

# Technisches Schaffen erfordert physikalisches Denken

## Erkenntnisse aus der Betrachtung inverser Effekte

Leopold Stadler

### Einführung

Ein zentrales Anliegen der Physik-Didaktik – egal ob im Rahmen der so genannten Schulphysik oder in weiterführender Form – wäre es, Effekte deutlich und leicht durchschaubar darzustellen. Das kostet Mühe, Geduld und Zeit. Immer mehr Effekte, welche früher rein physikalisch-theoretisches Interesse beanspruchten, werden technisch verbreitet angewandt und sollten einem angehenden Techniker verständlich gemacht werden. Auch eine dazu nötige sehr gute Geräte-Ausstattung wie die unsere kann über die Besorgnis erregende „Schere“ nicht hinwegtrösten, dass diesem erhöhten Bedarf eine dramatisch reduzierte Anzahl Physikstunden gegenüber steht.

Z.B. ist der Peltier-Effekt schon seit 1834 bekannt, der Hall-Effekt wurde 1879 entdeckt. Erst moderne Halbleiter-Materialien ermöglichten es, diese an sich schwachen Effekte so zu steigern, dass sie technisch vielseitig, sicher und preiswert nutzbar wurden: Hallsonden, Hallgeneratoren, Peltier-Kühler etc. finden sich vom Verbrennungsmotor bis zur Kühltasche.

Besonders tiefe Einblicke vermitteln Paare inverser Effekte, also solcher, welche auch nach Austausch von Ursache und Wirkung stattfinden. Das wohl bekannteste Beispiel: Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters durch die Lorentzkraft sowie Bewegungsinduktion (elektrotechnisch gesprochen: Elektromotor und Generator).

Im Folgenden möchte ich einige interessante, teilweise sehr selten zu sehende inverse Effekte in Wort und Bild vermitteln. Da dieser Artikel nicht zu einem Auszug aus einem Lehrbuch ausarten soll, werde ich die Effekte kurz beschreiben und mich auf Anmerkungen zu den Bildern beschränken. Gleichzeitig erhalten wir einen Einblick in die Reichhaltigkeit der Physik-Sammlung unserer Schule.

### Längenänderung und Temperaturänderung stabförmiger Festkörper

Schon manchen gestandenen Maschinenbauer hat meine „überfallsartige“ Frage verunsichert: „Wir setzen einen Stahldraht rasch unter mechanische Spannung - erwärmt er sich dabei oder kühlt er sich ab?“

Ausgangspunkt für dieses Problem ist der altbekannte Effekt der Längenänderung fester Körper beim Erwärmen oder Abkühlen (gemäß  $\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$ ). Da die Schüler die Größenordnung dieses Effektes kennen sollten, untersuchen wir die Sache quantitativ mittels Dilatometer (Abb. 1) und erhalten praktisch die Tabellenwerte für die Ausdehnungskoeffizienten von Stahl, Aluminium oder Messing.

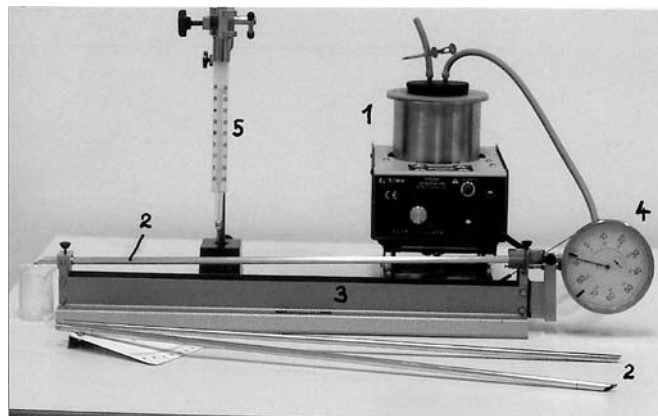


Abb. 1: 1 elektrischer Wasserdampf-Erzeuger  
2 Prüfling (Metallrohr)  $l_0 = 500$  mm  
3 Gestell mit festem Auflager links, Wälzlager rechts  
4 Messuhr für DI  
5 Thermometer

Der inverse Effekt besitzt keinen eigenen Namen; die richtige Antwort auf meine „Fangfrage“ lautet: Abkühlung. Einfach und überzeugend können wir dies beobachten am sogenannten „Biegestab nach Prof. Günther“, Abb. 2.

