

Cool bleiben

*Was frisch bleiben soll oder heißzu-
laufen droht, muss gekühlt werden.
Während die Kühlung im Haushalt
auf Kompression und Absorption be-
ruht, kühlt man z. B. Computerbau-
teile mittlerweile thermoelektrisch.*

Der Zweite Hauptsatz der Thermo-
dynamik bestimmt leider unnachgie-
big, dass ohne äußere Einwirkung
Wärme immer nur in eine Richtung
fließt, nämlich von warm nach kalt.

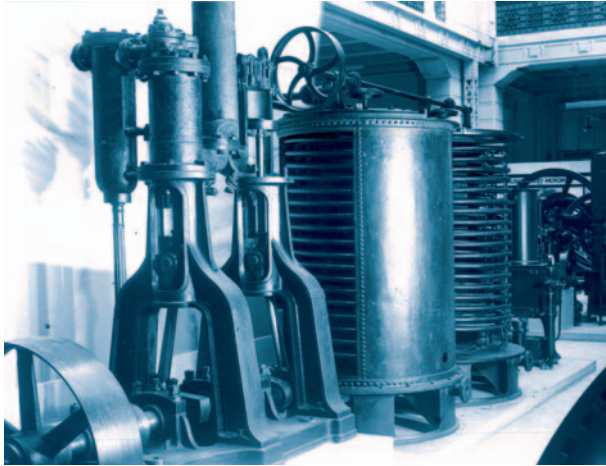


Abb. 1:
Eine der ersten
Linde-Kältemaschi-
nen, die 1877 bei
der Dreierschen
Brauerei in Triest
aufgestellt wurde
und bis 1908 zur
vollen Zufrieden-
heit des Auftragge-
bers arbeitete, steht
heute im Techni-
schen Museum in
Wien (Foto: Linde
AG).

1) Allerdings experimen-
tierte man bereits im Mit-
telalter mit der künstli-
chen Eisherstellung und es
war bekannt, dass Salpeter
zusammen mit Wasser
Kälte erzeugt.

2) Physikalisch korrekt
müsste es „Wärmeentzug“
heißen.

Für die umgekehrte Richtung, also
u. a. für Kühl- und Gefriergeräte
sowie Klimaanlage, muss man
Energie hineinstecken, und zwar
nicht zu wenig. Deshalb führen in
den USA heiße Sommer regelmäßig
zu Energiekrisen; stolze 30 Prozent
des kalifornischen Energiebedarfs
dienen allein der Kühlung von
Bürogebäuden und Eigenheimen.

Aber unbestritten zählt der Kühl-
schrank zu den unverzichtbaren
Errungenschaften der Technik. Bis
weit ins 19. Jahrhundert hinein
nutzte man hauptsächlich natür-
liches Eis, um Speisen zu kühlen.
Maschinelle Verfahren standen erst
ab Mitte des 19. Jahrhunderts zur
Verfügung.¹⁾ In dieser Zeit wurden
die grundlegenden Bauteile von
Kältemaschinen entwickelt, die
dann Carl Linde zu einer zuverlässigen
und wirkungsvollen Anlage
kombinierte und damit zum bedeu-
tendsten europäischen Kältemaschi-
nenproduzenten aufstieg (Abb. 1).

Kälte durch Kompression

Die Grundidee des Kühlschranks
ist denkbar einfach: Er nutzt die
Verdunstung einer Flüssigkeit, um
der Umgebung Wärme zu entziehen.
Die Kühlflüssigkeit durchläuft dabei
einen Kreislauf aus vier Kompo-
nenten (Abb. 2a): Die eigentliche
„Kälteerzeugung“²⁾ findet im Ver-
dampfer statt, wo das Kühlmittel

bei niedrigem Druck verdampft und
dadurch die Temperatur im Kühl-
schrank herabsetzt (die Temperatur
im Kühlschrank liegt deutlich über
dem Siedepunkt des Kühlmittels).
Hat das dampfförmige Kühlmittel
seine Aufgabe verrichtet, gelangt es
in den Kompressor, der es verdicht-
et und dadurch wieder verflüssigt
und abkühlt; die freigesetzte Wärme
wird an die Umgebung abgegeben.
Voraussetzung für diesen Wärme-
strom ist, dass die Verflüssigungs-
temperatur über der Umgebungs-
temperatur des Kompressors (also
etwa Zimmertemperatur) liegt. Nun
also flüssig geworden, durchströmt
das Kühlmittel das Drosselorgan
– eine dünne Kapillare, die einen
Engpass im Kühlmittelkreislauf bil-
det und dessen Durchlauf bremst,
sodass der vom Verdichter aufge-
baute Druck zunächst noch erhalten
bleibt. Erst nach dem Ventil kommt
es zu einer Entspannung. Der Druck
sinkt, ebenso die Temperatur, und
das Kühlmittel kann erneut ver-
dampfen. Der Kühl-Zyklus beginnt
von neuem. Dieses Verfahren wird
Kompressionsverfahren genannt
und liegt allen häuslichen Kühl-
und Gefriergeräten zugrunde.

