



INITIATIVE
EnergieEffizienz +
Industrie & Gewerbe

Infoblätter Kältetechnik: Physikalische Grundlagen der Kälteerzeugung.

Was ist Kälte? + Energieformen, Energieumwandlung und
Energietransport + Verfahren zur „Erzeugung von Kälte“.

Was ist Kälte?

Kälte ist das Fehlen von Wärme.

Die meisten Laien haben eine recht gute Vorstellung davon, was Kälte bedeutet, weil wir Kälte spüren können. Etwas schwieriger wird es erst mit einem gewissen technisch-physikalischen Grundverständnis, da der Begriff „Kälte“ schwer einzuordnen ist. Kälte ist weder ein Stoff, noch im strengeren Sinne eine Energieform. Kälte ist ein Zustand, in dem die Temperatur an einer Stelle niedriger ist als in der Umgebung. Die Wissenschaft, die sich mit den verschiedenen Formen von Energieumwandlungen und Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck und Dichte beschäftigt, heißt Thermodynamik. Aus Sicht der Thermodynamik ist Kälte ein Ungleichgewichtszustand. Um diesen Ungleichgewichtszustand zu erzeugen, muss von dem Ort, an dem Kälte entstehen soll, Wärmeenergie entfernt werden. Man kann Kälte auch als den Energiefluss auffassen, der von dem Ort, an dem der Zustand niedriger Temperatur erzeugt werden soll, weg transportiert wird.

Eine Kältemaschine ist eine Maschine, die Kälte erzeugt. Sie kann auch als „Energiepumpe“ aufgefasst werden. So wie eine Flüssigkeitspumpe auf der Saugseite einen Unterdruck erzeugen kann

und auf der Druckseite einen Überdruck, erzeugt die Kältemaschine auf der kalten Seite eine Temperatur unter der Umgebungstemperatur und auf der warmen Seite eine Temperatur über der Umgebungstemperatur. Der Zustand wird in Grad Celsius oder in Kelvin unter bzw. über der Umgebungstemperatur beschrieben. Die Kälteleistung dieser Energiepumpe ist der Energiefluss auf der „Saugseite“ und wird in Kilowatt angegeben. Verschiedene Verfahren zur Erzeugung von Kälte werden weiter unten in diesem Dokument beschrieben.

Wärme kann nicht „vernichtet“ werden.

Eine Grunderkenntnis der Thermodynamik ist das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Wegen seiner grundlegenden Bedeutung wird es auch „Erster Hauptsatz der Thermodynamik“ genannt. Es besagt, in einfachen Worten ausgedrückt, dass Energie nicht „vernichtet“ werden kann. Energie kann transportiert werden und von einer Energieform in eine andere oder auch in Arbeit umgewandelt werden. Diesem Gesetz folgend muss zur Erzeugung von Kälte die im System vorhandene Wärme abtransportiert werden.

Energieformen, Energieumwandlung und Energietransport.

Es gibt viele Formen, in denen Energie auftreten kann. Die wohl bekannteste Form neben der Wärmeenergie (thermische Energie) ist die elektrische Energie. Die Energie, die ein Körper aufgrund seines Bewegungszustandes besitzt, nennt man kinetische Energie. Ist ein Körper aufgrund seiner räumlichen Position in der Lage Arbeit zu verrichten, spricht man von potenzieller Energie. Das Arbeitsvermögen, das ein Stoff auf Grund seines chemischen und physikalischen Zustands besitzt, nennt man Enthalpie. Dieses hängt einerseits von den physikalischen Zustandsgrößen Druck, Dichte und Temperatur ab und andererseits von Eigenschaften wie den Aggregatzustand, chemischen Bindungen, Kristallstruktur und Ähnlichem.