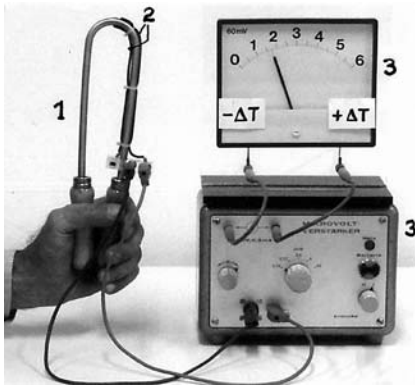


Abb. 2: 1 U-förmiger Stahlbügel mit Handgriffen  
 2 Isolierte Konstantan-Drähte, angelötet außen und innen in der Mitte des U  
 3  $\mu V$ -Verstärker, zeigt thermoelektrische Spannungen an.

In Abb. 2 sehen wir den  $\mu V$ -Verstärker mit der Masse (Stahlbügel) sowie dem äußeren Konstantandraht verbunden. Soeben wurde durch Zusammendrücken der Griffen die Außenseite gedehnt; der Ausschlag des Drehspulinstruments weist die kleine Abkühlung nach (Gegenprobe durch Berühren der Lötstelle mit dem Finger!).

#### Anmerkungen:

- der Vergleich mit der adiabatischen Abkühlung eines Gases ist naheliegend jedoch grob falsch
- ist bei einem Effekt zwischen zwei Möglichkeiten zu entscheiden (z.B. Erwärmung oder Abkühlung, positive oder negative Ladung, Stromrichtung, Über- oder Unterdruck) so hält sich die Natur an folgendes Prinzip: die Wirkung fällt so aus, dass sie die Ursache bekämpft (andernfalls würde sich der Prozess katastrophal hochschaukeln). Musterbeispiel: die sogenannte Lenz'sche Regel.

Angewandt auf den „Biegestab“: Verlängerung durch Zugkraft bewirkt Abkühlung, weil diese im Gegenzug Verkürzung bewirken möchte.

## Thermodiffusion und Diffusions-Thermoeffekt

Beide Versuche stellen experimentelle Gusto-Stückerl dar! Der erste Effekt ermöglicht es, ein Gasgemisch zu entmischen - ohne chemische Umsetzung und ohne die Gasphase zu verlassen. Jeder Leser wird schon beobachtet haben, dass in Gebäuden, in denen selten ausgemalt wird (Amtsgebäude!), die weiße Wand oberhalb von Radiatoren besonders stark verschmutzt ist (obwohl diese Heizkörper ja nicht rußen) – ein „Erfolg“ der Thermodiffusion.

**Effekt:** liegt an einem Gasgemisch ein Temperaturgefälle  $\Delta T / \Delta x$  an, so reichern sich die leichteren Moleküle an der wärmeren Seite an. Die kinetische Gastheorie kann dies wunderbar erklären.

**Versuch:** die Vorführung gelingt einfach, rasch und ohne aufwändigen Aufbau mit Hilfe eines „Trennröhres nach Clusius“<sup>1)</sup> (Abb. 3 a, b).

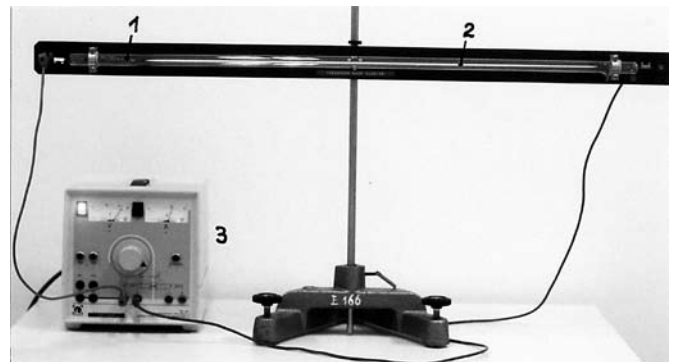


Abb. 3a: Rohr horizontal, Draht in gleichmäßiger, dunkler Rotglut  
 1 geschlossenes Glasrohr, das enthaltene Gasgemisch besteht je zur Hälfte aus  $H_2$  und  $CO_2$ ,  
 2 axialer Heizdraht, mittels Schraubenfeder gespannt  
 3 elektrische Versorgung: Netzgerät, Kabel, Feinsicherung;  $\ell < 5A$



Abb. 3b: nach wenigen Minuten Betrieb in senkrechter Lage: die Glüh-Helligkeit des Drahtes nimmt von unten nach oben eklatant ab

Deutung: Offenbar muss der Draht oben stärker gekühlt sein; die einzige Möglichkeit dafür ist, dass sich der Wasserstoff als besserer Wärmeleiter oben angereichert hat. Die massereicheren  $CO_2$ -Moleküle jedoch sind zur kühlen Glaswand diffundiert und dort konvektiv abgesunken.

