

Kleine Wärmelehre

Einleitung

Wissen Sie, was die Begriffe

Wärme

Wärmemenge/Wärme-Energie

Wärmeübertragung durch Strahlung

Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

konvektive Wärmeübertragung

Wärmeübergang

Wärmedurchgang

bedeuten ?

Es soll hier versucht werden, diese technisch-physikalischen Begriffe verständlich zu machen.

[direkt zur Gliederung](#)

Sie fragen sich: "Wozu brauche ich das ?"

auf jeden Fall nicht wie in folgendem Witz:

<http://lustich.de/lustich/witze-witzetexte-x11-2478.html>

Meine - und ich hoffe, Sie verkraften das - 'provokant publikumsbeschimpfende' Antwort lautet: " Komisch - **Energiesparer und Häusles-Isolierer** wollt Ihr alle sein, aber das wichtigste dabei ist wohl, daß man Schafswollematten statt Styropor zur Anwendung bringt, - aber wenn es darum geht, unumstößliche physikalische Wahrheiten verstanden zu haben, da seid Ihr doch alle gleich: ein Volk von überwiegend (die Ausnahmen können jetzt stolz 'weghören' !) naturwissenschaftlich und technisch ungebildeten Individuen. Und was man nicht versteht, zu dem entwickelt man einfach ein Feindbild und negiert oder ignoriert es. Man fällt dabei allerdings dann prompt 'auf die Schnauze', wenn es ans Eingemachte geht .

Nicht, daß ich erwarte, daß jeder 'Normalbürger' gleich ein kleiner Professor für Naturwissenschaften sein soll, das wäre ja furchtbar (lauter Eierköpfe!). Aber ein ganz ganz klein wenig Grundverständnis könnte ja wirklich nichts schaden."

Hier drei Beispiele, die zeigen sollen, daß es gut ist, sich ein wenig mit der Wärmelehre (Kalorik) zu befassen:

Beispiele überspringen

Beispiel 1:

ist Ihnen klar, daß Sie den 'Dachspitz' Ihres Häusles mit 30 cm Styropor und mehr - von mir aus auch mit 90 cm Schafswollematte - isolieren können, - und trotzdem bei 6 Wochen Hitzewelle 'dort oben vor Hitze verkochen' werden ? (wieso ? ich hab doch bombig isoliert !) ----> Isolation 'bremst' den Wärmedurchgang nur zeitlich ein, ***nicht aber generell*** !!! Physikalisch gebildete 'Eierköpfe' würden das so formulieren: 'nur bei einem unendlich großen Isolations-Wärmewiderstand - den es in Wirklichkeit nie gibt - würde es keine Übertragung von Wärme von der einen zur anderen Seite geben !! Natürlich kann das im praktischen Fall wirklich auch mal sehr lange Zeit in Anspruch nehmen - nämlich gerade dann, wenn wir eine 'sehr gute Isolation vorliegen haben'.

Beispiel 2 :

Dieses Beispiel soll zeigen, daß man sogar grundsätzlich richtige Statements und Bewertungen mit Vorsicht - also nicht ohne zusätzliche überprüfende Analyse - anwenden sollte.

»» " Moderne **Thermo-Fensterscheiben** sind erstklassig isoliert, es ist einer der wichtigsten energietechnischen Gewinne, alte Fenster gegen neue auszutauschen".

»» " **Heizkörpernischen in Außenwänden** sind wärmetechnisch ein großer Unsinn, weil der Wärmedurchgang durch die (ja auch noch) schmalere Nischenwandung immens ist. Es ist auch überhaupt ein Unsinn, Radiatoren (allgemein Heizquellen) an Außenwänden anzubringen."

das sind zwei bedeutende (und richtige) Regeln !

Diese haben mich dann eben auch zu der Annahme verleitet, daß im Falle unserer Wohnzimmerfenster-Außenwand durch die Heizkörpernische mehr Wärme nach außen gelangt als durch das nagelneue Thermofenster.

Nun kann ich selbst keine Thermografien anfertigen, bin aber auf die Idee gekommen, an einem kalten Wintertag die betreffenden Außenflächen einmal mit einem berührungslosen Thermometer aus dem Versandhandel (eine Art IR-Pyrometer !) zu messen (empfehlenswerte Vorgehensweise !), - und siehe da, das Fenster war unerwarteterweise ca. 2 Grad wärmer als die Heizkörper-Fensternischen-Außenwand darunter. Das war überraschend. Dies soll nun aber

nicht etwa als absolute Regel gefordert werden, sondern nur als 'trauschauwem' (traust Du auch wem)-Effekt. Es sind da ein paar Dinge, die ja auch noch wichtig sind: erstens ist das Fenster als leichter Reflektor kein grauer Strahler und damit die gemessene Temperatur nicht korrekt. Zweitens hängt der Wärmedurchgang durch die Nischenwand von der Potentialdifferenz ΔT ab, also ganz schlicht gesagt vor allem von der Temperatur des Radiators innen (verstanden? -- nein ---> ein weiterer Grund, das Vorliegende mal durchzugehen !!). Im übrigen könnte die Nischenwand bei unserem Haus recht gut isoliert sein. Oder es könnte gar die laterale (seitliche) Wärmeleitung in der Außenwand so gut sein, daß die Heizkörpernischen-Wärme seitlich 'abgezogen wurde'. Sie sehen, was da alles beachtet werden muß !! Aber auch ganz grob gesehen ist die Beobachtung - wie gesagt - schon etwas überraschend. Man kann daraus trotzdem auf jeden Fall eine richtige Regel herleiten: es ist zumindest genauso oder nicht minder nützlich, an kalten Tagen (wenigstens über Nacht) die Fenster mit den Rolläden zu verschließen, wie eine aufwendige Isolation der Heizkörpernische durchzuführen (die natürlich trotzdem auch nicht schlecht ist!!). Und schon geht es weiter: Frauen (Entschuldigung für dieses Klischee) schließen fast immer die Rolläden auf 'Sichtspalt' (es soll ja noch etwas Licht und Luft hereinkommen !!!). Damit ist die Hälfte des Effekts schon wieder 'im Eimer', denn die beste Isolationswirkung hat eine 'stagnierende Luftschicht' - das Grundprinzip aller porösen Isolierwerkstoffe (verstanden? -- nein ---> ein weiterer Grund, das Vorliegende mal durchzugehen !!) ---- Und es geht noch weiter: häufig zieht es durch die Rolladenkästen von außen 'wie der Teufel' (durch Fremdeinwirkung erzwungene Konvektion). Da gibt es aber einige technische Möglichkeiten, dies zu vermeiden!! Ich habe z.B. ganz einfach eine 'Besenleiste' wie sie für den unteren Eingangstürensplatt angeboten werden am Außensplatt zwischen Rolläden und Rolladenkasten angebracht (aber Vorsicht, der Rolladen läuft dann meist etwas schwerer !!!)

Beispiel 3 :

Eine Fassade und Fensterfront unseres Hauses ist ziemlich genau nach Osten ausgerichtet. Im Sommer an ganz heißen Tagen haben wir die Rolläden morgens geschlossen und sie dann mittags zur besseren Belüftung wieder hochgezogen, wenn wirklich keine Sonne mehr herrscheint . Trotzdem wurde es immer wärmer in den Räumen. Zunächst war die Meinung, daß noch zu viel warme Luft hereinkommt. Dann hätte aber ein Schließen der Fenster eine Änderung bringen müssen, - was nicht der Fall war. Bis wir endlich bemerkt haben, daß hier noch eine beträchtliche Menge Strahlungswärme vorhanden war, einmal aus diffuser Einstrahlung, zum anderen aber viel mehr vom Nachbarhaus kommend, dessen weiße Fassade wie ein Reflektor wirkt. Ein längeres Beschatten der Einstrahlungsfläche durch die Rolläden hat dann Abhilfe geschaffen. Ähnlich ist meine Beobachtung, daß grün gefärbte Sonnenschirme, Markisen, etc. besser Wärme absorbieren als andersgefärbte !! (Grün als Komplementärfarbe zu Rot/Infrarot)

Ich würde mich freuen, wenn ich Sie soweit gebracht habe, dass Sie alle wärmetechnischen Belange, die ihnen 'so über den Weg laufen' sachlich kritisch betrachten und versuchen, die ablaufenden Vorgänge zu begreifen und dann selbst zu bewerten. Kritisch sollten Sie auch Anpreisungen und Statements in Werbung und Presseinformationen betrachten. So ist die fast religionsmässige Anpreisung von Isoliermassnahmen bei Immobilien hin und wieder schon sehr fragwürdig. Es geht dabei ja nicht darum, dass Energie-Einsparung und Wärmedämmung wichtig sind, es ist nur zu bewerten, mit welchem Aufwand das betrieben wird und was es letztlich im diskreten Fall bringt (siehe z.B. folgenden [Artikel](#), pdf 74k). Sehr aufschlussreich ist da zum Beispiel folgende [Website](#), die Sie mal 'durchstöbern' sollten.

So, das sollte als Motivation genügen. Natürlich ist es auch gleichzeitig Zielsetzung dieses online-Info-Kurses, Schülern und Studierenden einmal eine andere Perspektive zum Verstehenlernen des Metiers 'Kalorik' zu bieten. Lassen Sie sich auch nicht entmutigen, wenn Sie im folgenden manche Formalismen oder gar echten Formeln nicht verstehen, das ist mehr für solche Leser gedacht, die besser in derartigen Kategorien denken können. Halten Sie sich dann lieber an die modellhaften oder bildhaften Beschreibungen, das bleibt eh besser 'hängen'. Es kann auch sein, daß Ihnen das Gebiet 'Strahlungswärme' etwas zu kompliziert ist, dann versuchen Sie zunächst mal nur, die anderen Kapitel zu lesen !

Gliederungsübersicht:

1. [Wärme ?](#)
2. [Wärmeübertragung](#) (Phänomene, Mechanismen)
 - [Wärmeübertragung durch direkte stoffliche Ankopplung](#)
 - [Wärmeübertragung durch Wärmeleitung](#)
 - [Wärmeübertragung durch Konvektion](#)
 - freie Konvektion
 - erzwungene Konvektion
 - [Wärmeübertragung durch Strahlung siehe extra Kap. 4.\)](#)
3. [Wärmeübergang / Wärmedurchgang](#) (Praxis)
 - [Wärmeübergang](#)
 - [Wärmedurchgang](#)
 - [Beispiele](#)
4. [Wärmeübertragung durch Strahlung](#) (Phänomene, Praxis)

Gesetze von:

- Stefan-Boltzmann
- Planck
- Kirchhoff
- Wien

Beispiele:

- Strahlungswärmetausch zwischen 2 Platten
- thermische Solarkollektoren

5. pdf-File vom Momentan-Status (16.01.2006)

Für Leser, die im weiteren Sinne mit Chemie befasst sind, hier eine Literaturempfehlung, die hinsichtlich Wärmelehre durchaus parallel zum Vorliegenden durchgesehen werden kann. Es handelt sich dabei um ein Cartoon-Buch (The Cartoon Guide to Chemistry). Ich habe das Buch erst längere Zeit nach der Verfassung des Vorliegenden angeschafft und musste zu meinem Erstaunen feststellen, daß viele Dinge dort sehr ähnlich erklärt werden, -natürlich ausschließlich im Sinne der Bedeutung der Wärmelehre in der Chemie.

|

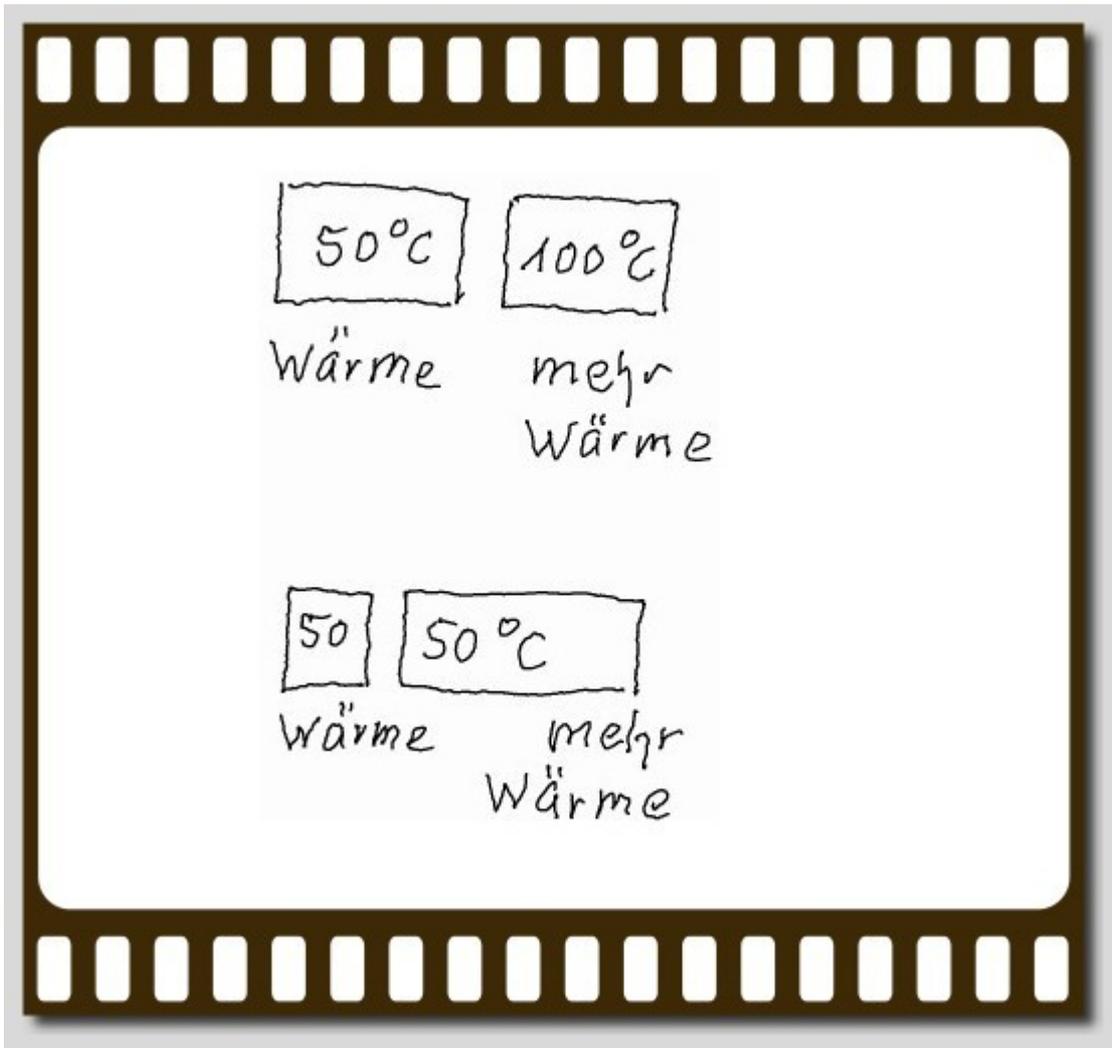
1.) Wärme?

