

## 2 Verdichterkältemaschinen

Verdichterkältemaschinen zählen zu den Kaldampfmaschinen. Sie nutzen den Phasenwechsel flüssig – gasförmig. Anstatt Verdichterkältemaschine ist auch die Bezeichnung Kompressionskältemaschine gebräuchlich. Der Antrieb erfolgt mechanisch und in vielen Fällen über einen Elektromotor. Aufgrund der hohen Effizienz, der vergleichsweise einfachen Realisierbarkeit, der großen erreichbaren Leistungsdichte, der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Temperaturbedingungen und hohen Betriebssicherheit haben Verdichterkältemaschinen mit Abstand die größte Verbreitung von allen Kältemaschinen gefunden.

### 2.1 Der ideale Vergleichsprozess für die Kältemaschine

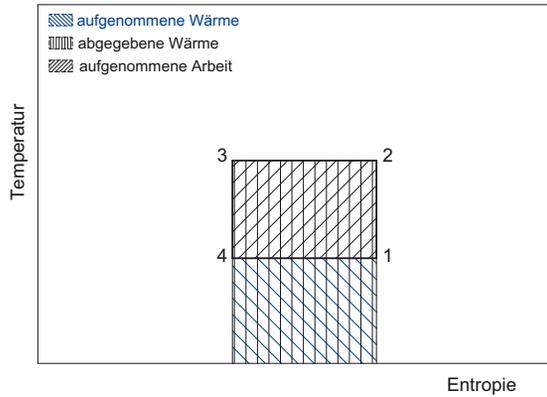
Der Carnot-Prozess wird als idealer Vergleichsprozess für eine durch Arbeitsaufnahme angetriebene Kältemaschine verwendet.<sup>1)</sup>

Der Carnot-Prozess besteht aus vier Zustandsänderungen, die nacheinander durchlaufen werden:

- 1 nach 2: isentrope (konstante Entropie = reversibel und adiabat, d. h. verlustfrei umkehrbar und wärmedicht) Verdichtung
- 2 nach 3: isotherme (konstante Temperatur) Wärmeabgabe
- 3 nach 4: isentrope Entspannung
- 4 nach 1: isotherme Wärmeaufnahme

Der Prozess ist im  $T,s$ -Diagramm, Bild 2.1, dargestellt. Die Entropie kann als eine Hilfsgröße aufgefasst werden (s. Anhang 1). Eine positive Entropiedifferenz zwischen Endzustand und Anfangszustand multipliziert mit der vorliegenden absoluten Temperatur ergeben die dem Prozess zugeführte Wärme. Entsprechend ergeben negative Entropiedifferenzen eine abzuführende Wärme. Die zu- oder abzuführende Wärme ist somit als Fläche dem  $T,s$ -Diagramm zu entnehmen. Werden die Beträge der beiden Flächen subtrahiert, ergibt sich eine von den einzelnen Zustandspunkten 1 bis 4 linksläufig umschlossene Fläche, deren Größe die vom Prozess aufgenommene Arbeit charakterisiert.

<sup>1)</sup> Nachfolgend wird keine begriffliche Unterscheidung zwischen der Kältemaschine und der Wärmepumpe vorgenommen, da kein prinzipieller Unterschied besteht, sondern nur die Wärmeströme unterschiedlich genutzt werden.

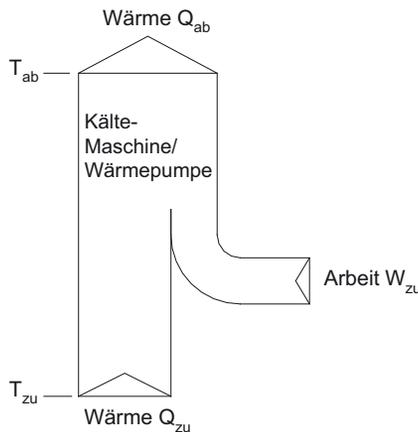


**Bild 2.1:** Idealer Vergleichsprozess der Kältemaschine im  $T,s$ -Diagramm

In der Kältetechnik bzw. in der Wärmepumpentechnik wird zumeist mit Energiebeträgen gerechnet und die Wirkrichtungen durch das Vorzeichen in den Bilanzgleichungen berücksichtigt. Die allgemeine Konvention ist, dass die einem Bilanzgebiet zugeführten Dinge ein positives und die abgeführten ein negatives Vorzeichen erhalten. Entsprechend Bild 2.1 ergibt sich folglich die Energiebilanz

$$Q_{ab} = W_{zu} + Q_{zu} \quad (2.1)$$

Im folgenden Energieflussdiagramm (Sankey-Diagramm), Bild 2.2, ist dieser Zusammenhang veranschaulicht.