Nun vertauschen wir Ursache und Wirkung: man lässt zweierlei Gase von gleicher Temperatur sich ausschließlich durch Diffusion vermischen; dabei sollte sich eine Temperaturdifferenz aufbauen. Die experimentelle Bestätigung liefert der folgende seltene aber sehenswerte Schauversuch nach Abb. 4:

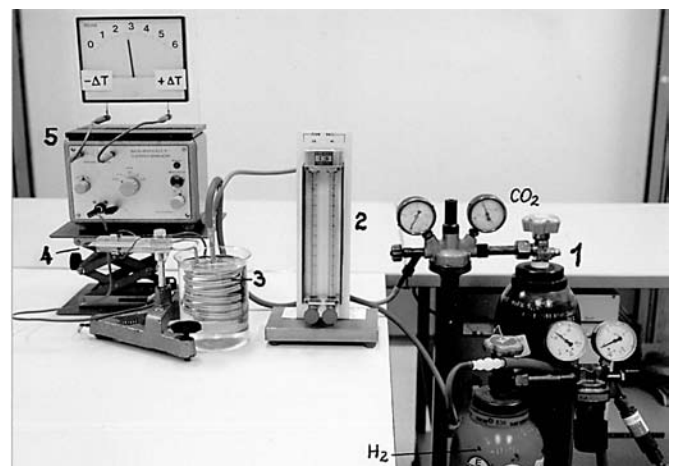


Abb. 4: 1 Gasflaschen  $CO_2$ ,  $H_2$  mit Reduzierventilen  
 2 Zwillings-Durchflussmesser, ermöglicht das Gleichmachen der beiden Gasströme  
 3 doppelte Rohrspirale im Wasserbad (garantiert, dass beide Gasströme vor ihrer Diffusion dieselbe Temperatur besitzen)  
 4 Diffusionskammer mit herausziehbarer Trennwand  
 5 Differenzial-Thermoelementnebst  $\mu V$ -Verstärker

<sup>1)</sup> Klaus Clusius (1903-1963) und G. Dickel schufen 1939 ihr Diffusionsrohr zwecks Trennung von Gasmolekülen verschiedener Masse, insbes. zur Isotopentrennung (UF6).

### Beobachtung:

Anfangs strömt oben  $H_2$ , unten  $CO_2$  durch die Kammer, getrennt durch einen Metallstreifen; es wird keine Temperaturdifferenz angezeigt. Nach Entfernen der Trennwand: das dichtere Gas strömt unten, der Volumsdurchsatz ist gleich - an der Grenzfläche der Gase tritt also weder Konvektion noch Verwirbelung auf sondern nur Diffusion. Sofort zeigt das  $\mu V$ -Meter eine Temperaturdifferenz an, wobei sich die wärmere Seite oben beim Wasserstoff befindet (Finger-Probe!). Somit betreibt die erzeugte Temperaturdifferenz  $\Delta T$  eine Thermodiffusion, welche dieser Vermischung der Gase entgegenwirkt.

## Thermoelektrischer und Peltier-Effekt

Schon bei den oben vorgestellten Versuchen wurde die thermoelektrische Temperaturanzeige eingesetzt; beide Effekte sind schon lange bekannt<sup>2)</sup>. Der Seebeck-Effekt ist so einfach vorzuführen, dass auf eine Beschreibung verzichtet werden kann:

Bringt man die Lötstelle, welche die Enden zweier Drähte aus verschiedenen Metallen verbindet, auf andere Temperatur als die des sonstigen Kreises, so entsteht eine thermoelektrische Spannung  $U_{TH} \sim \Delta T$  bzw. ein Thermostrom.

**Anwendungshinweis:** T-Messung, Strahlungsmesser, Thermoelemente, Sicherungen

Für Cu/Konstantan liefert dieser Effekt  $41 \mu V/K$ .

Umkehrung: wir machen die Wirkung (Thermostrom) zur Ursache, d. h., wir schicken einen Gleichstrom  $I$  durch die Grenzfläche zweier verschiedener Metalle. Wir erwarten: Die Lötstelle erwärmt sich oder kühlt sich ab, je nach Richtung dieses Stromes.

Bis vor kurzem konnten wir diesen Peltier-Effekt nicht in übersichtlicher Form vorführen; dies war umso bedauerlicher als ja sein Umkehreffekt Standard im Unterricht ist, und die technischen Anwendungen stark im Kommen sind (Peltier-Kühler). Ich habe daher die „klassische“ Demonstrations-Anordnung nachgebaut wie sie schon vor über 100 Jahren von Lehrmittelfirmen angeboten wurde und in Standard-Lehrbüchern der Experimental-Physik dargestellt ist<sup>3)</sup>.