Wir Menschen sagen zwar: "es/das ist sehr warm/kalt", - aber wir haben im Grunde keine 'Sensorik' für *Wärme* eingebaut, - wenn wir 'solches' sagen, meinen wir nämlich genau genommen "es/das hat eine 'hohe/niedrige' **Temperatur**". Wir Menschen messen also mit 'unseren Sinnen' die Temperatur. Wärme ist dagegen ein 'Zustand' der Stoffe, der sich nach außen hin erkennbar 'nur' in der 'Potentialgröße' Temperatur äußert, - und diese ist ja bekanntlich und Gott sei dank 'gut' messbar.

Wärme ist physikalisch gesehen eine Größe, die den (wärmetechnischen=thermischen) Energie-Inhalt des Stoffes charakterisiert, - also eine energetische Zustands-Größe und für uns deshalb etwas abstrakter als die von uns Menschen 'erfühlbare' Potentialgröße 'Temperatur'.

Etwas verständlicher als 'nur so' **Wärme** sind vielleicht die Begriffe **Wärmeinhalt** eines Körpers oder **Wärme-Energie**, die in einem Körper 'steckt', weil da schon dessen Masse und Oberfläche neben seiner Temperatur als Einflußgrößen 'erahnt' werden können. Betrachten Sie einmal das folgende Schema. Es sollen lauter Quaderklötze aus beispielsweise Eisen betrachtet werden. Die Wärme, oder besser des Wärmeinhalt des Klotzes mit 100 °C wird bei den beiden gleichgroßen Klötzen oben in der Abbildung größer sein. Die beiden Klötze unten in der Abbildung haben die gleiche Temperatur, hier wird aber der größere Klotz einen größeren Wärmeinhalt aufweisen (denken Sie nur z.B. an die Verwendung als 'Bettflasche', oder kennt man das heute womöglich gar nicht mehr !!). Man könnte das Beispiel noch erweitern um Materialeigenschaften (Polystyrolklotz,

Bleiklotz) und um äußere Oberflächen, denken Sie selbst darüber nach, wenn Sie schon entsprechend 'sattelfest' sind !.



Modellvorstellung mit Eisenklötzen

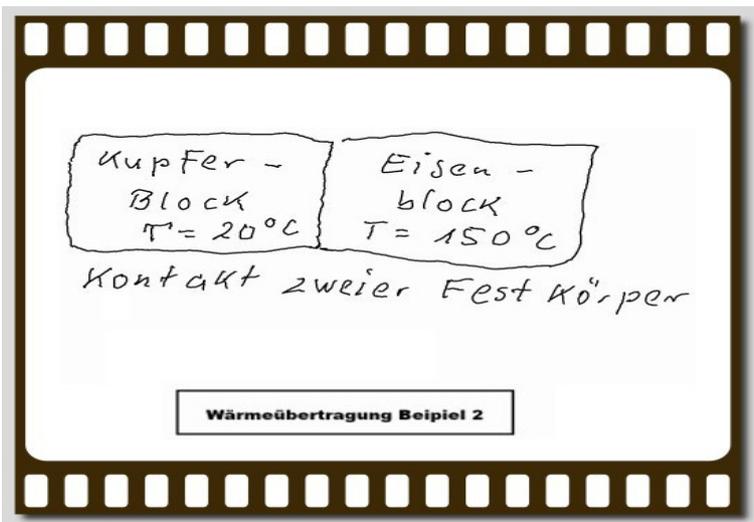
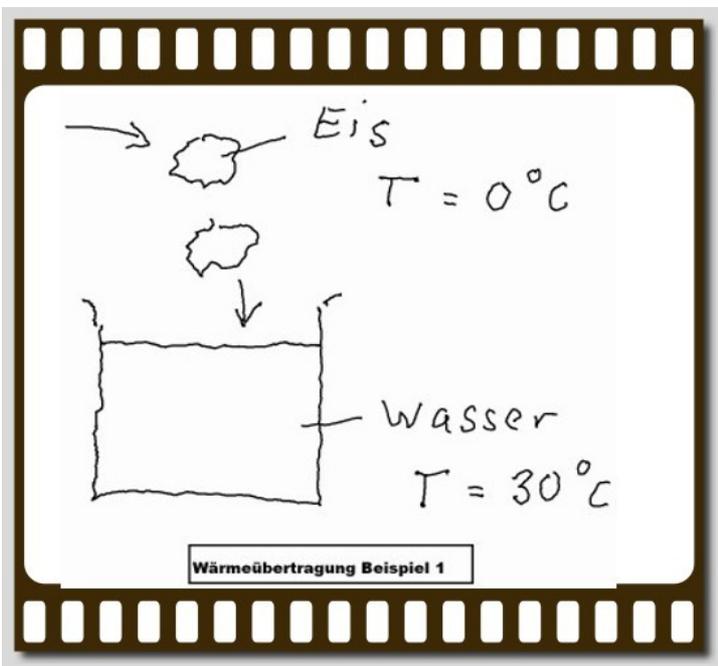
Das kann man vergleichen mit der Elektrizitätslehre: dort ist die Potentialgröße die Spannung U (entspricht der Temperatur T), die Energiegröße N hingegen das Produkt aus Spannung U und Strom I ($N=U \times I$).

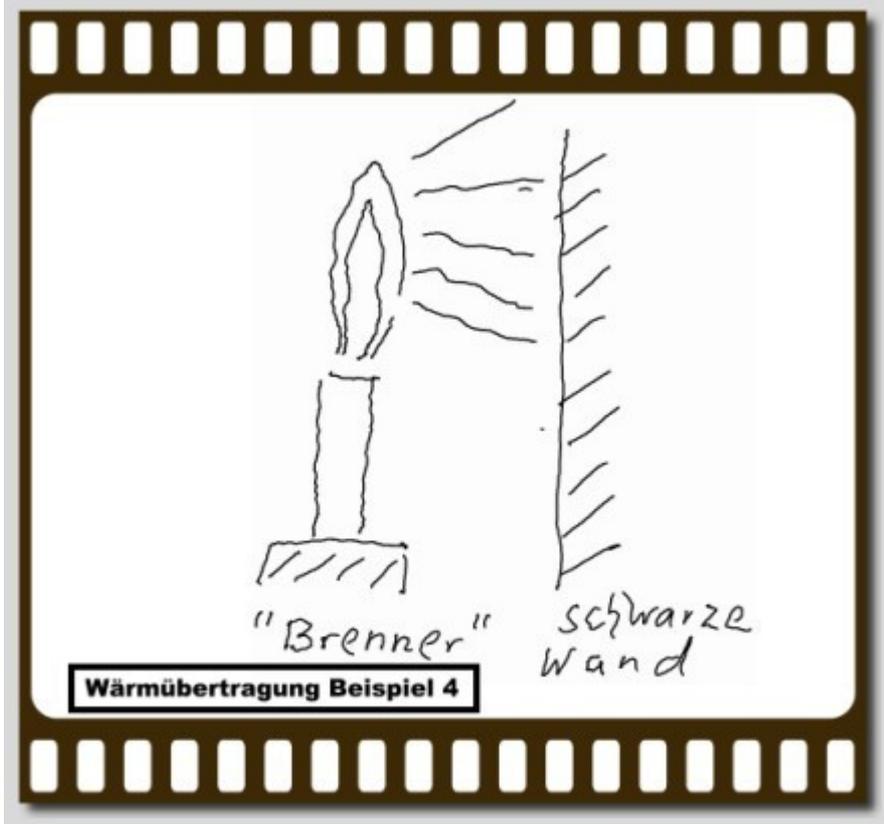
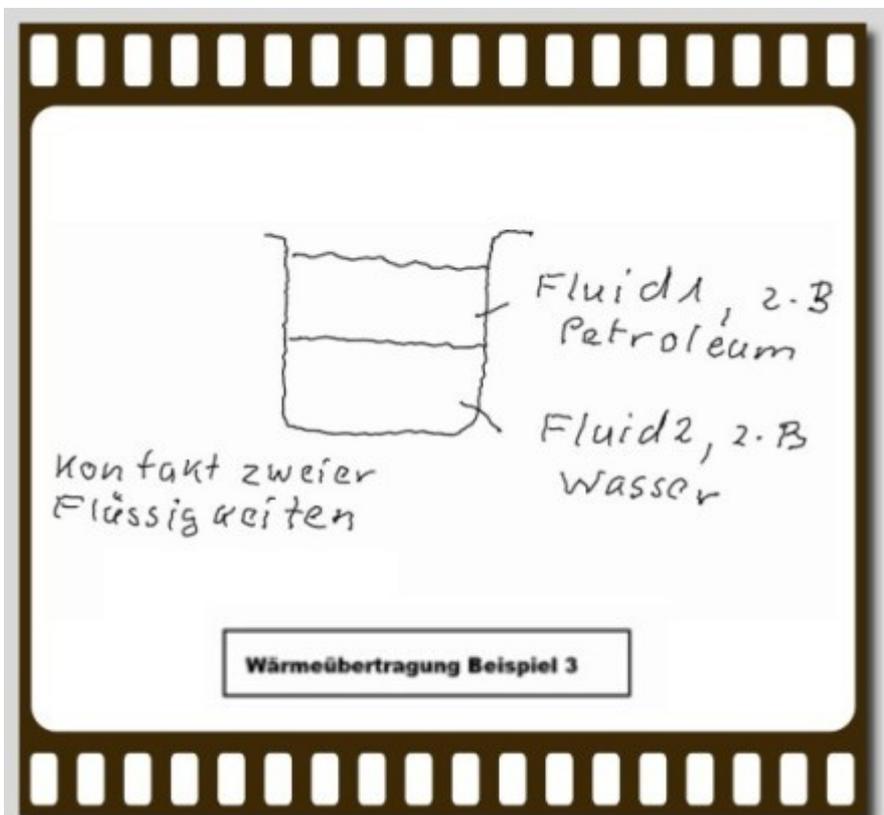
Wenn nun Wärme ein energetischer Zustand der Materie ist, wovon hängt ihre Größe dann eigentlich ab ? Die Wärme oder auch 'der Wärmeinhalt' eines Körpers ('Blockvolumen' eines beliebigen Stoffes) ist proportional zu seiner Masse, seiner Temperatur und zu einem spezifischen 'Stoffkonstanten-Wert' = 'spezifische Wärme'. Leider können wir praktisch gesehen mit einem derartigen 'sozusagen alleinstehenden' Energieinhalt eines Körpers - charakterisiert durch seine Temperatur - eigentlich gar nichts anfangen. Wir 'sehen' diesen erst, wenn wir von unserem betrachteten Körper Wärmeenergie 'abziehen' oder ihm Wärmeenergie 'zuführen' (ihn abkühlen und erwärmen), das heißt: **Wärme**

übertragen.

In der Elektrizitätslehre ist das ähnlich: Eine Spannung von 220 V können wir zwar mit dem Voltmeter messen, - die mit diesem Potential verbundene Energie 'sehen' wir aber eigentlich nicht. Erst, wenn wir eine Glühbirne anschließen und ein Strom fließt, dann 'tut sich sichtbar etwas' (-- oder, wenn wir mit den Fingern beide Drähte berühren und 'eine gewischt kriegen', -- oder, wenn wir zu viel Strom ziehen, haut es die Sicherung hinaus, weil wir die Steckdose energetisch überfordert haben).

Wärmeübertragung formelmässig erfassen: [Kalorik-Formel für etwas Interessiertere](#), eine globale Berechnung der übertragenen Wärme, zum Beispiel für Bilanzierungszwecke. Grundlage [kalorimetrischer Messungen](#)





4 skizzenhafte Beispiele für Wärmeübertragung:

Fest/Fluid-Kontakt mit Schmelzvorgang, Festkörperkontakt, Flüssigkeitskontakt, Strahlungswärme

Die Wärme(-menge) oder der Wärmeinhalt eines Körpers ist eine physikalische Zustandsgröße, die von der Masse, der Stoffart und vor allem von der thermischen Potentialgröße Temperatur abhängt. Wärme-Energien sind vor allem bei ihrer Übertragung auf andere Körper oder Systeme 'erfassbar/erkennbar'. Bei der Übertragung von Wärme-Energie spielt die Temperaturdifferenz als treibende Kraft eine wesentliche Rolle.

Wenn man in den 'mikroskopischen Bereich' der Materie ('Atomistik') hineinschaut, erkennt man, daß der Wärmeinhalt der betrachteten Materie bestimmt wird durch die atomaren und molekularen Teilchenbewegungen der Teilchen, aus denen diese Materie aufgebaut ist. Dies können z.B. Schwingungen von Atomen in einem Feststoff-Kristallgitter sein, oder Schwingungen und Rotationen von Molekülen eines Stoffes, oder Translationsbewegungen von Molekülen in Gasen und Flüssigkeiten.

Also salopp gesagt, je mehr die Dinger herumzappeln und herumflutschen, desto wärmer (energiereicher) ist der betrachtete Stoff. Hieraus ergibt sich eine 'Philosophie', die in der Thermodynamik noch tiefgründiger gedeutet wird (Entropie-Begriff): Kälte ist Erstarrung in den geordneten Zustand, Wärme ist Chaos.

2.) Wärmeübertragung

Da Wärme eine Form von Energie ist, ist Wärmeübertragung eine Energieübertragung. Energieübertragungen können allgemein gesagt dann stattfinden, wenn Potentialunterschiede vorliegen. Dies wurde für die Wärme schon im vorhergehenden Abschnitt gezeigt: Wärme wird übertragen, wenn eine Temperaturdifferenz ($\Delta-T$) vorliegt und zwar 'freiwillig ablaufend' von einem wärmeren Körper auf einen kälteren (Unter 'immenser Energie-Aufwendung' kann Wärme auch von einem kälteren Körper zu einem wärmeren 'hinaufgeschaufelt' werden. Um das zu verstehen, benötigt man aber 'die höheren Weihen der Thermodynamik' und die alte Bauernregel: 'von nichts kommt nichts').

Es gibt nun verschiedene Formen der Wärmeübertragung, je nachdem, welches 'System' vorliegt. Übergeordnet unterscheiden wir:

- **Wärmeübertragung durch direkte stoffliche Ankopplung**
- **Wärmeübertragung durch Strahlung**

Die zweite Form der Wärmeübertragung mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung ist etwas komplizierter, sie soll in diesem Info-Kurs zum Schluß in [Kap. 4.\)](#) behandelt werden. Dies heißt aber nicht, daß diese Übertragungsform unbedeutend wäre, ganz im Gegenteil !

