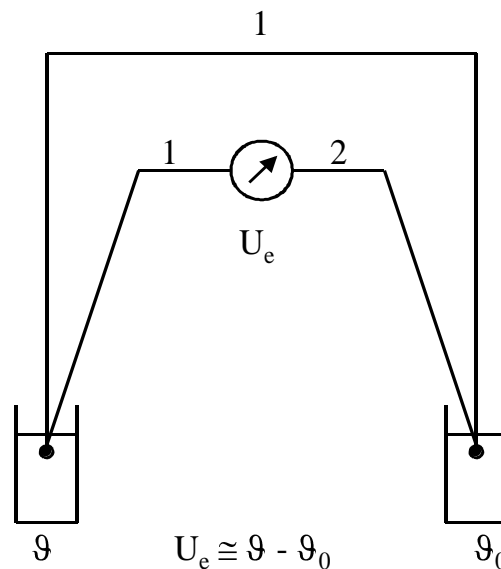


G. S. Ohm

5) Thermoelement

Thermoelektrischer Effekt

Messung elektrischer Thermospannungen



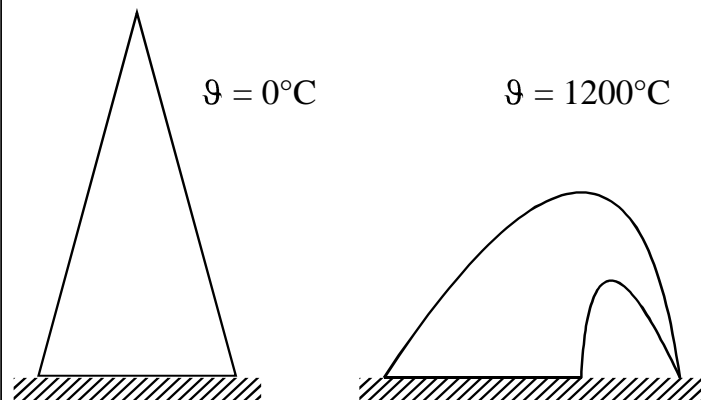
Umkehrung: Peltier - Effekt

Thermometer

6) Seeger Kegel
(hohe Temperaturen)

