

Warum Dampf heisser ist als Luft

In einer Sauna wird Wasser über den Ofen gegossen. Danach fühlt sich die Temperatur wesentlich höher an als vorher. Warum? Dieses Phänomen wird in der Technik vielfach angewendet, beispielsweise für die Kühlung des Zentralprozessors moderner Laptops.

Wärme ist kinetische Energie von Atomen und Molekülen. Luftmoleküle bewegen sich bei Zimmertemperatur im Mittel schneller als Schall. Durch das chaotische Durcheinander ihrer Bahnen entsteht ein Diffusionsprozess, der Temperaturunterschiede selbst in ruhender Luft langsam ausgleicht. Eine dünne, relativ zur Haut ruhende Luftschicht beschützt uns in einer 85 Grad warmen Sauna vor einem allzu grossen Wärmefluss, der die Hautoberfläche übermässig aufheizen würde.

Die Wärmeleitfähigkeit von Luft oder Dampf beträgt rund $1/40$ Watt pro Meter und Grad, d.h. bei einem geschätzten Temperaturunterschied zwischen der Saunaluft und der Hautoberfläche von 40 Grad berechnet sich der Wärmefluss zu $0,1$ Watt pro Quadratcentimeter Haut. Dabei wurde ein Luftpolster von einem Millimeter Dicke angenommen, was auf Grund der Viskosität der Luft und turbulenztheoretischer Überlegungen etwa zu erwarten ist. Derselbe Energiefluss entsteht auch durch Sonnenstrahlung, die senkrecht auf schwarze Flächen trifft. Allerdings ist der gesamte Energieeintrag in unseren Körper beim Sonnenbaden wesentlich kleiner als in der Sauna, wo der Energiefluss von allen Seiten her erfolgt.

Dampf kondensiert, Luft nicht

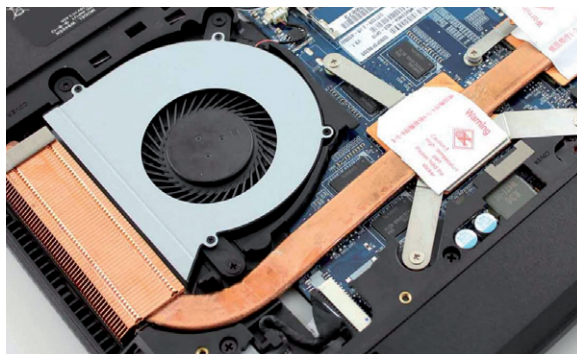
Um die Wirkung des Wasserdampfes verstehen zu können, überlegen wir uns vorerst, wieviele Gramm Luft pro Sekunde mit einem Quadratcentimeter der Hautoberfläche in Berührung kommen müssen, um den oben berechneten Wärmeeintrag von $0,1$ Watt zu bewerkstelligen. Die Wärmekapazität von Luft beträgt eine Wattsekunde pro Gramm und Grad; bei einem Temperaturunterschied von 40 Grad ergibt sich daraus $1/400$ Gramm pro Sekunde. Nun nehmen wir an, in einer Sauna mit einem Volumen von 10 Kubikmetern werden 4 Deziliter Wasser aufgegossen, das sofort verdampft. Die absolute Feuchte steigt abrupt um rund $0,032$ Kilogramm Wasserdampf

pro Kilogramm Luft (ein Kubikmeter Luft hat eine Masse von rund $1,2$ Kilogramm), was einen Anstieg der relativen Feuchte um ca. 6 Prozent ausmacht. Zusätzlich zur oben berechneten Luftmasse von $1/400$ Gramm kommen nun noch $0,032/400$ Gramm Wasserdampf pro Sekunde mit einem Quadratcentimeter Haut in Berührung. Der grösste Teil dieser Dampfmenge kondensiert und gibt die Energie von 2300 Wattsekunden pro Gramm, die bei der Verdampfung durch den Ofen geliefert wurden, wieder als Wärme ab. So entsteht ein zusätzlicher Wärmefluss auf die Haut von $2300 \times 0,032/400$ Watt pro Quadratcentimeter, also von knapp $0,2$ Watt pro Quadratcentimeter. Insgesamt wird der Wärmefluss also verdreifacht! Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass einige Leute die Sauna fluchtartig verlassen.