Wenn sich der Energieinhalt eines Stoffes ändern soll, muss Energie von dort an einen anderen Ort fließen. Dabei können verschiedene Energieformen ineinander umgewandelt werden. Wasser im oberen Becken eines Wasserkraftwerkes besitzt potenzielle Energie. Werden die Schleusen geöffnet beginnt das Wasser

zu fließen und die potenzielle Energie wandelt sich in kinetische Energie. Diese kann in einer Turbine in eine Drehbewegung verwandelt werden, die wiederum in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

Ähnlich wie das Wasser im Kraftwerksbecken besitzt auch Wasserdampf ein Energiepotenzial. Die Enthalpie des Wasserdampfes ist höher als die des Wassers. Steht der Dampf noch unter Druck, ist die Enthalpie noch höher. Wird der Wasserdampf kondensiert, kommt es zu einem Energiefluss in Form von Wärme. Wird der Dampf in einer Turbine entspannt, kann die Energie wiederum in elektrische Energie umgewandelt werden. Da bei dieser Umwandlung die Enthalpie des Wasserdampfes abnimmt, fällt der Druck und die Temperatur sinkt.

Die Kältetechnik dreht die in der Energietechnik üblichen Prozesse um.

Lässt man den oben beschriebenen Prozess andersherum laufen und verdichtet kalten Dampf in einem Kompressor, wird elektrische Energie in Enthalpie umgewandelt. Der Dampf hat dann am Ausgang einen höheren Druck und eine höhere Temperatur. Diese Verdichtung ist ein wichtiger Schritt bei Kälteprozessen. Wie man diesen Effekt ausnutzt, wird weiter unten in diesem Dokument beschrieben. Auch die Abkühlung von Dampf beim Entspannen ist von grundlegender Bedeutung für die Kälteerzeugung. Dieser Effekt tritt nicht nur auf, wenn Dampf in einer Turbine entspannt (=auf einen niedrigeren Druck gebracht) wird, sondern auch, wenn man ein Gas oder Dampf in einem Drosselventil entspannt. Die dritte wichtige Energieumwandlung in der Kältetechnik ist der Umkehrprozess der Kondensation, nämlich der Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand. Verdunstet oder verdampft eine Flüssigkeit, entzieht sie der Umgebung thermische Energie (Wärme) und wandelt diese in Verdampfungsenthalpie um. Dasselbe geschieht, wenn eine Substanz vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht, wie dies z.B. bei „Trockeneis“ (festem Kohlendioxid) der Fall ist.

Kältemaschinen müssen Wärme entgegen ihrer natürlichen Flussrichtung transportieren.

Besteht irgendwo ein thermodynamischer Ungleichgewichtszustand, ist die Natur von sich aus bestrebt, wieder einen Gleichgewichtszustand herzustellen. Ein Gleichgewichtszustand im Sinne der Thermodynamik ist – einfach formuliert - ein Zustand, in dem alles gleich verteilt ist: gleiche Temperaturen, gleiche Drücke, etc. Da Kälte, wie oben bereits formuliert, eine Situation mit unausgeglichenen Temperaturen darstellt, fließt aus der Umgebung ständig Wärme nach. Man kann diesen Wärmefluss durch eine gute Isolierung zwar bremsen, aber nicht vollständig stoppen. Die Aufgabe von Kältemaschinen ist es daher nicht nur, einmalig einen Zustand mit niedrigeren Temperaturen zu erzeugen, sondern vor allem auch kontinuierlich die nachfließende Wärme „abzupumpen“ und an einen Ort zu transportieren, wo sie nicht stört.

Wärme kann prinzipiell nur von einem Ort mit höherer Temperatur an einen Ort mit niedrigerer Temperatur fließen. Diese Tatsache wird durch thermodynamische Gesetzmäßigkeiten belegt. Ebenso gibt es Definitionen bezüglich der Wertigkeit verschiedener Energieformen. Die Wertigkeit einer Energie leitet sich daraus ab, wie viel Arbeit sie verrichten kann. Elektrische Energie ist z. B. eine besonders hochwertige Energie; Wärme bei moderaten Temperaturen hingegen ist eher minderwertig. Je höher die Temperatur, desto höherwertiger ist auch die Wärme.