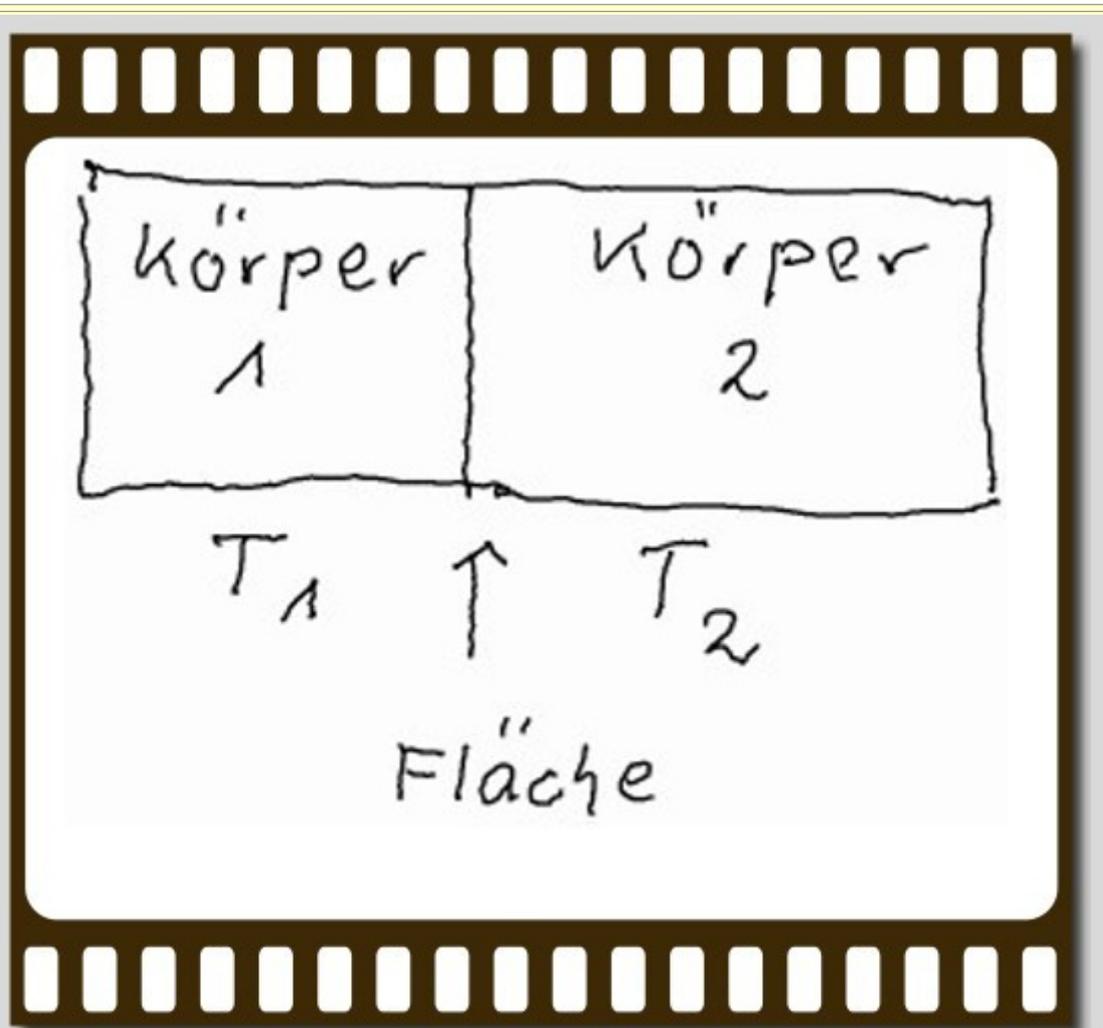
Bei der Übertragung durch direkte stoffliche Ankopplung gibt es folgende 'Erscheinungsformen' oder besser Übertragungs-Mechanismen:

- **Wärmeübertragung durch Wärmeleitung**
- **Wärmeübertragung durch Konvektion**
 - freie Konvektion
 - erzwungene Konvektion

Welcher Mechanismus vorliegt, hängt sehr stark vom stofflichen System ab. In der Technik (hauptsächlich) unterscheidet man zwischen festen und fluiden Medien, - man fasst also das 'flüssig' und 'gasförmig' der Naturwissenschaften begrifflich zu 'fluid' zusammen. Fluid kann dann zum Beispiel aber auch eine 'Wirbelschicht' sein oder ein Fördergut der pneumatischen Förderung (Feststoff in Gas suspendiert!!) oder eine Suspension (flüssig/flüssig) u.a. Konvektion tritt mehr bei fluiden Systemen auf. Wärmeleitung dagegen in beiden Systemen, aber häufiger in festen Systemen !

Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

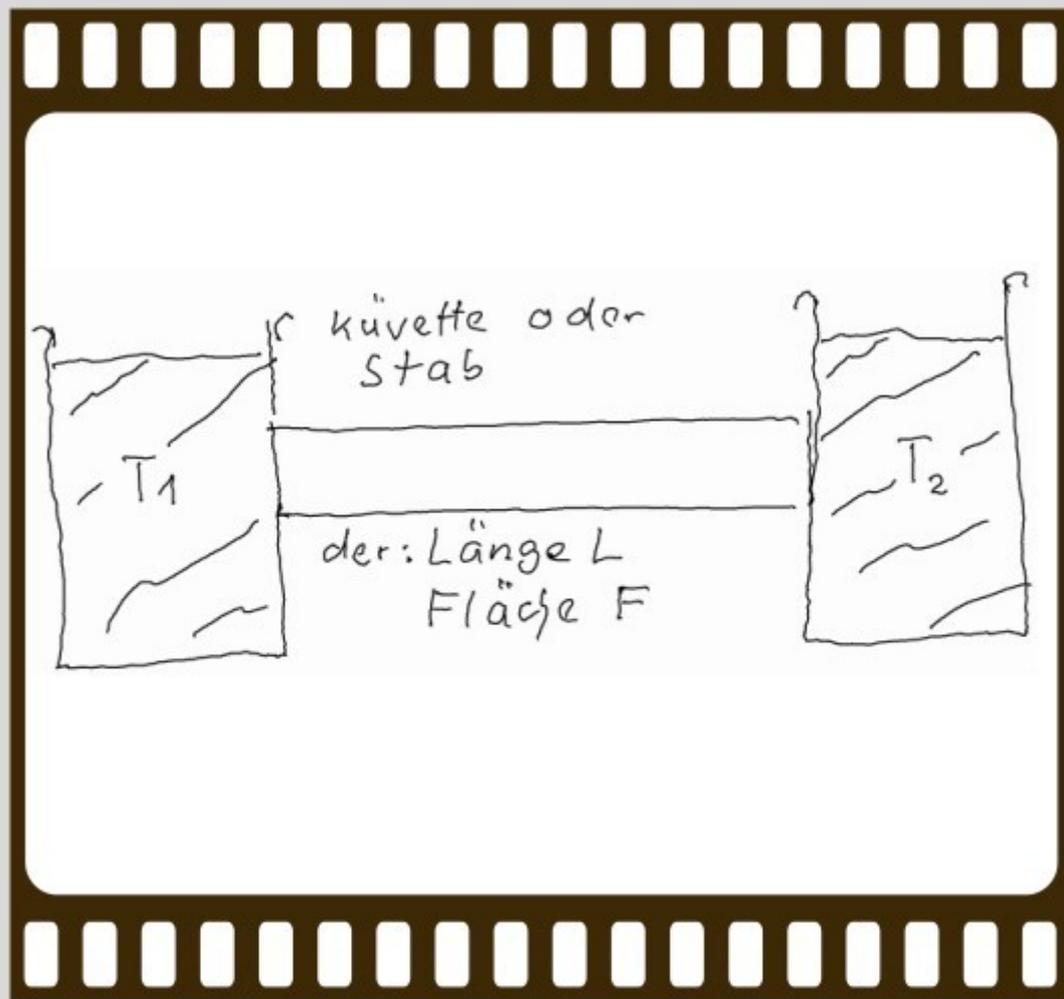
Den Vorgang der Wärmeleitung haben wir vorliegen, wenn feste Körper mit festen Körpern in (vollständig **spaltfreiem**) Kontakt miteinander sind. Das könnte zum Beispiel so skizziert werden:



Wärmeübertragung durch Wärmeleitung in Festkörpern

Wir können für diesen Fall zwar leicht aus der Kalorikformel für die globale Wärmeübertragung die [Mischtemperatur berechnen](#), die nach Wärmeausgleich erreicht wird: (nicht Formelbegeisterte können das überspringen und sich nur merken: man kann da die Mischtemperatur nach der Kalorikformel berechnen!) , - den dynamischen Prozess der Wärmeleitung zwischen den Blöcken (sprich: den Wärmefluß vom warmen in den kalten Block hinein) können wir aber hier leider nicht so leicht beschreiben, deshalb wenden wir uns einer alternativen Anordnungsmöglichkeit zu, die für uns einfach 'informativer und verständlicher' ist!!

Man könnte nämlich auch folgende Anordnung 'zusammenbasteln':



Schema einer Anordnung zur 'Messung' von Wärmeleitfähigkeiten

(Anmerkung: gerade das, was auf der rechten Skizzenseite ein wenig 'daneben' gegangen ist, darf natürlich nicht sein: ein Spalt des Vorratsbehälters zum Probandenstab !!)

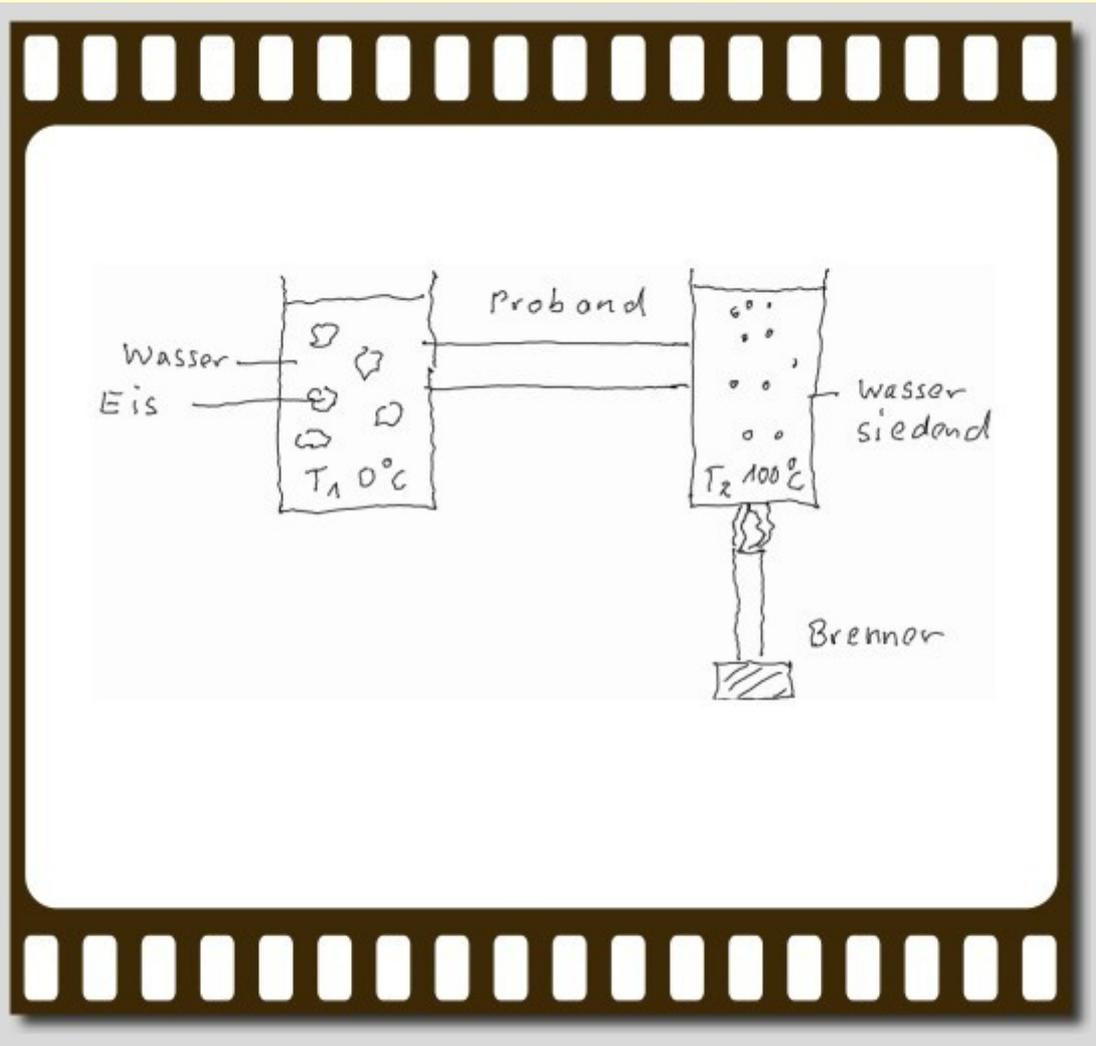
Das könnte man als 'Feststoff-Wärmebrücke' bezeichnen.

Nebenbei, - ist Ihnen die Formulierung 'spaltfreier Kontakt' und die Betonung darauf oben aufgefallen? Diesem Punkt müssen wir uns später noch zuwenden. Bei Elektronikbastlern müsste es hier 'klingeln': das ist doch die Sache mit der Wärmeleitpaste oder dem Glimmerplättchen beim Kühlkörper-Montieren in der Halbleitertechnik! (richtig!!)

Theoretisch hätten wir übrigens auch dann den Vorgang der Wärmeleitung vorliegen, wenn als 'Kontaktpartner' echt mechanisch unbewegte Fluide (Flüssigkeiten oder Gase) vorliegen. Dies ist aber in der Praxis nicht so einfach zu realisieren. Es spielt aber bei der anschließenden modellhaften Betrachtung von Wärmeübergängen und Wärmedurchgängen bei Vorliegen fester Wände mit fluider Umgebung eine Rolle.