Physikalische Eigenschaft

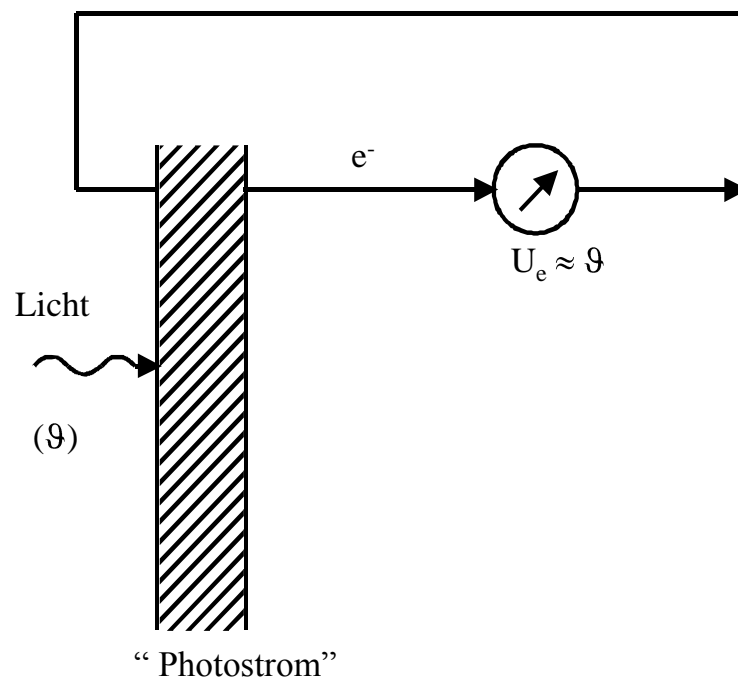
Schmelzen fester Körper



7) Strahlungsthermometer

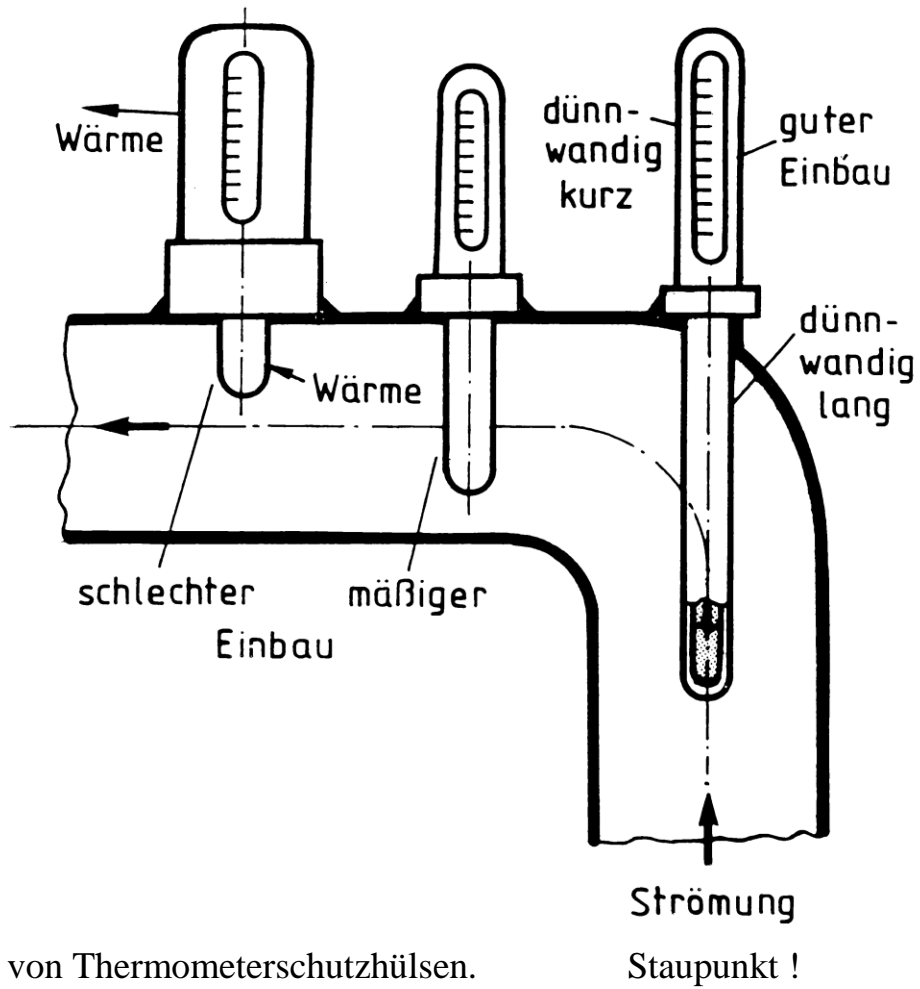
Berührungsfreie Messung
hoher Temperaturen

Elektrischer Photoeffekt
(A. Einstein, 1905)



Literatur: Eder, F. X. , Arbeitsmethoden der Thermodynamik
Bd. 1, Temperaturmessung