Die Kernaufgabe der Kältetechnik ist es, Wärme an einen Ort mit höherer Temperatur zu transportieren und dafür möglichst wenig höherwertige Energie aufzuwenden. Daher wird in der Kältetechnik die Güte des Hauptprozesses auch nicht in den sonst bei der Energieumwandlung üblichen Wirkungsgraden von 0 bis 100 Prozent bemessen. Vielmehr wird angegeben, wie viel hochwertige Energie nötig ist, um eine bestimmte Menge minderwertiger Energie (Wärme) zu transportieren. Bei guten Kälteanlagen wird mit einer Kilowattstunde Strom die vierfache Menge an Wärme transportiert.

Wärmeübergänge werden durch eine „treibende Temperaturdifferenz“ verursacht.

Wie oben beschrieben, fließt Wärme in der Natur ohne weitere Einwirkungen von außen immer von einem Ort mit höherer zu einem Ort mit niedrigerer Temperatur. Wie stark dieser Wärmefluss ist, hängt von der Temperaturdifferenz ab. Man spricht daher auch von der „treibenden Temperaturdifferenz“. Daneben hängt der Wärmefluss noch von der Wärmeleitfähigkeit des Materials ab. Hält man einen Eisenstab in heißes Wasser, fließt die Wärme spürbar zum kälteren Ende des Stabes. Nimmt man hingegen einen Holzstab, ist der Wärmefluss deutlich geringer. Für die Gesamtmenge des Wärmetransports ist auch die Querschnittsfläche wichtig. Durch einen dicken Stab kann insgesamt mehr Wärme fließen als durch einen dünnen. Analog fließt durch eine große Wand mehr Wärme als durch eine kleine.



Für die Kältetechnik hat dies verschiedene wichtige Konsequenzen:

- Will man den Wärmedurchgang gering halten, um beispielsweise zu vermeiden, dass zuviel Wärme in einen Kühlraum eindringt, muss man die Wandfläche möglichst klein halten und ein Wandmaterial mit einer schlechten Wärmeleitung benutzen. Eine Form mit einer geringen Oberfläche im Verhältnis zum (Lager-)Volumen ist ein Kubus. Ein Material mit schlechter Wärmeleitfähigkeit (= guten Dämmeigenschaften) ist z.B. Styropor.

- Will man einen möglichst hohen Wärmedurchgang erzielen, muss man die Oberfläche möglichst groß gestalten und ein Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit benutzen. Dies ist z. B. bei Wärmeaustauschern der Fall. Zwei eng aneinander liegende Stahlplatten, bei denen der dazwischen liegende Spalt mit einer Wärmeträgerflüssigkeit gefüllt ist, haben eine große Oberfläche im Verhältnis zum umschlossenen Flüssigkeitsvolumen. Dazu ist Stahl ein guter Wärmeleiter.
- Will man in einem Wärmeaustauscher die treibende Temperaturdifferenz senken, ohne dass dabei der Wärmefluss sinkt, muss man die Wärmeaustauscherfläche durch zusätzliche Platten, Lamellen oder Rohrschlangen vergrößern.

Verfahren zur „Erzeugung von Kälte“.

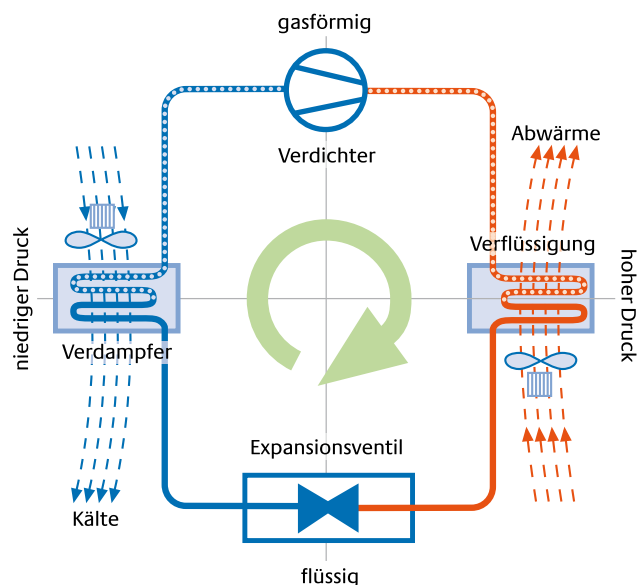
Kühlen durch Verdunstung.