**Bild 2.2:** Energieflussdiagramm des Kältemaschinenprozesses

Bei einem stationären Betrieb kann die Energiebilanz mit den Leistungen formuliert werden.

$$\dot{Q}_{\text{ab}} = P_{\text{zu}} + \dot{Q}_{\text{zu}}. \quad (2.2)$$

Effizienzkenngröße für die Nutzung als Kältemaschine:

$$\varepsilon_{\text{K,Carnot}} = \frac{\dot{Q}_{\text{zu}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{zu}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{zu}}}{Q_{\text{ab}} - Q_{\text{zu}}} = \frac{m \cdot \Delta s \cdot T_1}{m \cdot \Delta s \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}. \quad (2.3)$$

Diese Effizienzkenngröße hängt somit nur von den Temperaturen ab. Sie wird als Carnot-Kälteleistungszahl bezeichnet. Im englischen Sprachgebrauch (und inzwischen zum Teil auch in der deutschen Normung) wird für die Leistungszahl die Bezeichnung COP, d. h. Coefficient Of Performance, verwendet.

Effizienzkenngröße für die Nutzung als Wärmepumpe:

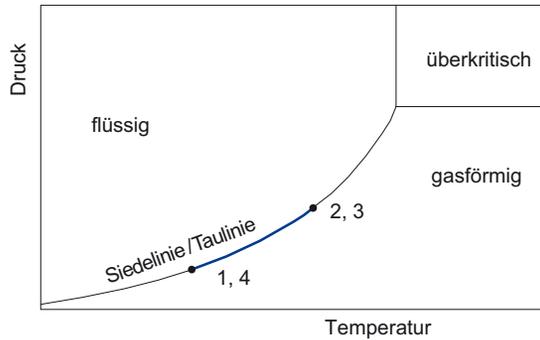
$$\varepsilon_{\text{WP,Carnot}} = \frac{\dot{Q}_{\text{zu}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{ab}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{ab}}}{Q_{\text{ab}} - Q_{\text{zu}}} = \frac{m \cdot \Delta s \cdot T_2}{m \cdot \Delta s \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (2.4)$$

Die Effizienz hängt ebenfalls nur von den Temperaturen ab. Sie wird als Carnot-Heizleistungszahl (auch Carnot-Heizzahl oder Carnot-Leistungszahl der Wärmepumpe) bezeichnet.

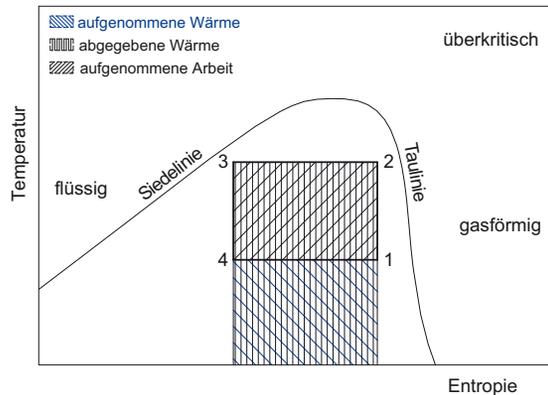
Ferner ergibt sich der Zusammenhang:

$$\varepsilon_{\text{WP,Carnot}} = \frac{Q_{\text{ab}}}{W_{\text{zu}}} = \frac{W_{\text{zu}} + Q_{\text{zu}}}{W_{\text{zu}}} = 1 + \frac{Q_{\text{zu}}}{Q_{\text{ab}} - Q_{\text{zu}}} = 1 + \varepsilon_{\text{K,Carnot}}. \quad (2.5)$$

Der Carnot-Prozess verlangt konstante Temperaturen bei der Wärmezufuhr und bei der Wärmeabfuhr. Konstante Temperaturen ergeben sich bei der Verdampfung und Kondensation eines reinen Stoffs (bzw. auch eines azeotropen Stoffgemischs) bei konstantem Druck, entsprechend des durch die Dampfdruckkurve gegebenen Zusammenhangs zwischen Dampfdruck und Temperatur. Damit besteht zumindest theoretisch die Möglichkeit, den Carnot-Prozess innerhalb des Nassdampfgebiets (s. Bild 2.3 und 2.4) eines Stoffs ablaufen zu lassen. Damit liegen Phasenwechsel des Stoffs vor. Die Effizienz dieses Prozesses bleibt dabei theoretisch betrachtet unabhängig vom gewählten Stoff. Es ist auch unerheblich, wie groß die Entropieänderungen sind (d. h. die Breite des Prozesses im  $T,s$ -Diagramm) und wie nahe die Prozessgrenzen an der Siedelinie oder der Taulinie liegen.