Kohlrausch, F. , Praktische Physik, Bd. I

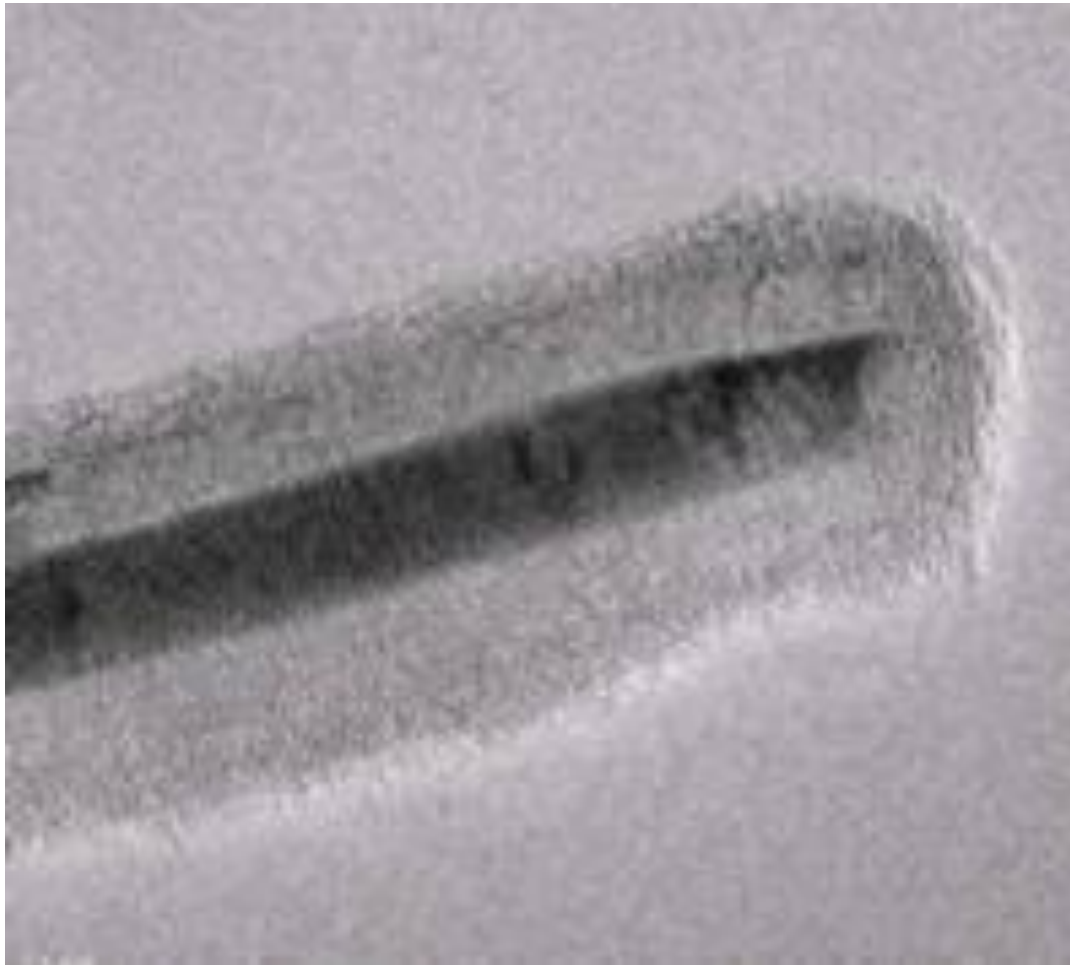


Einbau von Thermometerschutzhülsen.

„Technische Temperaturmessung“

MTÜ V3

Kohlenstoff – Nanoröhrchen Thermometer ^{*)} (Carbon-Nanotube Thermometer, CNT)



^{*)} Leibniz-Institut IFRW, Dresden

Äußere graue Schicht: Kohlenstoffröhre

Innere dunkle Schicht:

Thermometerflüssigkeit (Kupferiodid, CuI)

Relaxationszeit bei Kernspinresonanz –Anregungen
>Temperatur

Anwendung: T-Messung bei Krebstumoren

Unterschiede sind im Allgemeinen klein ($10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$)