Für die formelmäßige Beschreibung des Wärmeleitvorgangs und für die experimentelle Ermittlung von Wärmeleitzahlen ist es vernünftig, folgende

Anordnung zu wählen, sie ist eigentlich identisch mit der Abbildung 'Wärmeleitbrücke' oben, nur sozusagen etwas 'eleganter':



'Verbesserte' Anordnung zur Messung von Wärmeleitfähigkeiten

hiermit können wir das **Fourier'sche Gesetz zur Wärmeleitung** [herleiten](#):

$$Q/t = F \times 1/L \times \lambda \times \Delta T$$

mit:

F = Querschnittsfläche des 'Leiters', L = Länge des Leiters, λ = Wärmeleitzahl, ΔT = Temperaturdifferenz

Die pro Zeiteinheit durch **Wärmeleitung** übertragene Wärmemenge ist proportional zur Temperaturdifferenz, zur Querschnittsfläche, zum spezifischen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und umgekehrt proportional zur Länge des Leiters. (Fourier-Gesetz)

Wärmeübertragung durch Konvektion

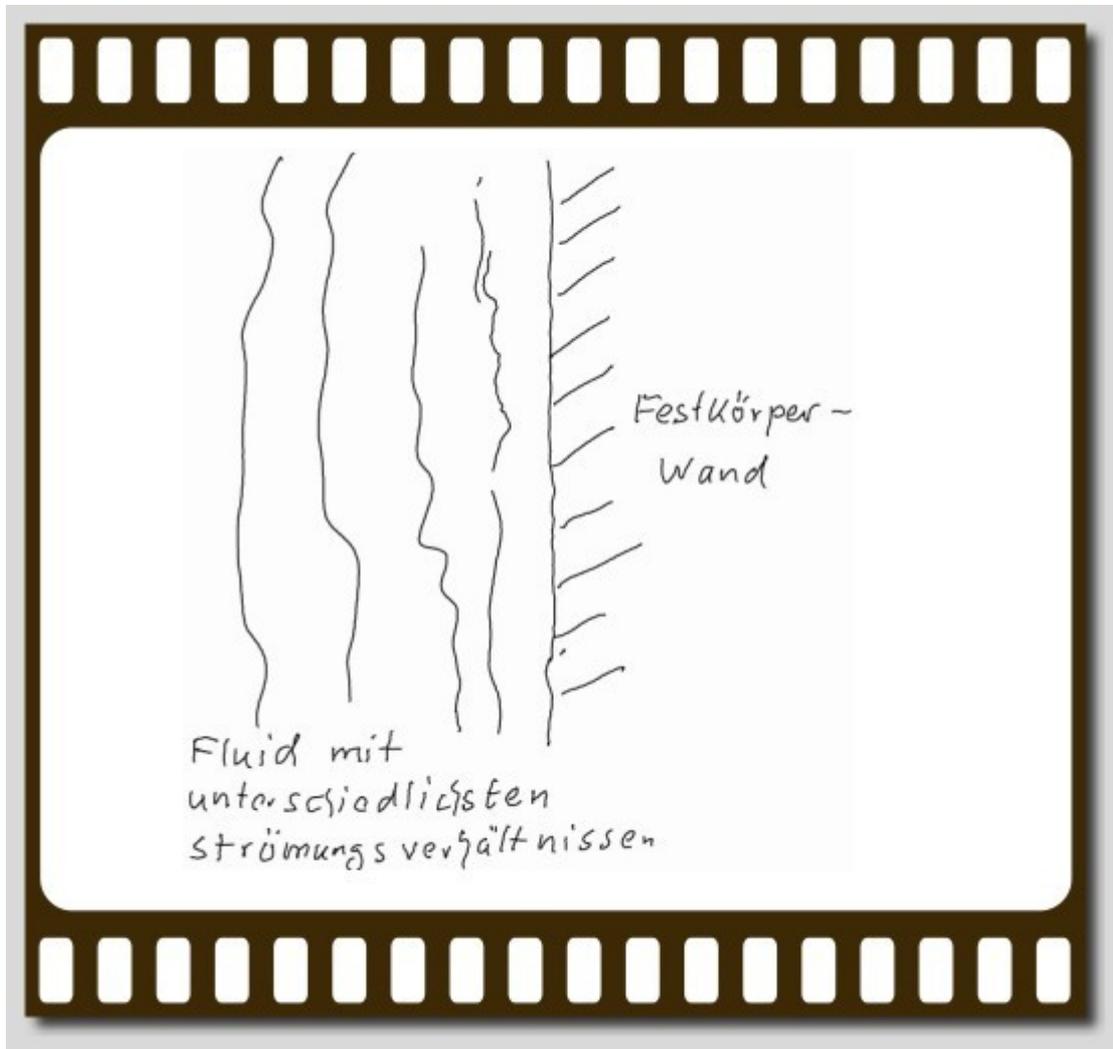
Wärmeübertragung durch Konvektion kann in fluiden Medien beobachtet werden. Konvektion bedeutet, daß im fluiden Medium eine Umschichtungs- oder Umwälzungsbewegung stattfindet, die von fluidmechanischen Prozessen ausgeht und nicht von molekularen oder atomaren Bewegungen. So ist die Segelfliegen wohlbekannte Thermik ein konvektiver Vorgang, es liegt hier **freie Konvektion** vor, die durch den Wärmeschichtungseffekt hervorgerufen wird. Freie Konvektion hat man auch in einem Topf oder Becherglas in dem eine Flüssigkeit am Boden erwärmt wird. Warme Fluidelemente steigen aufgrund ihrer geringeren Dichte auf, kalte sinken ab, es tritt eine Umschichtungsbewegung ein. Im Unterschied zur freien Konvektion werden bei der **erzwungenen Konvektion** strömungsmechanisch Fluidbewegungen erzeugt, ganz 'brutal deutlich' zum Beispiel durch ein Umwälzorgan (Pumpe, Ventilator) hervorgerufen. Es ist verständlich, daß der Wärmetransport in Fluiden bei Vorliegen von Konvektion größer ist als in absolut statisch ruhenden Fluiden (die es - wie gesagt - praktisch auch fast gar nicht gibt). Wie groß der konvektive Effekt ist, hängt vom Strömungszustand oder vielleicht besser gesagt vom Strömungsbild im Fluid ab. Man unterscheidet in der technischen Physik zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Beim turbulenten Strömungsbild liegen im bewegten Fluid einfach ganz intensive Verwirbelungen und Umwälzungen statt, die so stark sind, daß eine fast perfekte Vermischung im Fluid stattfindet. Bei Strömungen in Rohren werden z.B. mit turbulenten Strömungen nahezu ideale Pfropfströmungen erzeugt, - dies spielt in der chemischen Reaktionstechnik beispielsweise eine Rolle (Rohrreaktoren). Der Wärmetransport in turbulenten Strömungen wird also sehr effizient sein !! Bei laminarer Strömung bewegt sich das Fluid in parallel aneinander gleitenden Schichten, die 'in sich gesehen' modellhaft fast als statisch ruhend angesehen werden können. Hier wird die Wärme quer zur Strömung gesehen durch Wärmeleitung in diesen Schichten transportiert, das geht natürlich nicht so effektiv, wie beim turbulenten Fall. Nun hat die aus alledem leicht abzuleitende Forderung, möglichst turbulent zu 'strömen' um eine möglichst effektive konvektive Wärmeübertragung zu erreichen, einen kleinen Pferdefuß in der Praxis: wenn die Strömung an sich turbulent ist, aber das Fluid an einer festen Wandung 'entlangströmt', bildet sich - bedingt durch das 'Anhaften' des Fluids an der Wandung - eine Randschicht mit laminarem Strömungsbild. Dies ist für die anschließenden Betrachtungen von Wärmeübergang und Wärmedurchgang sehr wichtig. Wie kann man nun in der Praxis entscheiden, ob laminare oder turbulente Strömung vorliegt ? Dies geschieht - wie in der Technik üblich - mit Kennzahlen oder Kennzahlenzusammenhängen, die uns 'sagen' in welchem Regime (Bereich) des betrachteten Vorgangs wir uns befinden. Im Falle der Strömung ist das die bekannte Reynolds-Zahl.

3.) Wärmeübergang und Wärmedurchgang

In der allgemeinen und technischen Praxis (z.B. Bau-Physik, thermische

Verfahrenstechnik etc.) liegen eigentlich immer Systeme vor, bei denen Fluidbereiche durch Wandungen getrennt sind (Haus-/Zimmerwände, Wärmetauscher, Fahrzeugkühler, Klima- und Kältegeräte, Heizkessel, Radiatoren

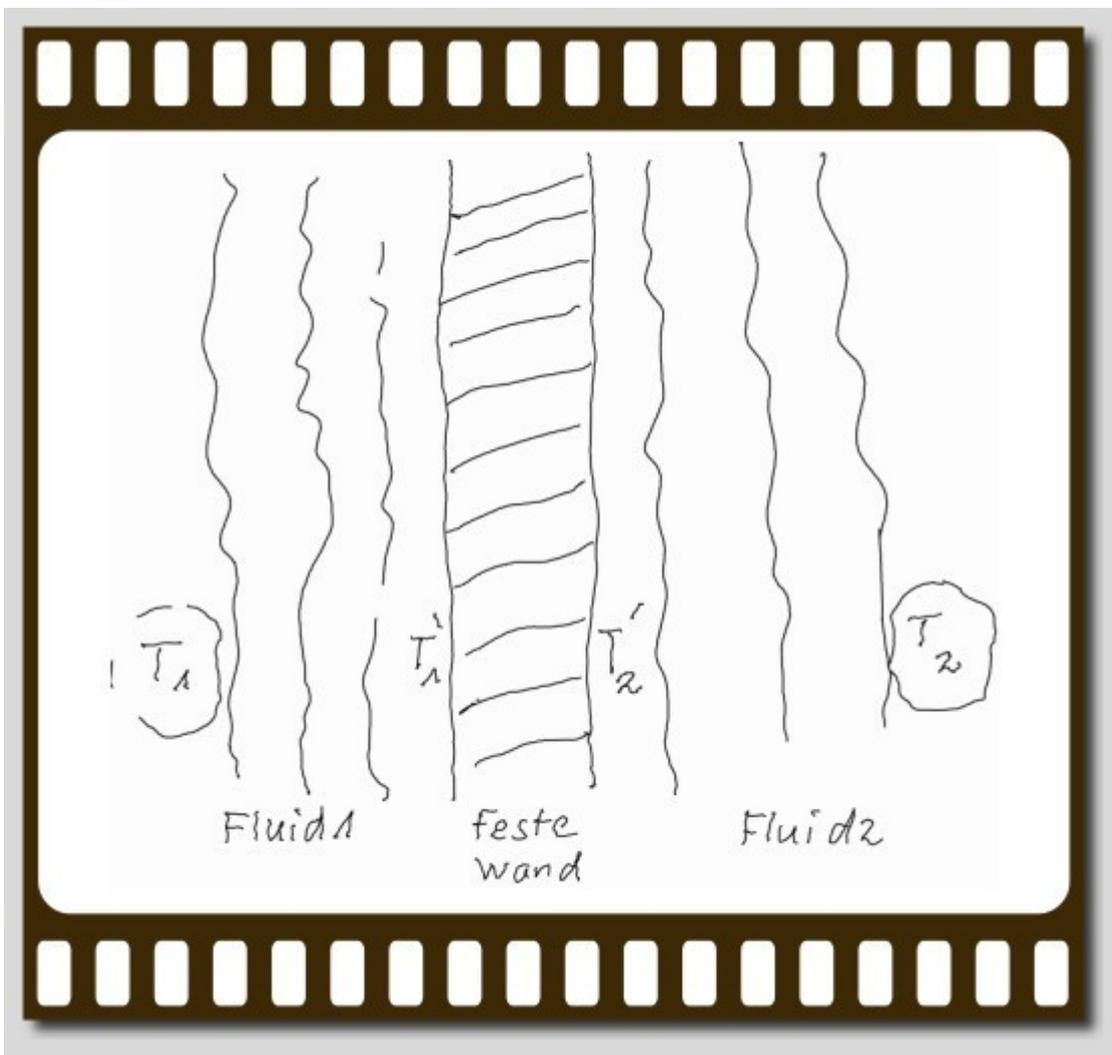
Bei der genaueren Betrachtung derartiger Vorgänge begegnet man fast immer einem 'Teilschritt' des Gesamtvorgangs, bei dem Wärme aus einem Fluid an eine feste Wand oder Wärme von einer festen Wand an ein Fluid übertragen wird:



Wärmeübergang schematisch (die Strömung im Fluid kann turbulent, laminar oder völlig stagnierend sein, - ihr Einfluß ist allerdings enorm)

diesen Vorgang nennt man **Wärmeübergang**

Bevor wir diesen Vorgang näher betrachten, gehen wir gleich einen Schritt weiter. In der Praxis begehen wir bei weitem öfters einer Anordnung, bei der der angesprochene Wärmeübergang nur einen Teilschritt darstellt. Häufig befindet sich hinter der festen Wand auf der anderen Seite wieder ein Fluid. Den Vorgang der Wärmeübertragung aus einem Fluid an eine Wandung und weiter von dieser an ein zweites Fluid wird **Wärmedurchgang** genannt.



Wärmedurchgang schematisch: 1. Übergang, Wärmeleitung, 2. Übergang

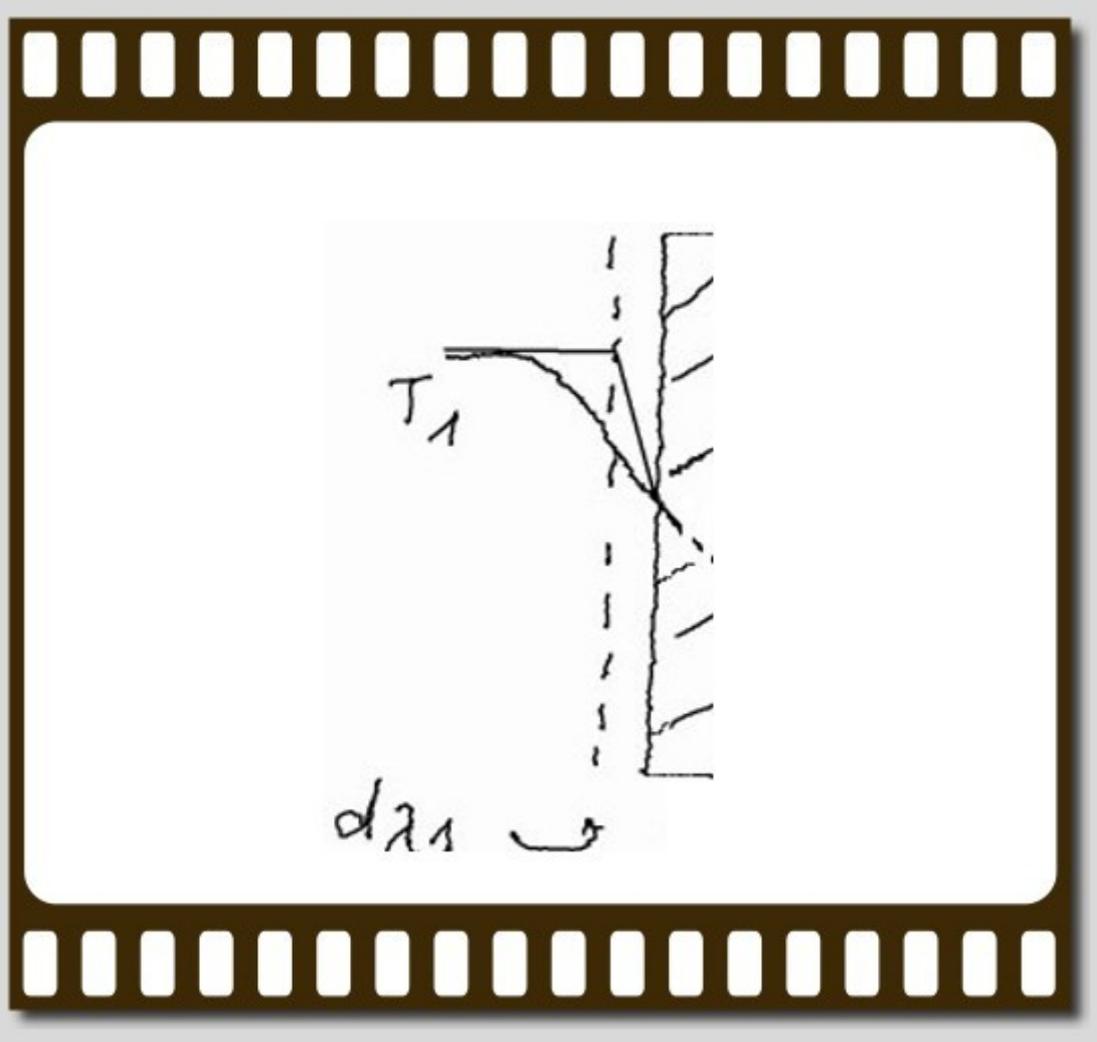
In technischen Prozessen findet die Wärmeübertragung häufig in Form eines **Wärmedurchgangs** statt. Hierbei wird die Wärme durch einen **Wärmeübergang** von einem Fluid an eine feste Wand übertragen und weiter durch **Wärmeleitung** in der festen Wand auf die andere Seite transportiert und dort durch einen weiteren **Wärmeübergang** an ein zweites Fluid abgegeben.

