

BASISWISSEN

THERMODYNAMIK DES KÄLTEKREISPROZESSES

Aufbau und Funktion einer Kompressionskälteanlage

Das Kältemittel durchläuft bei einer Kompressionskälteanlage einen geschlossenen Kreisprozess mit folgenden vier Stationen:

- Verdampfen **A**
- Verdichten **B**
- Kondensieren **C**
- Entspannen **D**

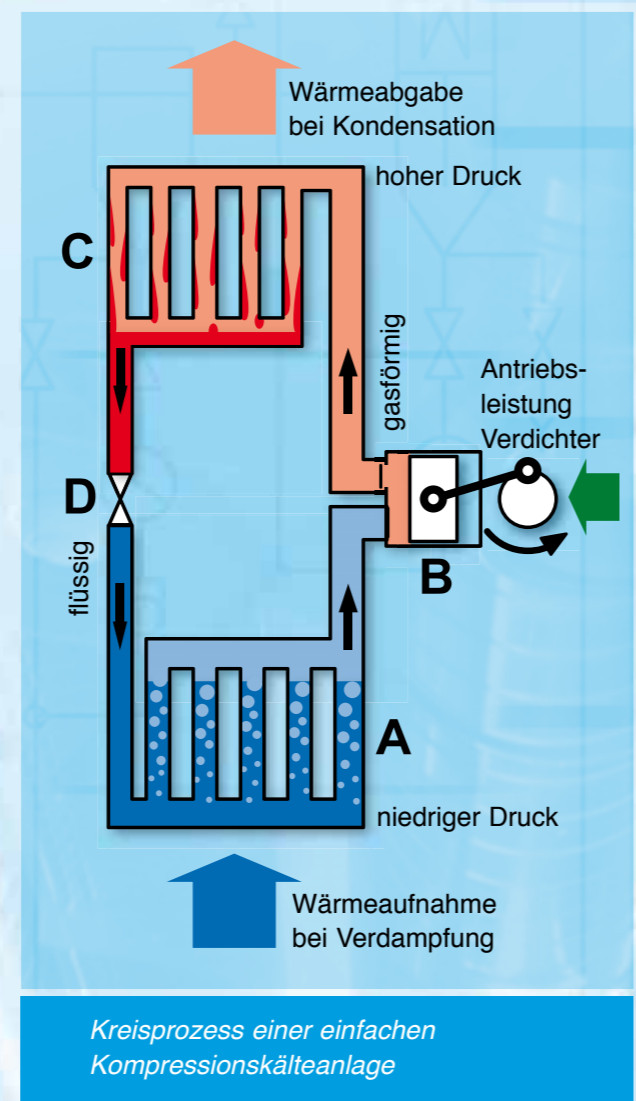
Die Kälteerzeugung findet im Verdampfer (A) statt. Die Verdampfung findet bei niedrigen Drücken und Temperaturen statt. Hier nimmt das Kältemittel Wärme aus der Umgebung auf und kühlt sie damit.

Der immer noch kalte Kältemitteldampf wird von einem Verdichter (B) angesaugt und unter Aufwendung mechanischer Energie auf einen höheren Druck gebracht. Durch die Verdichtung erhitzt sich der Kältemitteldampf.

Der heiße Kältemitteldampf wird in einem Verflüssiger (C) gekühlt und kondensiert unter Wärmeabgabe an die Umgebung.

Das flüssige, unter Druck stehende Kältemittel wird anschließend in einer Drossel (D) wieder auf den niedrigen Verdampfungsdruck entspannt und dem Verdampfer zugeführt.

Das Kältemittel verdampft erneut und damit schließt sich der Kreislauf.



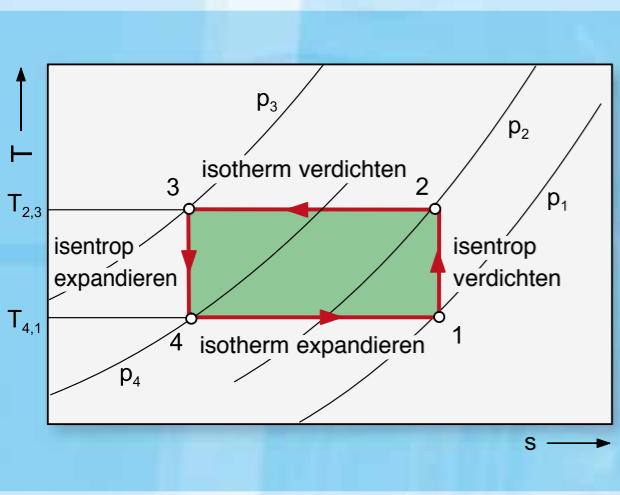
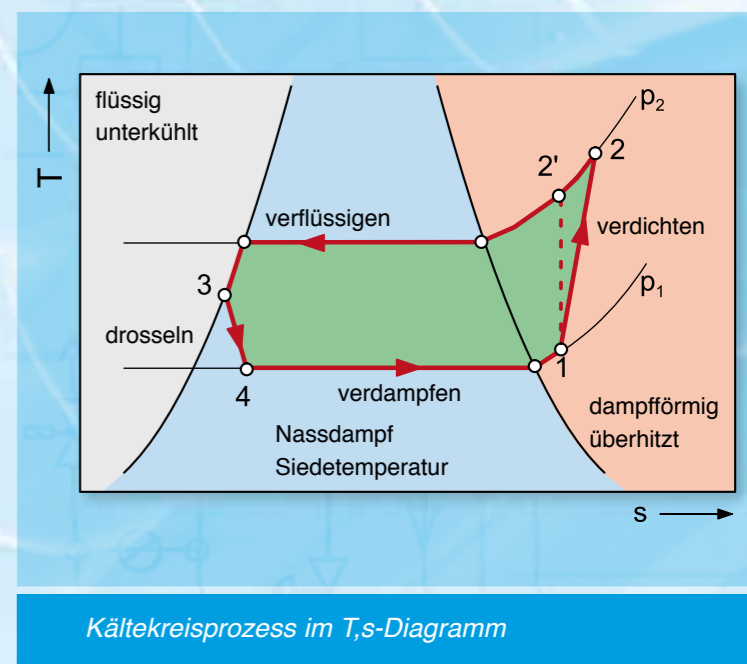
Der Kältekreisprozess