Der einfachste und älteste bekannte Kälteprozess ist die Verdunstungskühlung. Dabei entzieht das Wasser die zur Verdunstung nötige Energie seiner Umgebung, insbesondere der Oberfläche, auf der die Verdunstung stattfindet. Früher wurden auf diese Art und Weise z.B. Tongefäße gekühlt, in denen Lebensmittel aufbewahrt wurden. Um die niedrigeren Temperaturen zu halten, muss ständig Wasser nachgeführt werden. Da mit dieser Methode jedoch keine sehr hohe Leistungsdichte erzielt werden kann, wird die Verdunstung heute in technischem Maßstab selten als allein stehender Kälteprozess verwendet. Ausnahmen gibt es bei der Gebäudeklimatisierung. So beruht der Kühleffekt von grasbewachsenen Dächern beispielsweise auf Verdunstung. Einen festen Platz hat die Verdunstung bei der „Rückkühlung“ von Kühlwasser, z.B. in Kühltürmen.

Kühlen durch Verdampfen.

Die meisten heute gebauten Kältemaschinen beruhen auf Kaltampfprozessen. Hier werden Stoffe verwendet, die schon bei sehr niedrigen Temperaturen siedend. Dabei wird ausgenutzt, dass die Siedetemperatur druckabhängig ist. An der Stelle, an der die Kälte erzeugt werden soll, wird der Druck so eingestellt, dass die Siedetemperatur unterhalb der Temperatur liegt, auf die gekühlt werden soll. Wenn das flüssige Kältemittel in diesen Bereich niedrigen Druckes eintritt, beginnt es zu siedend und muss, ähnlich wie bei der Verdunstung, Wärmeenergie aufnehmen, um gasförmig werden zu können. Die aufgenommene Energie kann nun mit dem gasförmigen Kältemittel an einen anderen Ort transportiert werden. Um die Energie wieder abzugeben, wird der Druck soweit erhöht, dass das Gas kondensiert. Der Druck muss dabei so hoch sein, dass die Kondensationstemperatur über der Umgebungstemperatur liegt, um einen natürlichen Wärmefluss vom Kältemittel zur Umgebung zu ermöglichen. Falls an dieser Stelle Kühlwasser eingesetzt wird, reicht es aus, wenn die Kondensationstemperatur des Kältemittels über der Temperatur des Kühlwassers liegt.

Abb. 1: **Kältekreislauf der Kompressionskältemaschine**

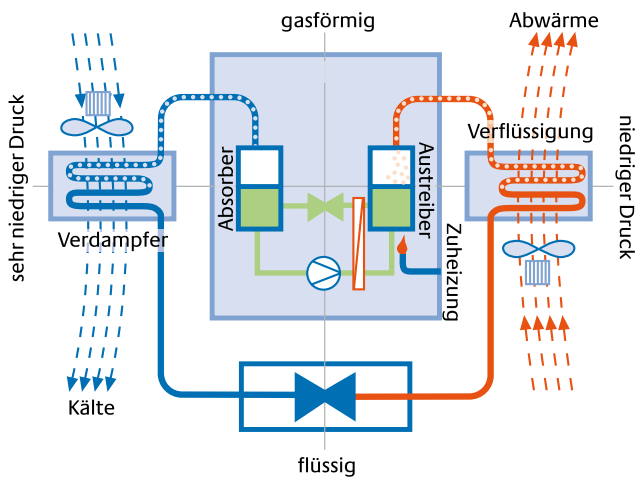


Theoretisch ließe sich bei der Kompressionskältemaschine auch Wasser als Kältemittel einsetzen. Dazu müsste der Prozess bei ausreichend niedrigen Drücken ablaufen, so dass die Siede- und Kondensationstemperaturen in dem gewünschten Bereich liegen. Der Verdichter müsste im Verdampfer einen sehr starken Unterdruck erzeugen (wenige Millibar). Selbst im Verflüssiger würde noch ein Unterdruck herrschen – etwas ein Zehntel des Atmosphärendrucks. In der Praxis ist dies für Kompressionskältemaschinen nicht wirtschaftlich.