Befassen wir uns nun zunächst etwas gründlicher mit dem ('Teilschritt') Wärmeübergang:

der Wärmeübergang

wie schon im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, ist der Wärmeübergang zwischen einer Wand und einem Fluid, oder umgekehrt, deshalb ein relativ komplizierter Vorgang, weil neben den wichtigen Einflußgrößen (Temperatur, Fläche, Stoffdaten) vor allem der Strömungszustand eine wesentliche Rolle spielt. Um nun formal eine einfache Beziehung aufstellen zu können, 'tut man so', als ob zwischen der Temperatur an der Wandoberfläche und der Temperatur im 'Kern' des Fluids einfach ein 'linearer' Temperatursprung bestünde. Dies ist bei turbulenter Strömung 'fast' schon gut erfüllt. Man setzt dann, einmal etwas

vereinfacht gesagt, die Beziehung der 'problemlosen' Größen an und 'packt' die 'Ungereimtheiten' der Strömungs- und Stoffabhängigkeit in einen Koeffizienten (Wärmeübergangskoeffizient α). Gott sei dank kann aber gezeigt werden, daß sich dieser Koeffizient doch recht gut aus [Kennzahlzusammenhängen](#) herleiten läßt (unter Verwendung der Kennzahlen Nu = Nusselt, Pr = Prandtl, Re = Reynolds und Gr = Grashof).



Vereinfacht modellierter Temperaturverlauf beim Wärmeübergang ($d_{\lambda 1}$ = Dicke der laminaren Grenzschicht an der festen Wand)

Die Formel können wir dann eigentlich wie beim Fourier-Gesetz der Wärmeleitung rein 'intuitiv' herleiten: die pro Zeiteinheit übertragene Wärme hängt von der Temperaturdifferenz zwischen der Kerntemperatur des Fluids und der Temperatur an der Wandoberfläche ab (denn das ist ja die treibende Kraft = das Potential). Ebenso hängt sie von der Wandfläche ab (je größer, desto ...). Die Stoff- und Strömungseigenschaften 'packen' wir in α .
Damit haben wir:

$Q/t = F \times \alpha \times (T_{fl} - T_w)$ ---- für den Fall, daß das Fluid wärmer ist als die Wand
und:

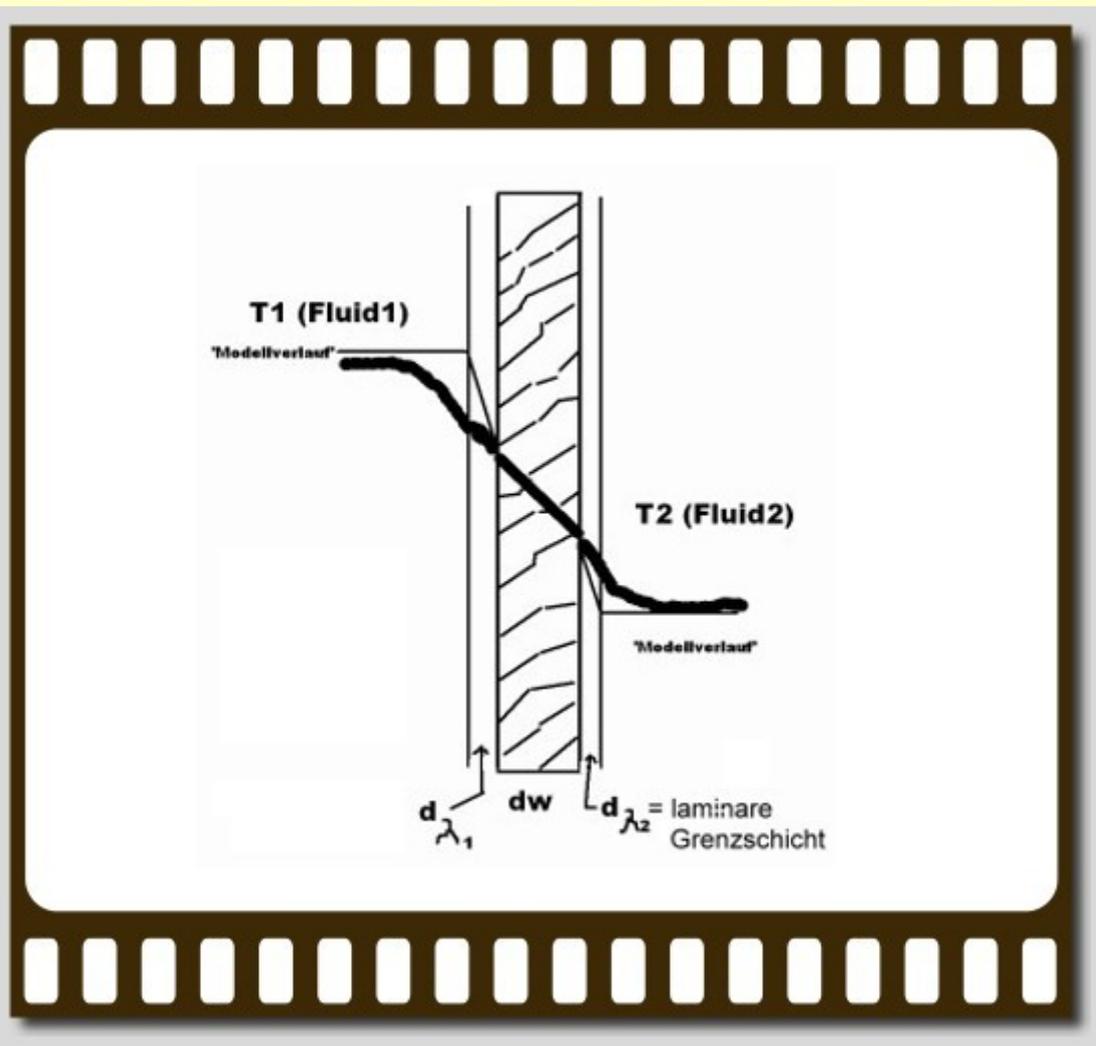
$Q/t = F \times \alpha \times (T_w - T_{fl})$ ---- für den Fall, daß das Fluid kälter ist als die Wand

dabei sind:

F = Wandfläche, α = Wärmeübergangskoeffizient, T_w = Wandtemperatur, T_{fl} = Kerntemperatur des Fluids

der Wärmedurchgang

Wie bereits erwähnt, liegt beim Wärmedurchgang im Prinzip eine Hintereinanderschaltung folgender Prozesse statt:
ein Wärmeübergang, ein Wärmeleitvorgang und nochmals ein Wärmeübergang.



Wärmedurchgang: reales Temperaturprofil und modellmäßig angenommener Verlauf mit T-Sprung in der laminaren Grenzschicht

da wir die Formeln und Randbedingungen (Vereinfachungen im Temperaturprofil etc.) für alle Prozesse jetzt schon kennen, brauchen wir eigentlich nur noch das Puzzle der Serienschaltung dem Bild entsprechend zusammenfügen:

Für die beiden Wärmeübergänge 'heiße / kalte Seite' gilt:

$Q/t = F \times \alpha_1 \times (T_{fl1} - T_{w1})$ für die 'heiße Seite' und

$Q/t = F \times \alpha_2 \times (T_{w2} - T_{fl2})$ für die 'kalte Seite'

dabei sind:

F = Wandfläche, $\alpha_{1/2}$ = Wärmeübergangskoeffizienten für Fluid 1 oder 2, T_{w1} = Wandtemperatur an der 'heißen Seite', T_{w2} = Wandtemperatur an der 'kalten Seite', $T_{fl1/2}$ = Kerntemperatur in den Fluiden 1 oder 2.

dazwischen liegt nun 'nur noch' die Wärmeleitung in der Wand:

$Q/t = F \times 1/L \times \lambda \times (T_{w1} - T_{w2})$

Aus diesen 3 Formeln können wir uns nun eine 'neue' Formel herleiten, in der die Größen der Wandtemperaturen T_{w1} und T_{w2} eliminiert sind und damit nur noch die Temperaturen in den Fluidkernen T_{fl1} und T_{fl2} vorkommen:

$$Q/t = F \times k \times (T_{fl1} - T_{fl2})$$

dies ist die **wichtige Formel für den Wärmedurchgang**, dabei ist k der so bekannte und viel zitierte ***k-Wert = der Wärmedurchgangskoeffizient*** (hallo, Häusles-Isolierer, aufgewacht !!!). Er ist aus den beiden α -Werten und dem λ -Wert zusammengesetzt nach der [Serienwiderstandsformel der Kalorik](#), die ein schönes Analogon zur Serienwiderstandsformel bei elektrischen Widerständen (und Leitfähigkeiten als Reziproke dazu!) ist, - schön, wie sich in der Natur doch irgendwie alles wiederholt!!

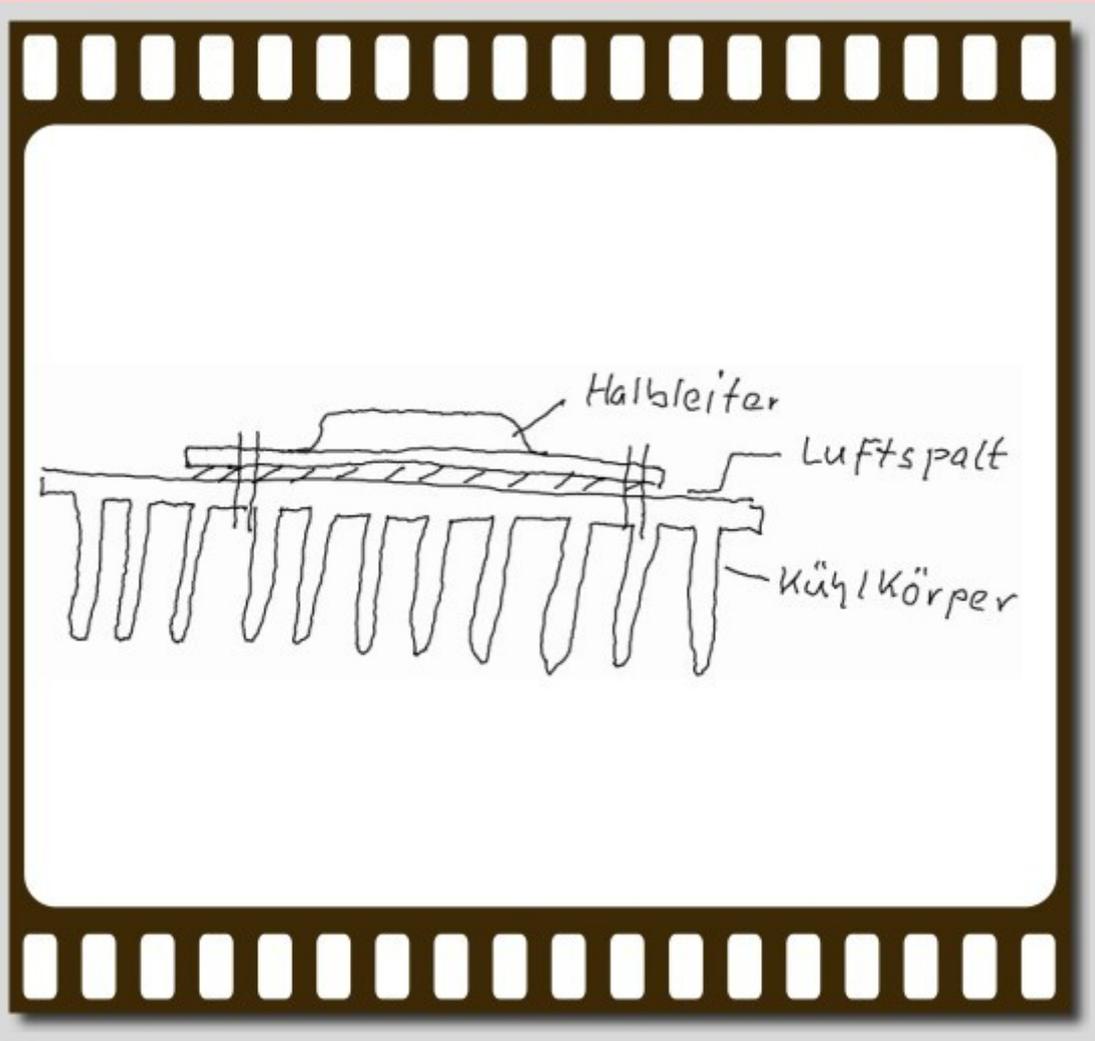
So, jetzt haben wir das Rüstzeug für Isolier-Diskussionen etc. Es ist vielleicht gut, hier nochmals ein paar ausgewählte Beispiele zu besprechen.

Beginnen wir mit dem weitgespannten Gebiet der Wärmeübertragung mit stofflicher Ankopplung bei Vorliegen **stagnierender Gas- (vorzugsweise Luft-) Schichten** und der sich daraus ergebenden Isolierwirkung poröser Stoffe.

Liegt bei einem Wärmeübertragungs-Teilschritt eines Vorgangs eine schmale, z.B. spaltförmige 'gas-(luft-)gefüllte' Lücke vor, so wird der Wärmeleitprozess an dieser Stelle durch einen schlechten Leiter 'unterbrochen', - oder besser: ein schlechter Leiter ist in der Serien-Widerstandsschaltung dazwischengeschaltet.

Das Kühlkörper-Problem

Denken wir einmal an das bereits angesprochene Halbleiter-Kühlkörper-Problem. Wenn wir (vor allem Leistungs-) Halbleiter auf Kühlkörper montieren, erwarten wir, daß die produzierte Wärme durch Wärmeleitung im direkten Kontakt an den Alukühlkörper abgegeben wird und daß dieser die Wärme wiederum über die große Tauschfläche der Kühlrippen an vorbeiströmende Luft abgegeben wird. Die Luft wird durch freie oder gar erzwungene Konvektion (denken Sie an den lauten Ventilator in Ihrem Computer) bewegt. Auf der Abgabeseite liegt also ein üblicher Wärmeübergang Feststoff/Fluid vor.