Die optimale Umsetzung dieses
Kreislaufes würde der Carnot-Pro-
zess liefern, der nur aus reversiblen
Schritten besteht und den maxima-
len Wirkungsgrad einer Kältema-
schin beschreibt. Den Terminus
„Wirkungsgrad“ im eigentlichen
Sinn benutzt man eigentlich nur
für Wärmekraftmaschinen, die den
Kreislauf einer Kältemaschine in
umgekehrter Richtung durchlaufen
und mechanische Arbeit erzeugen.
Bei Kältemaschinen spricht man
meistens von der Leistungszahl ε ,
einer Zahl größer 1, die sich für den
Carnot-Prozess zu $\varepsilon = T_i / (T_u - T_i)$
ergibt, wobei T_i die Temperatur
im Inneren und T_u die Tempera-
tur der Umgebung ist. Pumpt ein
idealer Carnot-Kühlschrank etwa
Wärme aus seinem -5°C ($= 268$
K) kalten Gefrierfach in die 25°C

($= 298\text{ K}$) warme Küche, beträgt
die Leistungszahl $\varepsilon = 8,9$; d. h. jedes
eingesetzte Joule Kompressorarbeit
kann 8,9 Joule Wärme von innen
nach außen befördern. Reale Kühl-
schränke erreichen hingegen keine
höheren Werte als $\varepsilon = 5$.

Absorptionskühlung

Für Situationen, in denen man
keinen Stromanschluss hat, etwa
beim Zelten, oder ein kompaktes
und geräuscharmes Gerät bevorzugt
(z. B. Hotel-Minibars), bietet sich
das Absorptionsverfahren an, bei
dem der Druck durch Erhitzen von
stark ammoniakhaltigem Wasser
erzeugt wird (Abb. 2b). Ammoniak
wird von Wasser leicht aufgenom-
men, deshalb der Name dieses
Verfahrens. Beim Erhitzen dampft
das Ammoniak aus, dabei steigt der
Druck im Verflüssiger so lange an,
bis der Ammoniakdampf kondensiert
und die aufgenommene Wärme
abgibt. Analog zum Kompressions-
verfahren strömt das Kältemittel
dann durch ein Drosselorgan in
den Verdampfer, wo es bei niedrige-
rem Druck Wärme aufnimmt. Das
noch warme und Ammoniakreste
enthaltende Wasser läuft indessen
aus dem Kocher über einen Wärme-
austauscher in den Absorber, wo es
den aus dem Verdampfer zurück-
kehrenden Ammoniakdampf wieder
in Empfang nimmt und sich damit
sättigt. Eine Pumpe befördert die
Lösung in den Kocher, wo der Zy-
klus von vorne beginnt.

Thermoelektrisch kühlen

Nun gibt es aber auch Anwen-
dungen, wo die Kühlung keinen
leistungsstarken Kühlschrank erfor-
dert, dafür aber umso leiser arbeiten
und von handlicher Größe sein soll.
Für transportable Kühlboxen, etwa
zum Transport für Medikamente,
oder Kühlfächer in Autos nutzt man
deshalb den Peltier-Effekt. Der lässt
sich auch zuhause nachvollziehen:
Man nehme eine Flachbatterie,
zwei Stücke Kupferdraht, die man

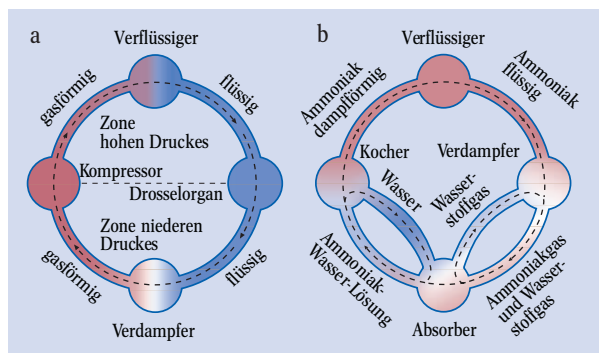


Abb. 2:
Schema des Käl-
temittelkreislaufs
einer Kompressi-
onsmaschine (a)
und einer Absorp-
tionsmaschine (b)