Technische Anwendungen

Wärmerohre sind äusserst effiziente und geräuschlose passive Wärmeübertragungselemente mit vielfachen technischen Anwendungen. In Satelliten sowie in der Elektronik werden Wärmerohre zur Kühlung von Prozessoren eingesetzt. In der Chemie dienen sie zur gleichmässigen Beheizung oder Kühlung von Reaktoren. In der Energietechnik sind sie zum Transport von Prozesswärme und zur Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme unerlässlich.

Eine interessante Anwendung wurde bei der Trans-Alaska Pipeline realisiert, wo Wärmerohre in den Stützelementen dafür sorgen, dass die Wärme des Öls nicht via diese in den Permafrostboden gelangt und ihn auftaut, was die Rohraufhängung destabilisieren würde.



Kühlung zweier Prozessoren (rechts) eines Notebooks mit Wärmerohr aus Kupfer. Links ist der Ventilator zur Abführung der Wärme sichtbar.



Trans-Alaska Pipeline. Die grauen Kühlfinger-Paare kühlen das obere Ende der Wärmerohre mit Hilfe der kalten Luft. Das untere warme Ende ist verbunden mit den Pfählen, die im Permafrost stecken. Diese werden dadurch gekühlt und so wird verhindert, dass der Boden auftaut.

Nach dem Sauna-Beispiel ist die Funktion von Wärmerohren einfach zu verstehen. Die luftdicht verschlossenen Rohre enthalten keine Luft, sondern ein Medium, dessen flüssige und gasförmige Anteile im Gleichgewicht stehen. Das Medium wird so gewählt, dass es im gewünschten Arbeitstemperaturbereich kondensiert. Vielfach wird Wasser verwendet, weshalb im Folgenden Wasser als Medium angenommen wird.

Wir betrachten ein evakuiertes Wärmerohr, in das eine kleine Menge Wasser gegeben wird. Es stellt sich von selbst ein thermodynamisches Gleichgewicht ein, bei dem der Dampfdruck gleich dem Sättigungsdampfdruck wird, der nur von der Rohrtemperatur abhängt. Bei beispielsweise 60 Grad beträgt dieser 1/5 des Atmosphärendrucks. Wasser siedet also, sobald 60 Grad überschritten werden. Am einen Ende des Wärmerohres wird Wärme zugeführt, das Wasser siedet und verdampft, wobei der Wärmequelle 2300 Wattsekunden Wärme für jedes Gramm entstehenden Dampfes entzogen werden. Die Wärmequelle wird also gekühlt. Am andern Ende des Wärmerohres wird beispielsweise durch einen Ventilator gekühlt, wodurch Wasserdampf kondensiert und pro Gramm Kondensat 2300 Wattsekunden Wärme abgibt. Im stationären Betrieb stellt sich eine vom warmen zum kalten Ende nur leicht abnehmende Temperatur und der zugehörige Dampfdruck ein.

Da selbst kleine Dampf-Druckunterschiede nach dem Bernoullischen Gesetz relevante Dampfgeschwindigkeiten und einen entsprechend grossen Dampftransport ans kältere Ende erzeugen, stellt sich an den Enden zwangsläufig fast dieselbe Temperatur ein. Das Wärmerohr hat also einen sehr kleinen Wärmewiderstand und man könnte es fast als Wärme-Supraleiter bezeichnen.

Dies gilt unter einer Voraussetzung: Das kondensierte Wasser muss genügend schnell zum warmen Ende zurückkehren. Bei vielen Anwendungen fliesst das Kondensat dank der Schwerkraft von selbst zum unteren warmen Ende. Bei Satelliten oder horizontal liegenden Wärmerohren in Laptops kann die Schwerkraft nicht verwendet werden, weshalb dort dünne Kanäle in den Rohrwänden als Kapillaren wirken, die das Wasser zum warmen Ende zurückführen. Ein schönes Beispiel für eine Erfindung, die man leicht in der Sauna hätte machen können, wo Wasserdampf nach einem Aufguss den Wärmewiderstand zwischen Ofen und Hautoberfläche verkleinert!

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.

LITERATUR

Groll, M. 2006. Wärmerohre als Bauelemente in der Energietechnik. Open Access der BBAW <http://edoc.bbaw.de>