Halbleiter-Kühlkörper

(Anmerkung: der Luftspalt ist natürlich stark vergrößert skizziert)

Im Kontaktspace haben wir dagegen eine dünne stagnierende Luftschicht, die sozusagen 'unbeweglich eingesperrt' ist. Nun werden Sie sagen: "und der dünne Spalt soll die Wärmeleitung gleich so dramatisch 'ausbremsen' ??". Und ich muß

Ihnen ehrlich sagen, ich kann's manchmal auch fast nicht glauben: "das soll soviel ausmachen, daß der Halbleiter 'durchbrutzeln' kann ??" Na ja, schau'n wir uns einmal die Wärmeleitzahlen an. In einem Physik- oder Tabellenbuch finden wir:

λ ist für Aluminium im Bereich 0-200 °C 0,55 / cal cm⁻¹ s⁻¹ Grad⁻¹ /

für Luft finden wir: λ bei 0 °C: 0,0000576 /gleiche Dimesion/

und bei 100 °C: 0,000074 /gleiche Dimension/

Also: die Wärmeleitfähigkeit von stagnierender Luft ist ca. 10000 mal schlechter, als die vom Aluminium des Kühlkörpers und der Halbleiter-Grundplatte. Wenn man z.B. fünf hundertstel Millimeter Luftspalt nimmt, dann ist das bei ca. 50 mm Leitungsweg zwar nur 1/1000 - Anteil am Widerstand, durch das lamda von Luft wird die Leitfähigkeit aber um das 10000 - fache eingebremst. Die Wärmeleitfähigkeit wird also mindestens ca. 10 mal schlechter.

Mit der Praxis der Anbringung von Wärmeleitpaste oder Glimmerplättchen kommen wir für λ grob in den Bereich 0,005-0,05 /gleiche Dimension/. Das ist eine Verbesserung um den Faktor 10-100 . Damit haben wir den Spalt-Effekt kompensiert.

das Leidenfrost'sche Phänomen

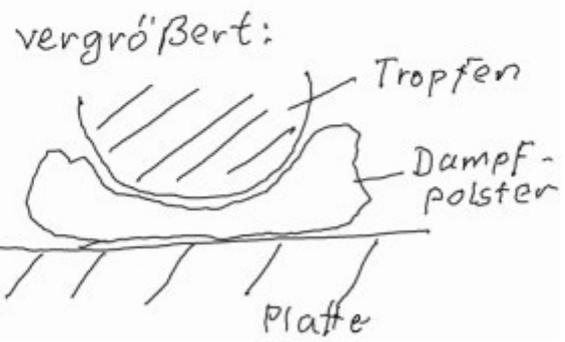
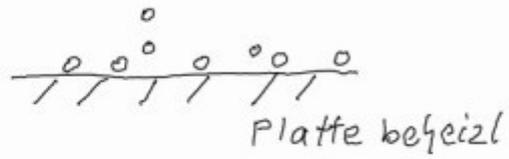
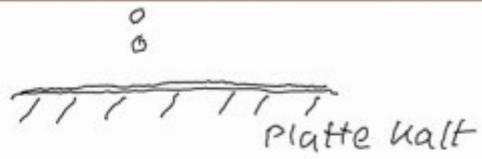
Hand aufs' Herz, wissen Sie was das ist ?

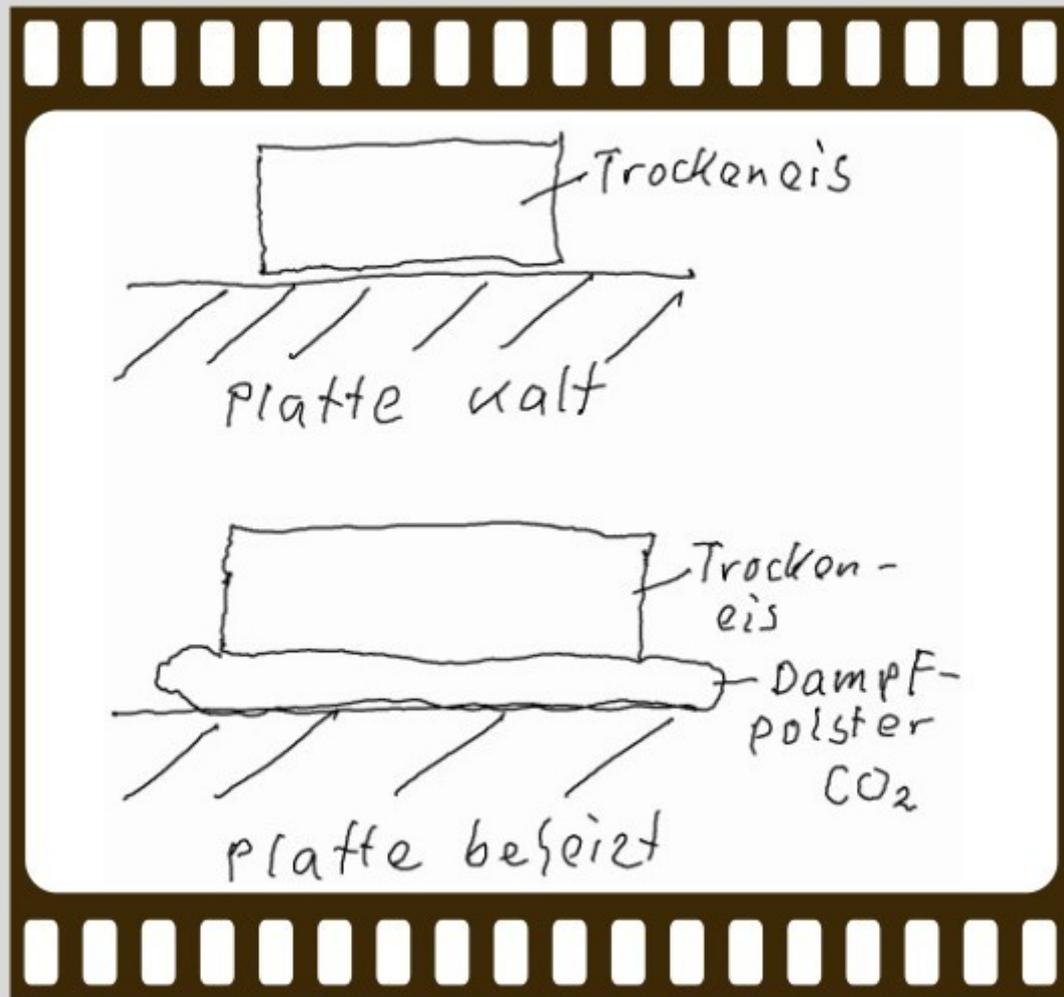
In einem Lexikon findet man:

"

Leidenfrost'sches Phänomen,
die zuerst von Johann Gottlieb Leidenfrost (*1715, +1794) gedeutete
Erscheinung, daß auf einer hochehitzten Metallplatte benetzende Flüssigkeiten
Tropfen bilden, die sich eine Zeitlang halten, weil durch die sich an der
Auflagefläche des Tropfens bildende Dampfschicht **sowohl die Benetzung als
auch die Wärmeübertragung behindert** wird. Dieselbe Erscheinung erhält man
bei kleinen Stücken fester Kohlensäure (Trockeneis)."

zur besseren Veranschaulichung 2 Skizzen:





Ich habe mal gehört, man könne sogar eine nasse Hand für kurze Zeit flach auf so eine Platte legen (natürlich nicht fest draufdrücken !!), aber ich würde mich das nicht trauen, Sie vielleicht ? ('Gell', da läßt die Begeisterung für die Naturwissenschaften auch bei uns 'etwas' nach!) Vielleicht ist das auch der Trick beim 'Fakir-über-glühende-Kohlen-laufen' ?? Womöglich braucht der Fakir dazu kräftige 'Schweißfüsse', oder er wäscht die Füße zu dieser Gelegenheit vorher, - sozusagen 'einmal im Jahr' !!

poröse Wärmeisolatoren

Im Grunde genommen ist der Isoliereffekt von porösen Werkstoffen dasselbe Phänomen. In porösen Werkstoffen haben wir Feststoffzellen mit dünnen Wandungen aus einem Feststoff, in denen eine stagnierende 'Miniluftblase eingesperrt' ist. Es ist klar, daß der Anteil der Feststoffleitbrücken (die ja zur Stabilisierung der porösen Struktur und zum 'Einsperren' des Gases nunmal notwendig sind) minimal sein sollte und daß der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ des Feststoffes möglichst klein sein sollte. Ein Metallschaumstoff (das gibt es !!) wird ein schlechterer Isolator sein als Styropor, weil einmal ein guter metallischer Wärmeleiter und zum anderen der mäßig leitende Kunststoff als Leitbrücken vorliegen. Mehr wäre dazu eigentlich nicht zu sagen, den Rest 'sprechen' die

Zum etwas allgemeineren Gebiet **Wärmedurchgang** folgende Beispiele:

Verschiedenes:

Hauswandisolation, Wärmebrücken , Kälteschutz-Kleidung, wind-chill

Wind-Chill:

das kennen Sie sicher schon - zumindest vom Wetterbericht (wenn von 'gefühlter Kälte' o.ä. gesprochen wird). Wenn Sie die Abschnitte Wärmeübergang und Wärmedurchgang einigermaßen 'verinnerlicht' haben, dürften Sie keine Verständnisprobleme haben. Wird bei einem Wärmeübergang Luft/'feste' Wandung das Strömungsbild im Fluid Luft immer turbulenter, dann wird auch die laminare Grenzschicht immer dünner, d.h. der Wärmeleit-Widerstand durch eine stagnierende Luft-Grenzschicht wird immer stärker reduziert. Damit ist der Wärmetransport (hier dann:) von 'innen nach außen' vergrößert. Dies führt objektiv zu einer Abnahme des Wärmeinhalts der warmen Seite (innen) und damit auch zu einer echt messbaren Temperatur-Erniedrigung. Subjektiv entsteht 'mehr Kältegefühl', weil die Außentemperatur 'mehr hereindringt' als im windstillen Fall, d.h. der Körper spürt den Wärmeabfluß und die Temperaturerniedrigung und setzt das in Kältegefühl um. Wind-Chill spielt bei den folgenden Punkten: Hauswandisolation und Kälteschutzkleidung eine wichtige Rolle. weiterer Text folgt!

Wärmetauscher

Bei der technischen Konzeption, Auslegung und Berechnung von Wärmetauschern spielt der Wärmedurchgang die Hauptrolle (in manchen Fällen muß aber auch Strahlungswärme berücksichtigt werden) Eigentlich können wir es uns auch hier jetzt ziemlich leicht machen: für ebene Platten können wir zur Berechnung und Auslegung die obigen Formeln und die näheren Angaben in den Links zu Detaillierterem verwenden. Ernsthafte Absichten gelingen natürlich sicherlich nur unter Verwendung von Tabellenwerken, wie dem VDI-Wärmeatlas. Für Röhren- bzw. konzentrische Rohr-Wärmetauscher müssen andere Kennzahlzusammenhänge angewendet werden, auch hier benötigt man Tabellenwerke.

Für 'Normalverbraucher' ist es eigentlich nur nötig die erwähnten Grundlagen einmal grundsätzlich 'der Spur nach' begriffen zu haben. Mit genauen Berechnungen soll sich dann der Ingenieur 'herumschlagen'. Es sollen deshalb im weiteren Text nur einige Skizzen für Tauscher-Anordnungen aufgezeigt werden.

Dieser Text mit Abb. folgt in kürze!

Aber eine Sache erscheint mir doch noch wichtig: die Temperaturgradienten und

Tauschgeometrien etc. mögen noch so kompliziert sein, für alle Tauscher gilt - abgesehen von Verlustwärmern (z.B. Strahlung) - die kalorische Formel als 'Over-All-Bilanz':

$$Q_1 = m_1 \times c_1 \times (T_{1\text{ein}} - T_{1\text{aus}})$$

und

$$Q_2 = m_2 \times c_2 \times (T_{2\text{aus}} - T_{1\text{ein}})$$

$$Q_1 = Q_2$$

wobei: index 1 = wärmeabgebendes Fluid, 2 = wärmeaufnehmendes Fluid, m = Massenströme, T = Temperaturen, c = spezifische Wärmen

Man kann mit dieser Bilanz immerhin bei sonst bekannten Größen eine fehlende Größe berechnen, ohne tauscherspezifische Berechnungen durchzuführen, also z.B. die Auslauftemperatur des Heizmediums

Was ist ein WLD (Gaschromatographie!!) und wie funktioniert er ?

WLD = Wärmeleitfähigkeitsdetektor

Für den Normalverbraucher ist das ein etwas exotisches Ding. Aber Sie haben sicher schon von Gaschromatographischen Analysen im Umweltmesstechnik-Bereich o.ä. gehört. WLDs waren bei dieser Analysenmethode Detektoren der 'ersten Generation' und finden auch heute noch breite Anwendung (neben empfindlicheren 'neueren' Typen, wie z.B. der Flammenionisationsdetektoren). Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, daß bei einer 'Beimischung' gasförmiger Stoffe in ein als Grundstrom vorhandenes Gas (häufig Helium) eine deutliche Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Mischung gegenüber dem reinen Grundstrom (z.B. nur Helium) verursacht wird. Man kann diesen Effekt in einer 'geschickt ausgeklügelten' Anordnung mit Hilfe einer Temperaturänderung, bzw. der damit verknüpften elektr. Widerstandsänderung messen.

Für Interessierte: Text mit Skizze zur Funktionsweise folgt!

4.) Wärmeübertragung durch Strahlung

Jeder Körper tauscht mit seiner Umgebung Wärme aus. Das geschieht auch dann, wenn keine direkte stoffliche Ankopplung stattfindet und z.B. ein evakuierter Raum 'dazwischen' liegt. Die Energieübertragung erfolgt in diesem Fall durch Emission und Absorption von Strahlung, die je nach Temperatur des Körpers oder seiner Umgebung infrarotes, sichtbares und ultraviolettes Licht enthält. Nur diesem Umstand verdanken wir, daß die Sonne unser 'großer Ofen' ist.

Besteht zwischen einem betrachteten Körper und seiner Umgebung eine Temperaturdifferenz, so wird durch die Strahlung ein Temperatenausgleich bewirkt. Im Temperaturgleichgewicht ist die ausgestrahlte Energie gerade gleich

der aus der Umgebung aufgenommenen. Im Gegensatz zur Wärmeübertragung durch stoffliche Ankopplung besteht Wärme-Strahlung nicht nur, solange die Temperatur des Strahlers höher als die Umgebung ist, - einem Körper wird auch Wärmestrahlung von solchen Körpern seiner Umgebung 'zugestrahlt', deren Temperatur tiefer ist.

Dies liegt alles in der Natur elektromagnetischer Energieausbreitung (Strahlung) begründet. Man könnte den Unterschied zur Wärmeübertragung mit stofflicher Ankopplung einfach so darstellen: " Bei der stoffliche Ankopplung ist der Übertragungsweg vorgeschrieben, die Wärme weiß sozusagen, wo sie hin muß. Ein wärmeabstrahlender Körper strahlt ganz einfach - ohne Rücksicht auf Verluste - in den Raum hinaus, 'ganz wurscht (egal)', ob da einer 'empfängt' und ob er 'warm oder kalt' ist. " (das ist ein wenig wie bei Radio, TV und Handy ?!!)