A13

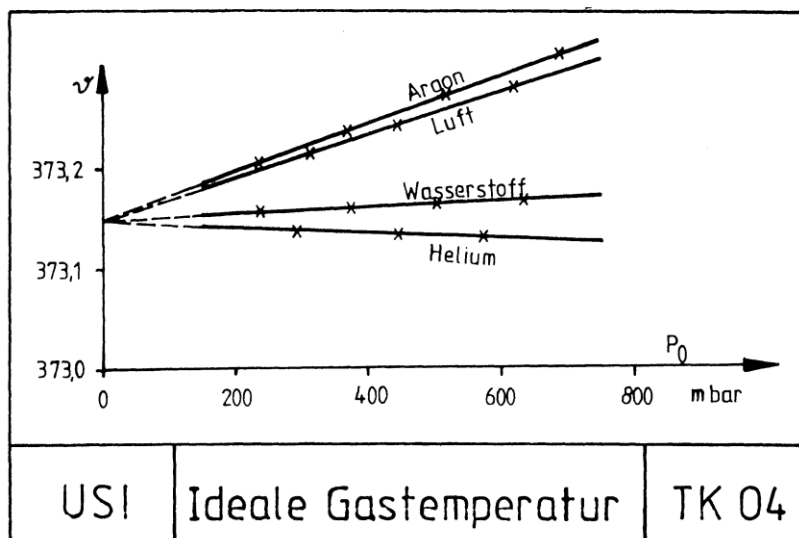
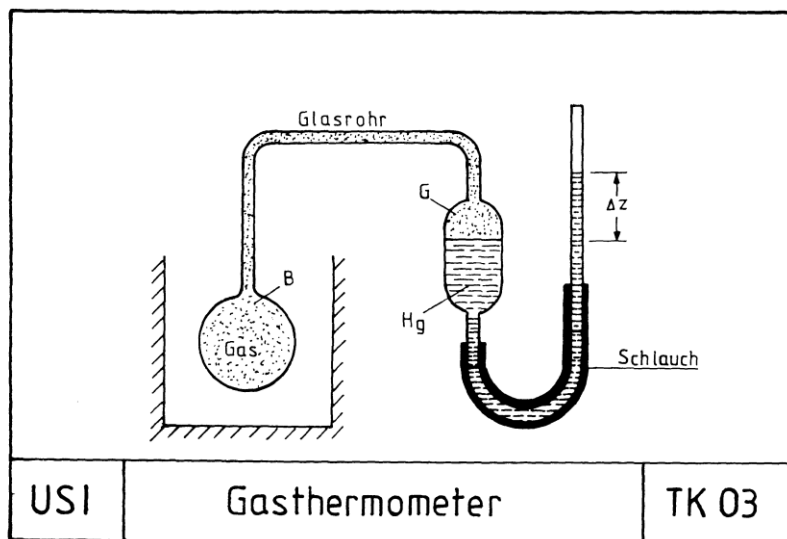
Absolute Temperatur

Internationale Praktische Temperaturskala 1990 (ITS 90)

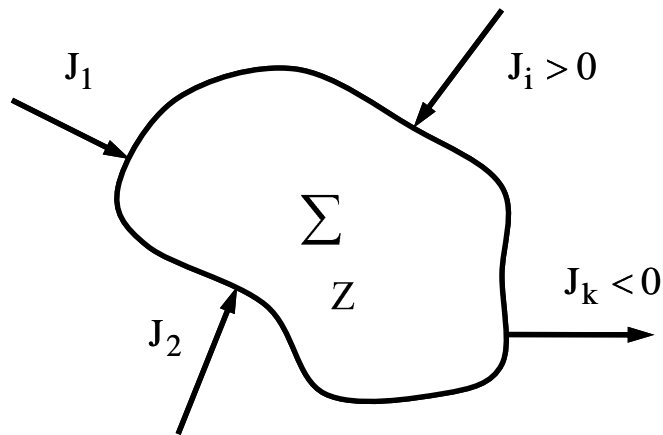
Alle Thermometer zeigen nach Skalierung an Eisschmelzpunkt (0°C) und Wassersiedepunkt (100°C) bei 1 atm stoffabhängige Temperaturen an!