mit den Polen verbindet, und ein Stück Wismut (ersatzweise Eisen), mit dem man die beiden anderen Enden der Kupferdrähte verbindet. Der Übergang Kupfer-Wismut wird nun heiß werden, während der andere Übergang kälter wird (Abb. 3a). Um damit zu kühlen, muss man nun lediglich den kalten Übergang innerhalb des Kühlraums und den heißen außerhalb lokalisieren. Jean Peltier (1785–1845) stieß auf diesen thermoelektrischen Effekt als Umkehrung des bereits seit 1821 entdeckten Seebeck-Effekts. Während dieser eine Temperatur- in eine Spannungsdifferenz umsetzt, beschreibt der Peltier-Effekt den Wärmetransport durch einen Elektronenfluss in zwei Materialien, in denen die Elektronen unterschiedliche innere Energien haben. Elektronen gelangen von der Spannung getrieben vom tieferen (Metall 2) zum höheren Potentialtopf (Metall 1) und nehmen ihre gewonnene potentielle Energie in Form von Wärme auf. Bei ihrem Weg von Metall 1 zu Metall 2 geben sie die potentielle Energie wieder als Wärme ab.

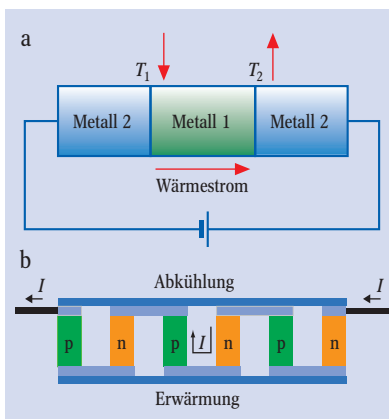


Abb. 3: Peltier-Effekt: Fließt ein Strom I durch zwei verschiedene Metalle, z. B. Wismut (1), Kupfer (2), so wird – je nach Stromrichtung – die eine Verbindungsstelle erwärmt und die andere abgekühlt (a). Besonders stark ist der Effekt bei Halbleitern. In einem Peltier-Element werden mehrere Halbleiter-Einheiten thermisch parallel und elektrisch in Reihe geschaltet (b).

Als gute Peltier-Elemente eignen sich Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, aber geringer Wärmeleitfähigkeit. Leider besitzen elektrische Leiter in der Regel auch eine gute Wärmeleitfähigkeit. Einen Ausweg aus diesem Dilemma leisten aber dotierte Halbleiter, mit denen sich ein brauchbarer Wirkungsgrad erreichen lässt, z. B. V-VI-Verbindungen wie Wismut-Tellurid (Bi_2Te_3) oder Antimon-Tellurid

(Sb_2Te_3). In n-dotierten Halbleitern wird die Wärme entgegen der Stromrichtung, in p-dotierten Halbleitern mit der Stromrichtung transportiert. Um die Kühlleistung zu erhöhen, schaltet man in der Regel mehrere Peltier-Elemente zwischen Keramikplatten elektrisch in Reihe und thermisch parallel (Abb. 3b).



Abb. 4: Peltier-Elemente sind, wie man sieht, kleine und kompakte Kühlelemente. (Foto: K. Sengebusch/EURECA GmbH)

Leider beträgt der Wirkungsgrad kommerzieller Peltier-Elemente nur etwa ein Drittel des Kompressor-Wirkungsgrades, sodass die Thermoelektrik die herkömmliche Kühltischtechnologie so schnell nicht ersetzen wird. Ein größerer Strom bringt nicht einfach eine größere Kälteleistung, denn von der eigentlichen Leistung durch den Peltier-Effekt, die proportional zur Stromstärke ist, muss die zum Quadrat der Stromstärke proportionale Joulesche Wärme, die vom Innenwiderstand des Leiters hervorgerufen wird, abgezogen werden; deshalb wird zu großen Stromstärken hin die Kälteleistung wieder geringer. Ansonsten besitzen Peltier-Elemente (Abb. 4) aber nur Vorteile: kein Lärm, kein Verschleiß, keine Vibrationen, keine giftige Kühlflüssigkeit. Zudem lassen sich Peltier-Elemente sehr genau regeln, weshalb sie nicht nur in Kühlboxen Verwendung finden, sondern etwa auch bei der Kühlung von Chips in PCs und der Frequenzstabilisierung von Lasern.

In puncto Wirkungsgrad ist die Entwicklung allerdings noch nicht am Ende; im Labor konnte die Effizienz von Peltier-Elementen schon um bis zu 250 % gesteigert, also in den Bereich der Kompressor-Leistung verschoben werden. Das ermöglichte ein Halbleiter-Schichtsystem, das den Wärmetransport durch Phononen behindert und gleichzeitig den Ladungstransport weiter verbessert. Doch noch sind diese Schichten zu dünn, um damit einen Kühltisch bauen zu können.

ULRICH KILIAN