In der Praxis ist es nun häufig so, daß im Bereich stofflicher Ankopplung (bei 'christlichen Temperaturen', so etwa unter 300 °C) die Bedeutung der Strahlungswärme nicht ganz so groß ist. Anders ist es im Bereich der direkten Beheizung z.B. bei Brennern in Kesseln und glühenden elektrischen Heizwendeln in Heizvorrichtungen. In gleicher Weise ist die solare Wärmeeinstrahlung sehr bedeutend, z.B. in der Bauphysik oder bei solaren Wärmekollektoren. In allen Temperaturbereichen kann die möglichst effiziente 'Unterbindung' von Wärmeübertragung durch Strahlung (im Sinne einer Isolation) aber von nicht zu vernachlässigender Bedeutung sein.

Phänomene und Gesetze der Strahlungswärme

Das **Emissionsvermögen** E_s ist die Wärmemenge, die ein Körper pro Zeiteinheit und Flächeneinheit ausstrahlt. Es ist von der absoluten Temperatur (K) und der 'Art' des Körpers abhängig, welche sich in einem Koeffizienten, der Strahlungszahl 'niederschlägt'. Das Emissionsvermögen eines sogenannten 'idealen schwarzen Körpers' ist unter sonst gleichen Bedingungen am höchsten. Man kann nämlich durch einfache praktische Versuche feststellen, daß schwarze Körper am besten emittieren (z.B. [Leslie-Versuch](#)). Dieser Zusammenhang für den schwarzen Strahler ist das **Stefan-Boltzmann'sche Gesetz**:

$$E_s = C_s \times (T/100)^4$$

die Verteilung der Strahlungsenergie auf die verschiedenen *elektromagnetischen Wellenlängen* beschreibt das **Planck'sche Strahlungsgesetz**, hierbei spielt die Annahme der Energie-Quantelung und damit das Planck'sche Wirkungsquantum h eine Rolle. Interessierte und Fortgeschrittene mögen sich hierzu in Lehrbüchern der Physik gründlich informieren. Mit dem Verlauf der [Energieverteilungskurven](#) befaßt sich das Wien'sche Verschiebungsgesetz (siehe weiter unten)

Umgekehrt versteht man unter **Absorptionsvermögen** A eines Körpers das Verhältnis zwischen absorbiertes und auffallender Strahlungsenergie:

$A = (\text{absorbierte Strahlungsenergie}) / (\text{auffallende Strahlungsenergie})$

Das Absorptionsvermögen eines ideal schwarzen Körpers ist 1 ($A_s = 1$).

In Versuchen zeigt sich, daß das Verhältnis des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen für einen Körper konstant ist, auch wenn er kein ideal schwarzer Körper ist. Darüberhinaus gilt sogar noch, daß dieses konstante Verhältnis dem Betrage nach gleich ist mit dem Emissionsvermögen eines ideal schwarzen Körpers bei der betrachteten Temperatur:

$$E_x / A_x = E_s = f(\lambda, T)$$

wobei hier λ = Wellenlänge ist (nicht mit Wärmeleitfähigkeit verwechseln!!), und die Indizes x = beliebiger Körper und s = ideal schwarzer Körper sind !!! Dies ist das **Kirchhoff'sche Gesetz**.

In der Praxis ist häufig noch von '**grauen Strahlern**' die Rede.

Ganz allgemein ist die **Farbtemperatur** eines Körper, der sichtbares Licht aussendet, die Temperatur, die ein schwarzer Körper hat, wenn er Licht der gleichen Farbe aussendet wie der betrachtete Körper. **Graue Strahler** sind solche, deren Absorptionsvermögen A_{gr} von der Wellenlänge des Lichts unabhängig ist, ihre Farbtemperatur muß mit der wahren Temperatur (also der des betrachteten grauen Strahlers) übereinstimmen.

Aus Kirchhoff'schem und Stefan-Boltzmann'schem Gesetz leitet sich dann für den grauen Strahler her:

$$E_{gr} = C_s \times f \times (T/100)^4 = C_{gr} \times (T/100)^4$$

wobei die Indizes s = schwarz und gr = grau bedeuten.

Im allgemeinen werden wirkliche Körper keine grauen Strahler sein, sondern ihr Emissionsverhalten wird von der Wellenlänge abhängen. In diesem Fall wird die Temperaturabhängigkeit nicht mehr genau durch die obenangegebene Beziehung wiedergegeben. Dennoch genügt es in der Regel für technische Berechnungen, die strahlenden Körper als grau aufzufassen (wenn es nicht gerade richtiggehende Reflektoren sind, - diese sind dann aber ja auch nicht gerade als Emitter oder Absorber geeignet)

Im Bereich 'theoretische Grundlagen' bleibt uns jetzt eigentlich nur noch das **Wien'sche Verschiebungsgesetz** zur Erläuterung übrig.

Betrachtet man die Kurven für die Energieverteilung der schwarzen Strahlung bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Wellenlänge, so sieht man,

daß es für jede Temperatur bei einer bestimmten Wellenlänge ein Energie-Maximum gibt. Dieses Maximum verschiebt sich mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen. Diese Beobachtung nennt man das **Wien'sche Verschiebungsgesetz**.

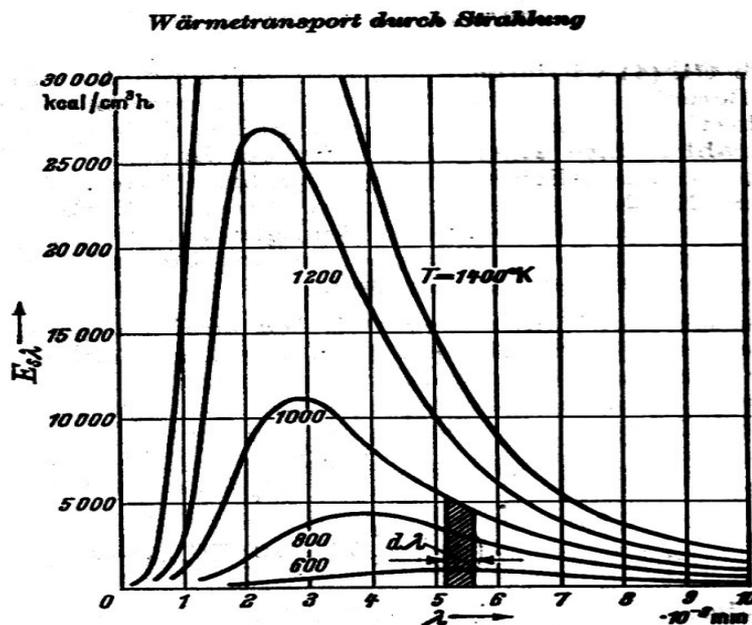


Abb. 2, 1. Energieverteilung der schwarzen Strahlung bei verschiedenen Temperaturen

Praktische Beispiele

Beispiel für die direkte Beheizung durch [Strahlungsaustausch zwischen 2 Platten](#), Formel entnommen aus: Patat-Kirchner "Praktikum der Technischen Chemie"

thermische Solarkollektoren

was ist wichtig?

1. keine Sonne, keine Wärme (---> großer Speicher gut)
2. aber auch im Winter gibt es manchmal ein wenig Sonne (es kann dabei 'eiskalt' sein ---> Wärmeübertragung durch Strahlung !!!)
3. maximale Absorption und deshalb auch:
4. richtige Ausrichtung ('einfache' oder 'Röhrenkollektoren' erforderlich?)
5. der Rest ist Wärmeübertragung mit stofflicher Ankopplung und Regelungstechnik (deshalb geht es auch nicht ganz ohne Stromkosten für Umwälzpumpe und Elektronik!!)

mehr ??

nein, eigentlich nicht !

(oder ? --- z.B. können Marder Temperatur-Sensor-Leitungen durchnagen)

aber -- mein Fazit:

nützliche, dauerhaft vernünftige alternative Energiequelle,

-- im Gegensatz zu photovoltaischen Anlagen und Windrädchen. Deren Kernprobleme sind nämlich zumindest im Moment: Energiespeicherung und 'passende' Verwendung des anfallenden Stroms. Wärmeenergie ist - physikalisch - die 'niedrigwertigste' Energie, es ist fast zu schade, Strom in Wärme umzuwandeln, der einzige Vorteil ist bei Elektrowärme die 'perfekte' Regelbarkeit. Und, falls es nicht klar sein sollte: Stromeinspeisung nach dem Stromeinspeisungsgesetz ist **Subvention** !!

Literatur:

Patat-Kirchner, Praktikum der Technischen Chemie, deGruyter-Verlag

Daten und Formeln: VDI-Wärmeatlas

und: div. Tabellentaschenbücher der Physik

speziell für Chemiker oder an Chemie Interessierte:

Larry Gonick & Craig Criddle, **The Cartoon Guide to Chemistry**

HarperCollins *Publishers* ISBN 0-06-093677-0, erhältlich z.B. über Amazone oder Fachbuchhandel, hier alle Kapitel zu Thermochemie und Chemischer Thermodynamik

Link:

Verein zur Förderung energieeffizienter wirtschaftlicher Bausysteme ([FEWB](#)) e.V.

Ende

Etwas ausführlicher: die Kalorik- (Kalorimeter)-Formel

Machen wir uns ein Beispiel für die Wärmeübertragung anhand der Kalorik-Formel (siehe hierzu auch Lehrbücher der Physik!!):

Nehmen wir einmal an, wir hätten einen Metallblock von bekannter Masse (z.B. 1kg). Dieser habe eine Temperatur von 25 °C. Wir erwärmen diesen Block nun in einem Wärmebad mit einem 'riesigen Wärmeverrat' bei einer Temperatur von 40 °C. Der an den Metallblock vom Wärmebad übertragene Energieinhalt = die an ihn übertragene Wärme(-menge) ist dann:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

und im Beispiel:

$$Q = 1 \times c \times (40-25)$$

----- > (Energie-Einheiten, z.B. Watt oder cal) ;

vom c-Wert nehmen wir im Moment einfach mal an, er sei bekannt (da wird es schon einen Weg geben, diesen zu ermitteln ---> z.B. Wärme-Mischungsversuche im Kalorimeter)

Könnten Sie jetzt folgende Aufgabe lösen ?

1 kg Wasser von 25 °C wird mit 2 kg Wasser von 48 °C gemischt, welche Temperatur hat die Mischung ?

viel Erfolg !!!

[zurück !!](#)

Berechnung der 'Mischtemperatur' mit der Kalorimeter-Formel

Wenn wir zwei Körper 'mit begrenztem' Wärmehalt miteinander in Kontakt bringen, also z.B. zwei Festkörper, oder wir 'tauchen' einen Festkörper in ein Fluid, - dann wird solange Wärme vom wärmeren Körper auf den kälteren übertragen bis beide Wärmehalte gleich sind. In beiden Körpern wird dann die Misch-Temperatur (Ausgleichstemperatur) erreicht. Diese kann mit Hilfe der Kalorimeter-Formel berechnet werden:

$$Q_1 = m_1 \times c_1 \times (T_1 - T_m)$$

$$Q_2 = m_2 \times c_2 \times (T_m - T_2)$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$m_1 \times c_1 \times T_1 - m_1 \times c_1 \times T_m = m_2 \times c_2 \times T_m - m_2 \times c_2 \times T_2$$

$$m_2 \times c_2 \times T_m + m_1 \times c_1 \times T_m = m_1 \times c_1 \times T_1 + m_2 \times c_2 \times T_2$$

$$T_m = (m_1 \times c_1 \times T_1 + m_2 \times c_2 \times T_2) / (m_2 \times c_2 + m_1 \times c_1)$$

hierbei sind: Q_1 von Stoff 1 abgegebene Wärme (also 1 = wärmer , 2 = kälter) ; Q_2 von Stoff 2 aufgenommene Wärme ; c_1, c_2 = spezifische Wärmen der beiden Stoffe ; m_1, m_2 = Massen der beiden Stoffe ; T_1, T_2 Ausgangstemperaturen der beiden Stoffe ; T_m = erreichte Mischtemperatur

Dies ist eine der wichtigsten Anwendungen für die bekannte 'kalorimetrische Formel', die jeder Physik- und Chemie-Student kennen sollte.

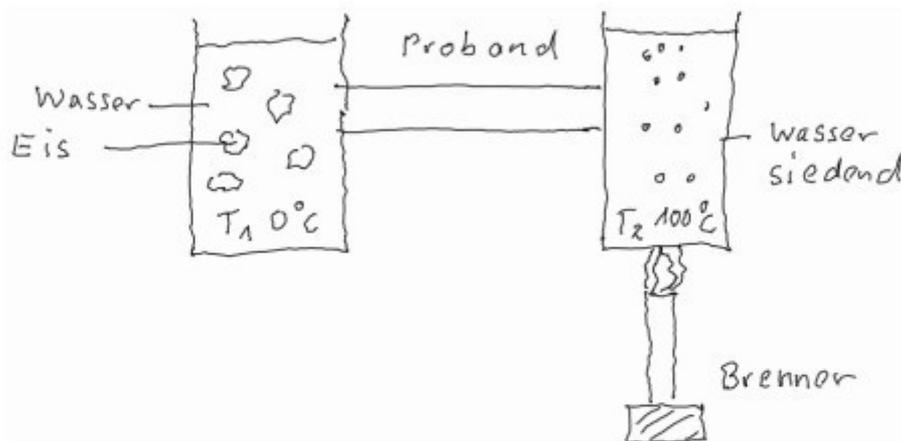
Die Formel ist zugleich die formale Lösung der Aufgabe im vorherigen Abschnitt.

[zurück !!](#)

Intuitive Herleitung des Fourier-Gesetzes

Eine elegante Vorgehensweise ist nun darüberhinaus, wenn man für die zwei Wärmeverratsblöcke den Vorgang der **latenten Wärmebindung oder Wärmefreisetzung** anwendet, also z.B. siedendes Wasser auf der einen Seite und schmelzende Eiswürfel auf der anderen. Dies bedarf zwar an dieser Stelle einiger Erklärung, aber es rentiert sich!!.