Wie die Thermodynamik dem Verdichter unter die Arme greifen kann.

Eine Kältemaschine, bei der tatsächlich Wasser als Kältemittel eingesetzt wird, ist die Absorptionskälteanlage. Hier wird auf einen physikalischen Vorgang zurückgegriffen, um die Arbeit des Verdichters (in diesem Falle eine Pumpe) zu reduzieren. Der kalte Wasserdampf wird von einer konzentrierten, hygroskopischen Lithiumbromidlösung absorbiert. Durch dieses „Aufsaugen“ entsteht im Verdampfer der notwendige Unterdruck. Das auf diese Art und Weise verflüssigte Kältemittel (=Wasser, jetzt in Form einer verdünnten Lithiumbromidlösung) wird mit einer Flüssigkeitspumpe auf einen höheren Druck gebracht. Nun wird das Wasser unter Hitzezuführung wieder „ausgekocht“. Nach diesem Prozessschritt liegt, ebenso als ob der Kaldampf einen Kompressor durchlaufen hätte, wärmerer Dampf bei einem höheren Druck vor. Der Rest des Kältemittelkreislaufs entspricht prinzipiell dem der Kompressionskältemaschine. Die aufkonzentrierte LiBr-Lösung aus dem Austreiber wird in den Absorber zurückgeführt. Der Prozess findet kontinuierlich statt.

Abb. 2: Absorptionskälteanlage



Der Kältekreislauf einer Absorptionskälteanlage ist in Abb. 2 dargestellt. Die abgebildeten Systemkomponenten sind nur symbolisch zu verstehen und sollen die Analogie zur Kompressionskältemaschine und die prinzipielle Funktionsweise verdeutlichen. Tatsächlich wird meistens nicht in Rohrschlangen verflüssigt und verdampft, sondern durch Versprühen des Wassers. Auch Absorber und Austreiber sind in der Realität nicht nur einfache Behälter,

sondern Vorrichtungen, in denen eine gute Durchmischung stattfindet. Die Zuführung der Austreiberwärme kann durch direkte Befuerung, Heißwasser oder Dampf stattfinden.

Der Vorteil des Sorptionsverfahrens ist, dass die Flüssigkeitspumpe viel weniger Strom braucht als ein Kompressor, der den kalten Wasserdampf von wenigen Millibar auf 0,1 bar bringen würde. Das heißt aber nicht, dass dieser Prozess insgesamt weniger Energie erforderte. Tatsächlich wird für das „Auskochen“ sogar vergleichsweise viel Wärmeenergie benötigt. Wirtschaftlich vorteilhaft sind Absorptionskälteanlagen ab Leistungen von etwa 100 kW, wenn die Wärme für den Austreiber kostenlos oder zu sehr geringen Kosten zur Verfügung steht. Einige interessante Lösungsmöglichkeiten werden im Infoblatt „Kälteerzeugung“ vorgestellt (Download im Internet unter www.industrie-energieeffizienz.de >Service/Publikationen).

Weitere Kälteprozesse.

Ein Kälteprozess, der in der Tieftemperaturtechnik häufig zum Einsatz kommt, ist das Linde-Verfahren, ein so genannter Kaltgasprozess. Es funktioniert ähnlich wie der Kompressionskälteprozess, nur dass als Kältemittel ein Gas verwendet wird, welches nach dem Komprimieren nicht kondensiert. Die Wärmeaufnahme und -abgabe findet hier also nicht über einen Wechsel des Aggregatzustands statt. Stattdessen wird der Effekt ausgenutzt, dass sich Gase beim Expandieren abkühlen. In vielen hintereinander geschalteten Stufen kann man mit diesem Verfahren bis in die Nähe des absoluten Temperatur-Nullpunktes kommen.

Weitere Verfahren zur Kälteerzeugung sind Adsorptionskältemaschinen (ähnlich der Absorption), Diffusionsabsorptionskältemaschinen, thermoelektrische Peltierelemente und die „Magnetische Kühlung“. Da diese Verfahren (zumindest bis jetzt) keine Bedeutung für die großtechnische Kälteerzeugung haben, werden sie hier nicht weiter erläutert.