(Beispiel: Hg - Thermometer, Alkohol - Thermometer)

Ausnahme: Gasthermometer im Grenzbereich $p \rightarrow 0$.



Bilanzgleichung extensiver Größen* eines Thermodynamischen Systems



$$\dot{Z}_t = \sum_i J_i + P_Z \quad (1)$$

Speicherterm
Flussterm
Produktionsterm

Masse, Energie, Entropie

Spezialfälle

1. Stationäre Zustände: $Z = \text{const} \rightarrow \dot{Z} = 0$

$$(1) \quad 0 = \sum_i J_i + P_Z \quad (2)$$

2. Erhaltungsgrößen: $P_Z = 0$

$$(1) \quad \dot{Z} = \sum_i J_i \quad (3)$$

$$(1. \ \& \ 2.) : \quad \sum_i J_i = 0 \quad (4)$$

*Größen, die bei Vervielfältigung eines Systems sich auch vervielfältigen.

Beispiel 1

Massenbilanz

Biothermodynamisches System



Hier thront der Mann auf seinem Sitze
 Und ißt z. B. Hafergrüze.
 Der Löffel führt sie in den Mund,
 Sie rinnt und rieselt durch den Schlund,
 Sie wird, indem sie weiterläuft,
 Sichtbar im Bäuchlein angehäuft. -

So blickt man klar, wie selten nur,
 Ins innre Walten der Natur. -

W. Busch

$$\dot{m} = J_m + P_m$$

Speicherterm Flussterm Produktionsterm

1. Hauptsatz der Thermodynamik

Energiesatz

J. P. Joule, J. R. Mayer, H. von Helmholtz

A. Sommerfeld

Jedes thermodynamische System besitzt in jedem Zustand eine extensive Zustandsgröße:

Die Innere Energie (U)

Sie ist die Summe aller Energien der Atome und Moleküle des Systems und hängt i. Allg. von dessen Temperatur ab.

Erfahrungssatz (ERHALTUNG DER ENERGIE)

Energie kann weder erzeugt noch verrichtet werden. Sie kann aber von einer Form in andere Formen umgewandelt werden.

Max Planck (ca. 1900)

Energie, ist die Fähigkeit eines Systems in seiner Umgebung Wirkungen zu erzeugen.

(E. Noether – Theorem)

Energieformen

Wärme, Strahlung, Licht, Schall, Arbeit, (Masse, Einstein)

Kalorische Zustandsgleichungen

thermodynamischer Systeme

Innere Energie ist Funktion der Masse, Temperatur und evt. noch weiterer Größen eines Systems:

$$U = U(m, T, \dots) \quad (5)$$

$$\underline{U = u(T, \dots) \cdot m} \quad (5A)$$

Gase, Flüssigkeiten:

Enthalpie

$$H = U + pV \quad \text{Systemvolumen}$$

$$H = H(m, T, \dots) \quad (6)$$

$$H = h(T, \dots) \cdot m \quad (6A)$$

Einfache kalorische Zustandsgleichungen (CEOS)

Lineare Taylorentwicklungen!

$$U = U_0 + \underset{\substack{\text{Masse} \\ \text{isochore Wärmekapazität}}}{c_v m} (T - T_0) + \mathcal{G} (T - T_0)^2 \quad \left| \frac{1}{m} \right. \quad (7)$$

$$H = H_0 + \underset{\substack{\text{Masse} \\ \text{isobare Wärmekapazität}}}{c_p m} (T - T_0) + \mathcal{G} (T - T_0)^2 \quad \left| \frac{1}{m} \right. \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} c_p = \text{const} \\ c_v = \text{const} \end{array} \right\} \text{Stoffdaten!}$$