**Bild 2.3:** Idealer Vergleichsprozess in  $p,t$ -Phasendiagramm



**Bild 2.4:** Idealer Vergleichsprozess der Kältemaschine innerhalb des Nassdampfgebiets des  $T,s$ -Diagramms

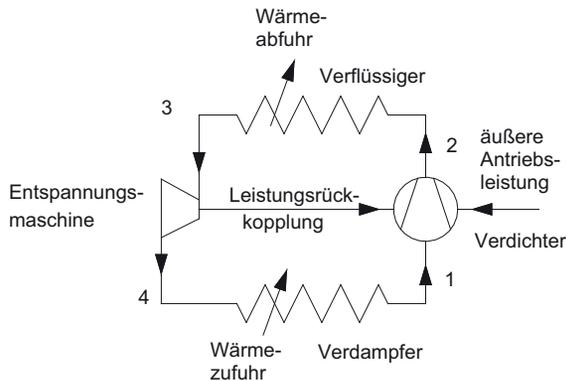
Die Realisierung des Prozesses könnte wie in Bild 2.5 dargestellt erfolgen. Es ist ein Verdichter notwendig, der reversibel und adiab (= isentrop) ein Zweiphasengemisch verdichtet. Der Verdichter fördert im Weiteren den Stoff bei konstantem Druck in einen Verflüssiger, in dem sich zumindest ein Teil des Stoffs weiter verflüssigt. Anschließend wird der Stoff arbeitsleistend isentrop entspannt. Bei einer solchen Entspannung wird die im verdichteten Stoff enthaltene potenzielle Energie genutzt und in Arbeit gewandelt, die innerhalb des Prozesses wiederum mit zum Antrieb des Verdichters genutzt wird. Damit ist die gesamte vom Verdichter aufgenommene Arbeit

$$W_V = W_{zu} + W_E \quad (2.6)$$

Von außen über die Systemgrenze muss daher nur die Arbeit des Carnot-Prozesses  $W_{zu}$  zugeführt werden.

Nach der Entspannung wird der Stoff aufgrund der Wärmezufuhr zumindest teilweise verdampft. Der Verdichter saugt den Stoff wieder an und der Prozessablauf schließt sich („Kreisprozess“).

Die Bezeichnung „Kreisprozess“ kann dahingehend interpretiert werden, dass der Stoff innerhalb des Systems entweder umlaufend oder periodisch abwechselnd bestimmte Zustände durchläuft. Die Masse des Stoffs im System ändert sich nicht, somit ist das System geschlossen (s. Anhang 1). Allgemein wird demnach für Carnot-Prozesse vorausgesetzt, dass die Prozesse geschlossen sind und die enthaltenen Stoffe nur insofern spezifiziert sind, dass eine isotherme Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe sowie isentrope Zustandsänderungen möglich sein müssen. Die Phasenänderungen Verdampfen und Verflüssigen ermöglichen in technisch einfacher Umsetzung die isothermen Zustandsänderungen. Erfährt der Stoff hingegen keine Phasenänderung, der Stoff bleibt beispielsweise gasförmig, müssen mit geeigneten Prozessführungen dennoch isotherme Zustandsänderungen herbeigeführt werden, wenn die nach dem Carnot-Prozess maximal mögliche Effizienz erreicht werden soll. So ist beispielsweise der in Kapitel 7 angegebenen Stirling-Prozess für manche Kaltgasmaschinen zugrunde gelegt. Die technische Realisierung solcher Maschinen ist vergleichsweise aufwendig.



**Bild 2.5:** Schematischer Aufbau einer Carnot-Kältemaschine

## 2.2 Prozesse mit Verdichtung im Gasgebiet und isenthalper Entspannung

Aus den folgenden beiden Gründen sind Änderungen des Prozessablaufs gegenüber dem Carnot-Prozess zweckmäßig:

1. Verdichter, die im Nassdampfgebiet arbeiten, laufen Gefahr durch Ansammlung von (inkompressibler) Flüssigkeit in den Verdichtungsräumen Schaden zu nehmen (sog. Flüssigkeitsschläge).