Fazit:

Um Kälte an einem Ort zu erzeugen, muss Wärme abtransportiert werden. Bei einer aktiven Kühlung geschieht dies durch einen Kälteprozess unter Zuführung von Energie. Dafür gibt es verschiedene Verfahren. Das am weitesten verbreitete ist die Kompressionskältemaschine. Steht eine kostenlose Wärmequelle zur Verfügung, kann auch ein Sorptionsprozess benutzt werden. Falls die Temperatur, auf die gekühlt werden soll, nur wenig unter der Umgebungstemperatur liegt, kann auch eine Verdunstungskühlung eingesetzt werden.

Tipps:

- Machen Sie sich mit den Energiemengen, die in Ihrem Kälteprozess transportiert werden oder werden sollen, vertraut. Welchen Wert könnte diese Energie haben?
- Stellen Sie sich vor der Auswahl eines Kälteprozesses die folgenden Fragen:
 - a) Existiert in der Nähe eine preisgünstige Wärmequelle mit einer Temperatur über 80°C? Dies würde für den Einsatz einer Absorptionskälteanlage sprechen.
 - b) Wird in der Nähe dauerhaft Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau benötigt? Dies würde für eine Rückgewinnung der Abwärme aus der Kälteanlage sprechen.
- Prüfen Sie, ob für eine Kühlung auch eine reine Verdunstungskühlung in Frage kommen würde und ob Sie andere Kältequellen wie Brunnenwasser oder kühle Nachtluft mit heranziehen können.

Die Angebote der Initiative EnergieEffizienz.

Die Kältetechnik ist eine in Industrie und Gewerbe weit verbreitete Technologie. Dabei bestehen in diesem Bereich erhebliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz: meist können in den Betrieben der Stromverbrauch – und damit die Kosten – um 5 bis 50 Prozent gesenkt werden. Die meisten Effizienzmaßnahmen sind mit Amortisationszeiten von weniger als zwei Jahren und hohen Kapitalrenditen von über 20 Prozent wirtschaftlich sehr attraktiv für die Unternehmen. Die *Initiative EnergieEffizienz* will mit diesen Faktenblättern einen Beitrag zur Erschließung dieser Potenziale leisten.

Neben der Kältetechnik bestehen auch in weiteren Bereichen oft große Effizienzpotenziale in Industrie- und Gewerbebetrieben aller Branchen. Daher bietet die *Initiative EnergieEffizienz* über das Thema Kältetechnik hinaus auch in weiteren Bereichen umfassende Informationen und praxisnahe Unterstützung für Unternehmen, die Strom effizienter nutzen und Kosten einsparen möchten. Näheres zu diesen Angeboten finden Sie im Internetportal www.industrie-energieeffizienz.de.

Die *Initiative EnergieEffizienz* steht für effiziente Stromnutzung in allen Verbrauchssektoren und ist eine in dieser Form einmalige Public-Private-Partnership: Mit zielgruppenspezifischen Kampagnen und Projekten werden Endverbraucher in privaten Haushalten, in Industrie und Gewerbe sowie im Dienstleistungssektor über die Möglichkeiten des effizienten Stromeinsatzes informiert und zum energieeffizienten Handeln motiviert.

Näheres zu den Angeboten in diesen Sektoren finden Sie unter www.initiative-energieeffizienz.de.

Die *Initiative EnergieEffizienz* wird getragen von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) sowie den Unternehmen der Energiewirtschaft – EnBW Energie Baden-Württemberg AG, E.ON AG, RWE AG und Vattenfall Europe AG und wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

Eine Initiative von



Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Impressum:
Informationsblätter
Kältetechnik

Herausgeber:
Deutsche Energie-Agentur
GmbH (dena)
Energieeffizienz im
Elektrizitätsbereich
Chausseestraße 128a, 10115 Berlin

Kontakt:
Tel.: +49 (0) 30 - 72 61 65 - 600
Tel.: +49 (0) 30 - 72 61 65 - 699
E-Mail: info@dena.de

Internet:
www.industrie-energieeffizienz.de
www.dena.de