Abb. 5a zeigt den Gesamt-Versuch einschließlich der Projektion, Abb. 5b das eigentliche Peltier-Gerät (Differenzial-Thermoskop aus Glas).

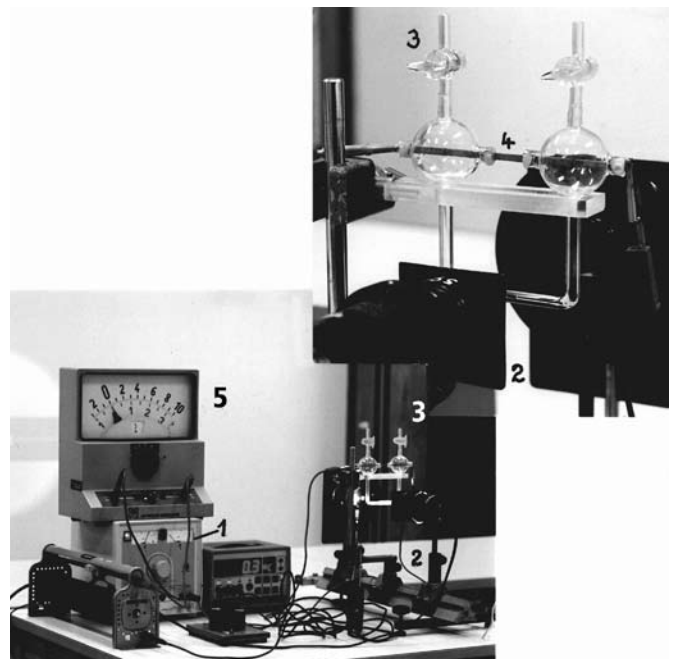


Abb. 5a und 5b (rechts oben):

- 1 Netzgerät, liefert  $6V \sim$  für die Lampe sowie Gleichstrom für den Peltier-Effekt
- 2 Optischer Teil zwecks Projektion des Verbindungsrohres mit Tropfen darin: Zeiss-Bank, Reuterlampe mit Kondensator, Objektiv, Umkehrprisma
- 3 Gläsernes Differenzial-Thermoskop, enthaltend
- 4 verlötete Leiter-Kombination Wismut-Eisen-Wismut, luftdicht eingefügt<sup>4)</sup>
- 5 Amperemeter, Messbereich  $3A =$

**Beobachtung:** der Flüssigkeitstropfen, welcher ursprünglich in der Mitte des Verbindungsrohres sitzt, wandert prompt auf jene Seite aus, wo der Gleichstrom ins Wismut eintritt. Umpolung!

**Deutung:** die eine Lötstelle wird gekühlt, die andere erwärmt und mit ihnen die Luft in den Glaskugeln. Die beiden Joule'schen Stromwärmern heben einander wegen der Symmetrie der Anordnung auf.

**Anmerkung:** die Joule'sche Wärme ist  $\sim I^2$ , der Peltier-Effekt nur  $\sim I$ <sup>1)</sup>; bei  $I = 3A$  ist die Kühl-Leistung an der Lötstelle  $< 0,1$  Watt!

Wieder erscheint das erwähnte Natur-Prinzip erfüllt: die erzeugte Temperaturdifferenz ist so, dass sie einen Thermostrom erzeugen will, welcher den ursächlichen Peltier-Strom schwächt!

Leser, welche das Beschriebene in natura sehen wollen, mögen mit dem Verfasser Kontakt aufnehmen.

<sup>2)</sup> Thomas Johann Seebeck (1770 -1831) entdeckte 1821 den thermoelektrischen oder Seebeck-Effekt. Jean-Charles Athanase Peltier, (1785 - 1845) beschreibt 1834 den zugehörigen Umkehr-Effekt.

<sup>3)</sup> Heute werden in Lehrmittelkatalogen wieder „thermoelektrische Wandler“ angeboten; sie enthalten eine Serie von sehr vielen Halbleiter-Elementen; das Wesen des Effektes bleibt aber dem Zuseher verborgen.

<sup>4)</sup> Dank für Anfertigungen schulde ich, den Kollegen Hackenberg, Novak, Skalla und Täuber vom fachpraktischen Unterricht. Das Differenzial-Thermoskop wurde nach meiner Werkzeichnung von einem Glasbläser angefertigt.