Latente Wärmen sind Phasenumwandlungswärmen. Es ist eine ganz besondere physikalisch-chemische Eigenschaft von Stoffen, daß bei Phasenumwandlungen, z.B. beim Schmelzen von gefrorenem Wasser (Eis) oder beim Sieden von Wasser immer ganz definierte Wärmemengen gebunden oder frei werden und daß sich bei diesem Vorgang die momentane Temperatur des Stoffes nicht ändert. Also: Eis schmilzt bei Wärmezufuhr bei konstant $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, solange, bis alles Eis geschmolzen ist, - erst dann kann sich die Wassertemperatur erhöhen. Bei siedendem Wasser ist es das gleiche: Sie können heizen, wie Sie wollen, das Wasser verdampft und überschreitet dabei die Siedetemperatur (luftdruckabhängig!!) von z.B. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'partout' nicht. Nun ist als Konsequenz dieser Verhaltensweise die Menge des geschmolzenen Eises oder die Menge verdampften siedenden Wassers ein direktes Maß für die zugeführte oder abgeführte Wärme. Diese Verhaltensweise gilt ganz allgemein für latente Wärmen.



zur Erinnerung: Leitbrücken-Anordnung zur Wärmeleitfähigkeitsmessung unter Verwendung 'latenter' Wärmen

Atomistisch kann man sich das so interpretieren, daß im Regime (Bereich) der Phasenumwandlung einfach alle zur Verfügung stehende Energie ins 'Umwandeln', z.B. aus der Flüssigkeit in den Gaszustand oder für den Einbau in ein Kristallgitter usw., 'gesteckt werden muß'.

Mit dieser Kenntnis gerüstet können wir uns jetzt anhand unserer Quellen-/Senken-Anordnung das Fourier-Gesetz der Wärmeleitung plausibel machen.

Oder noch besser, überlegen wir uns doch zunächst mal, ob wir das Grundgerüst des Fourier-Gesetzes 'mit dem gesunden Menschenverstand' herleiten können.

Die pro Zeiteinheit über die Küvette 'durchgeleitete' Wärmemenge Q/t ist proportional zur Temperaturdifferenz ΔT (treibende Kraft). Sie wird auch proportional zur Querschnittsfläche der Küvette sein, denn je größer diese ist, desto mehr 'geht durch'. Schließlich wird sie um so größer sein, je kürzer die Küvette ist oder umgekehrt um so kleiner sein, je länger die Küvette ist. Das ist eine umgekehrte (reziproke) Proportionalität !! Kommt Ihnen das nicht bekannt vor ? Das ist doch wie beim elektrischen Widerstand eines Drahtes !! Na ja, was fehlt uns denn jetzt noch, -wie immer !! Eine Größe, die die spezifische

Eigenschaft des vorliegenden Stoffes charakterisiert. Die nennen wir spezifische Wärmeleitfähigkeit . (Wir hätten natürlich genauso einen reziprok proportionalen Wärmeleitungs-Widerstandswert definieren können !!).

Und Sie glauben es nicht, wir haben soeben das Fourier-Gesetz hergeleitet !!

es lautet:

$$Q/t = F \times 1/L \times \lambda \times \Delta T$$

[zurück!!!](#)

Kennzahlen / die Reynolds-Kennzahl

Die Reynolds-Zahl ist eine sogenannte 'dimensionslose Kenngröße'. Sie erlaubt, in fluiden Strömungs-Systemen zu beurteilen, ob man sich im Regime der laminaren oder turbulenten Strömung befindet.

Dimensionslose Kennzahlen und deren Zusammenhänge sind ein 'Produkt' der Ähnlichkeitstheorie. Ihre Anwendung ist in vielen Gebieten von Physik, Physikalischer Chemie und vor allem Ingenieurwesen weit verbreitet.

Falls Sie über dimensionslose Kennzahlen etwas mehr grundsätzliche Information benötigen, hier ein Textblock, den ich aus 'Patat-Kirchner - Lehrbuch der Technischen Chemie' abgeschrieben habe: ([überspringen !](#))

Grundlagen der Ähnlichkeitslehre.

Die Ähnlichkeitslehre oder Theorie der dimensionslosen Kenngrößen baut sich auf dem Begriff der Ähnlichkeit der elementaren Geometrie auf. Zwei Rechtecke sind einander ähnlich, wenn das Verhältnis von Länge u Breite bei beiden gleich ist. Das Verhältnis zweier Längen ist, wenn sie in der gleichen Einheit gemessen sind, unabhängig von der Art des benutzten Maßsystems und der Einheit. Ferner ist es dimensionslos, und man bezeichnet es deshalb auch als dimensionslose Kenngröße oder dimensionsloses Produkt. Die notwendige und hinreichende Bedingung für die geometrische Ähnlichkeit zweier Rechtecke ist also, daß zwei dimensionslose Zahlen gleich sind. Bei physikalischen und chemischen Prozessen sind neben der Länge noch weitere Grundgrößen, z.B. die Zeit, von Einfluß und damit Einflußgrößen. Neben den Grundgrößen können aber auch abgeleitete Größen für einen betrachteten Vorgang maßgebend sein. Solche Einflußgrößen sind beispielsweise Kraft bzw. Masse, Geschwindigkeit, Druck, Zähigkeit. Sie lassen sich immer auf Grundgrößen, präziser gesagt auf Potenzprodukte von Grundgrößen, zurückführen.

Um nun das Ähnlichkeitsprinzip auf Einflußgrößen physikalischchemischer Vorgänge anzuwenden, geht man im allgemeinen folgendermaßen vor: Man überlegt zuerst alle Einflußgrößen, die für einen betrachteten Vorgang maßgebend sein könnten. Dann schreibt man diese Einflußgrößen und ihre

Dimensionen auf und versucht, aus ihnen durch geeignete Multiplikationen und Divisionen Produkte und Quotienten zu bilden, die dimensionslos sind. Sind alle Einflußgrößen zu dimensionslosen Kenngrößen zusammengefaßt, so sollen zwei physikalische Vorgänge einander „ähnlich“ sein, wenn alle entsprechenden Kenngrößen bei beiden Vorgängen dieselben Werte haben.

Die Reynoldszahl :

Ganz allgemein kann gezeigt werden, daß 'reibende' Strömungen um geometrisch ähnliche Körper dann ähnlich verlaufen, wenn die dimensionslose Größe:

$$Re = \frac{\rho w L}{\eta} = \frac{w L}{\nu}$$

in zwei ähnlich gelegenen Punkten den gleichen Betrag hat. L ist dabei eine charakteristische Länge, wie Durchmesser (z.B. bei Rohrströmungen), Flügeltiefe (von Propellern, Laufrädern etc.) u.ä.

w ist die lineare Strömungsgeschwindigkeit.

Es läßt sich zeigen, daß die so definierte Reynolds-Zahl ein Maß für das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften im strömenden Fluid ist.

Charakterisierung der Strömungs-Regime durch die Reynolds-Zahl:

Text folgt !!

[zurück !!!](#)

Kennzahlensammenhänge zur Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α werden Kennzahlensammenhänge der folgenden Kennzahlen verwendet:

Nu = Nusselt, Pr = Prandtl, Re = Reynolds und Gr = Grashof

Wenn man die Einflußgrößen auf α beim Wärmeübergang zusammenstellt, kann man eine allgemeine Funktion der folgenden Form annehmen:

$$\alpha = f(d_g, \rho, \eta, \lambda, w, c_p, L)$$

hierbei ist L die bei der Reynoldszahl schon erwähnte charakteristische Länge, c_p die spezifische Wärme, d_g eine geometrische Apparateabmessung (z.B. die Gesamtlänge einer Wärmetauscherplatte), w die Lineargeschwindigkeit, η die dyn. Viskosität und ρ die Dichte. Aufgrund der Ähnlichkeitstheorie läßt sich diese Funktion in Form von dimensionslosen Produkten darstellen:

$$f\left(\frac{\alpha L}{\lambda}, \frac{\rho w L}{\eta}, \frac{c_p \eta}{\lambda}, \frac{d_g}{L}\right)$$

wobei:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$$

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} = \frac{c_p \rho \nu}{\lambda}$$

Nu = Nusselt, Pr = Prandtl

die 3. Kennzahl ist die bereits bekannte Reynoldszahl und die 4. Kennzahl eine 'Geometrie'-Kennzahl

man kann nun bei Verwendung allgemeiner Ansätze der Form:

$$Nu = C Re^m Pr^n \left(\frac{d_g}{L}\right)^p$$

mit experimenteller Hilfe die in Frage kommenden Exponenten ermitteln und aus der erhaltenen Nu -Kennzahl α 'berechnen'.

Bei **freier Konvektion** tritt dagegen an Stelle der Reynoldszahl die Grashof-Zahl Gr 'in Aktion'. Diese berücksichtigt eben die Fluidbewegungen bei freier Konvektion (Umschichtung, 'Thermik'). Man erkennt dies schön an den in der Grashoffzahl vorkommenden Einflußgrößen g (Erdbeschleunigung), β =thermischer

Ausdehnungskoeffizient und ΔT .

der Zusammenhang hat die allgemeine Form:

$$Nu = c Pr^n Gr^m$$

mit:
$$Gr = \frac{L^3 g \beta \Delta T}{\nu^2}$$

[zurück !!!](#)

der k-Wert

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

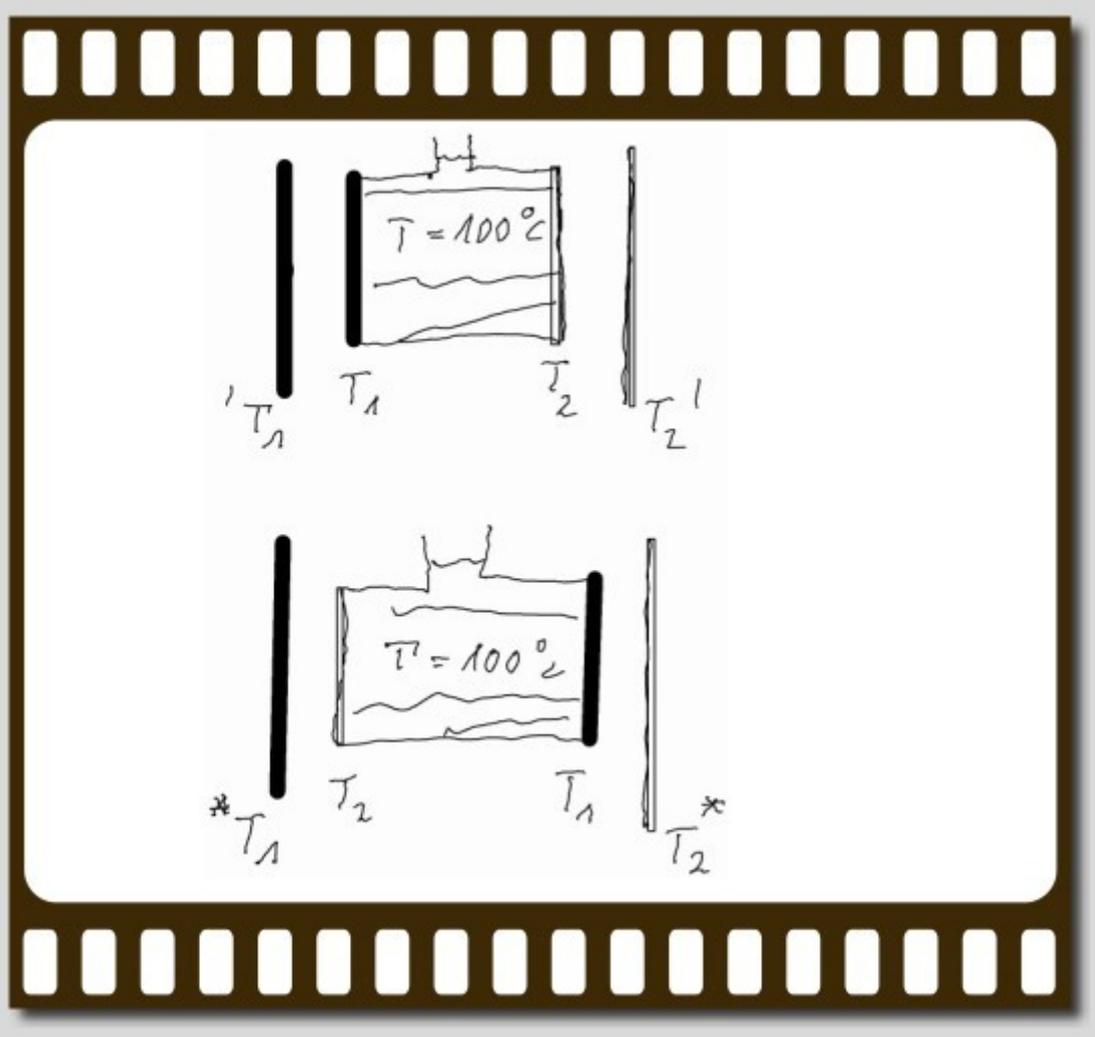
Formel der Widerstands-Serienschaltung beim Wärmedurchgang. Zur Wiederholung: die 3 Terme im Nenner sind 'Wärmeübergang auf Seite 1',

'Wärmeleitung durch die Wand' , 'Wärmeübergang auf Seite 2'.

[zurück !!](#)

Informative Versuchsanordnung für Übertragung durch Strahlungswärme: Leslie-Versuch

Beim Leslie-Versuch ist ein auf konstante Temperatur (nur z.B. 100 °C) gebrachter Würfel zwischen zwei Platten angeordnet. Oberer Abbildungsteil: der Würfel besitzt eine schwarze Wandfläche und eine polierte oder blanken Fläche. Die Emissionstemperatur der schwarzen Fläche ist T_1 , die der blanken T_2 . Gegenüber den Würfelflächen ist eine schwarze Platte angeordnet, die eine Absorptionstemperatur T'_1 erreicht. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich (wiederum gegenüber der blanken Würfelfläche) eine blanken Platte, die die Absorptionstemperatur T'_2 annimmt. Unterer Abbildungsteil: der Würfel wird dann gedreht, so daß der schwarzen Platte die blanken Würfelseite und der blanken Platte die schwarze Würfelseite gegenüber steht. Die schwarze Platte nimmt jetzt die Temperatur T^*_1 und die blanken Platte die Temperatur T^*_2 an.



der Leslie-Versuch

In der oberen Anordnung wird die Temperatur T'_1 der schwarzen Platte wesentlich größer sein als die (T'_2) der blanken Platte, - dies bedeutet, daß *das Emissions- und Absorptionsvermögen schwarzer Körper am größten ist.* In der unteren Anordnung kann beobachtet werden, daß die Temperaturen T^*_1 und T^*_2 einander gleich sind, die Wärmeflüsse sind hier also gleich. Hieraus lässt sich herleiten, daß *die Verhältnisse des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen von blanker und schwarzer Fläche einander gleich sind:* $E_1/A_1 = E_2/A_2$.

[zurück !!](#)

Strahlungswärme-Übertragung zwischen 2 Platten (Patat-Kirchner)

für die Wärmeübertragung zwischen 2 Platten, die sich auf den Temperaturen T_1 und T_2 befinden, läßt sich herleiten:

$$\dot{Q} = F \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_{gr1}} + \frac{1}{C_{gr2}} + \frac{1}{C_s}}$$

1 = Platte 1
 2 = Platte 2
 Index : gr = grauer Strahler
 s = schwarzer "
 C = Strahlungszahl

Herleitung siehe z.B. 'Patat-Kirchner'. Charakteristisch für die Wärmeübertragung durch Strahlung ist der Term ' T^4 ' (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Man könnte salopp sagen: **bei der Strahlungswärme ist der 'Potentialeffekt'**

der Temperatur 'gewaltig'.

zurück !!

zurück !!