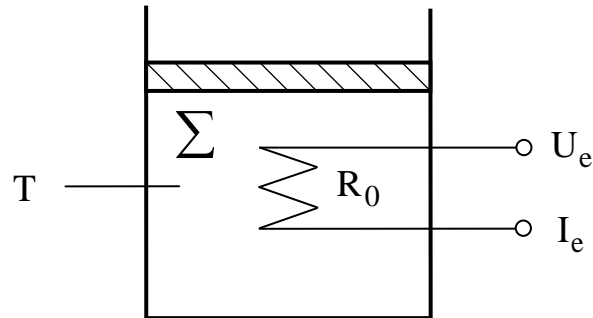
$$u(T, \dots) = u_0 + c_v (T - T_0) + \mathcal{G} (T - T_0)^2 \quad (9)$$

$$u(T, \dots) = u_0 + c_v (T - T_0) + \mathcal{G} (T - T_0)^2 \quad (10)$$

Messung von Wärmekapazitäten

Elektrokalorimeter

Σ : Festkörper, Flüssigkeit, Gas p, V, T, m



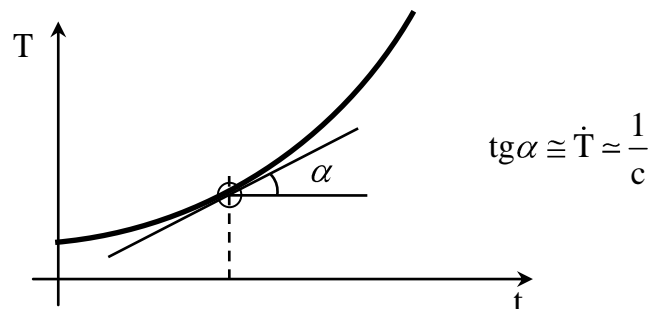
Ohmsche Wärme: $Q_{12} = I_e^2 \cdot R_0 \cdot t_2 - t_1$ (11)
 Gleichstrom !

Wärmeaufnahme: $Q_{12} = cm T_2 - T_1$ (12)

(11,12) $c = \frac{I_e^2 \cdot R_0}{m} \frac{t_2 - t_1}{T_2 - T_1}$ (13)

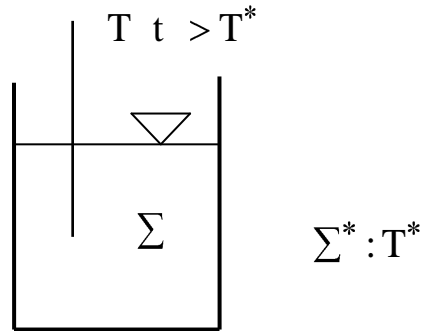
$\rightarrow c = \frac{I_e^2 \cdot R_0}{m} \frac{1}{\dot{T} t} \geq 0$ (14)

Heiz- / Kühlkurven



Historie

Newton'scher Abkühlversuch

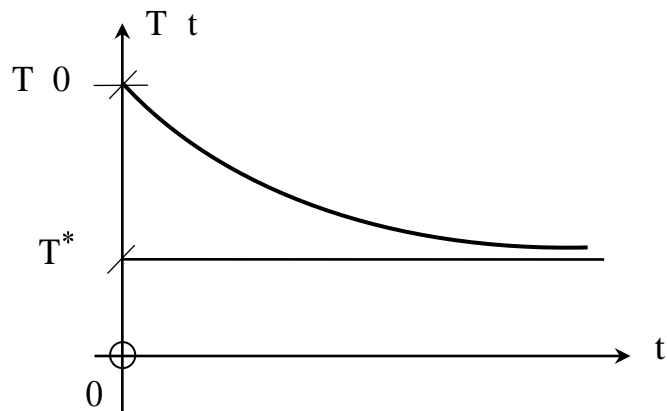


Σ : Wasser, Eisen etc.

Beobachtung: $T_t \approx T - T^*$

$$dt: \quad dT = -K (T_t - T^*) dt \quad (15)$$

$$\rightarrow \quad T_t - T^* = (T_0 - T^*) e^{-Kt} \quad (16)$$



Abkühlkurve von Stoffen. \rightarrow (A1)