Bei Arbeitsmedien, die wie Wasser oder Kältemittel in verschiedenen Phasen auftreten können, sieht das T,s -Diagramm anders aus.

Es besitzt links einen Bereich (grau), in dem das Arbeitsmedium flüssig und unterkühlt ist. In der Mitte (blau) existiert ein Gemisch aus Dampf und Flüssigkeit, der Nassdampf. Rechts davon (rosa) ist das Arbeitsmedium rein dampfförmig und überhitzt.

Auch der reale Kältekreisprozess mit seinen typischen Phasenübergängen lässt sich in diesem T,s -Diagramm darstellen. Der Prozess hat viel Ähnlichkeit mit dem bekannten Dampfkraftprozess. Der größte Unterschied besteht darin, dass der Prozess entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen wird. Damit tauschen die Vorgänge Verdampfen und Verflüssigen sowie Drosseln (Entspannen) und Verdichten (Pumpen) ihre Positionen.

Die eingeschlossene Fläche (grün) entspricht der Verdichterarbeit, die dem Prozess zugeführt wird.



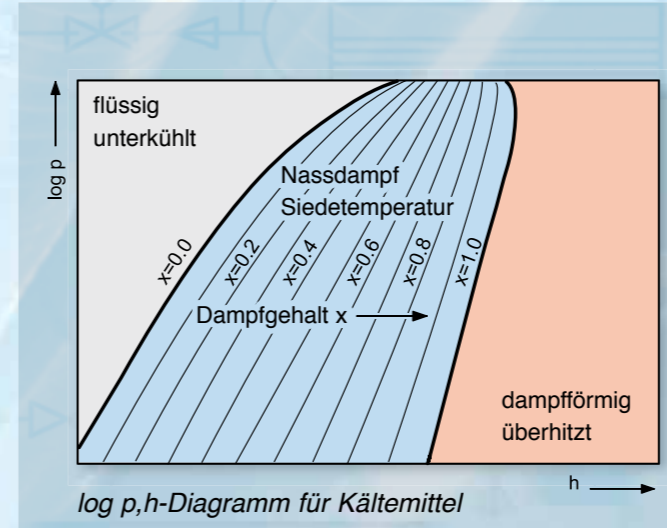
Idealer Kreisprozess (Carnot-Prozess) eines gasförmigen Mediums im T,s -Diagramm

Der ideale Kreisprozess

Ein Kreisprozess lässt sich besonders übersichtlich im T,s -Diagramm darstellen. Hier wird die Temperatur T des Arbeitsmediums über der Entropie s aufgetragen. Die von den Zustandsänderungen des Arbeitsmediums umschlossene Fläche entspricht der im Kreisprozess umgesetzten Arbeit.

Der Kreisprozess mit dem höchst möglichen Wirkungsgrad ist der Carnotprozess, hier ist die umschlossene Fläche ein Rechteck. Dieser Prozess wird gerne als Vergleichsprozess genommen, um die Güte eines Kreisprozesses zu beschreiben.

Der Umlaufsinn des Kreisprozesses im T,s -Diagramm entscheidet, ob es sich um einen Wärmepumpenprozess (Kältekreisprozess) oder einen Kraftmaschinenprozess (Dampfkraftprozess) handelt. Kältekreisprozesse werden entgegen dem Uhrzeigersinn durchlaufen und die durch die grüne Fläche dargestellte Arbeit wird dem Prozess zugeführt.



Das log p,h-Diagramm für Kältemittel

In dem log p,h-Diagramm ist der Druck p über der Enthalpie h aufgetragen.

Im mittleren Teil (blau) befindet sich das Nassdampfgebiet. Hier entspricht die Temperatur der zum Druck gehörenden Siedetemperatur. Das Nassdampfgebiet ist von Grenzkurven mit dem Dampfgehalt $x=0,0$ und $x=1,0$ umgeben.

Links davon (grau) ist das Kältemittel flüssig. Die Temperatur liegt unterhalb der zum Druck gehörenden Siedetemperatur, das Kältemittel ist unterkühlt.

Rechts (rosa) ist das Kältemittel gasförmig und die Temperatur ist höher als die Siedetemperatur. Das Kältemittel ist überhitzt.

Für jedes Kältemittel existiert ein eigenes log p,h-Diagramm.

Das log p,h-Diagramm ist zur Darstellung des Kältekreisprozesses besser geeignet als das T,s -Diagramm und wird damit vorwiegend angewendet.

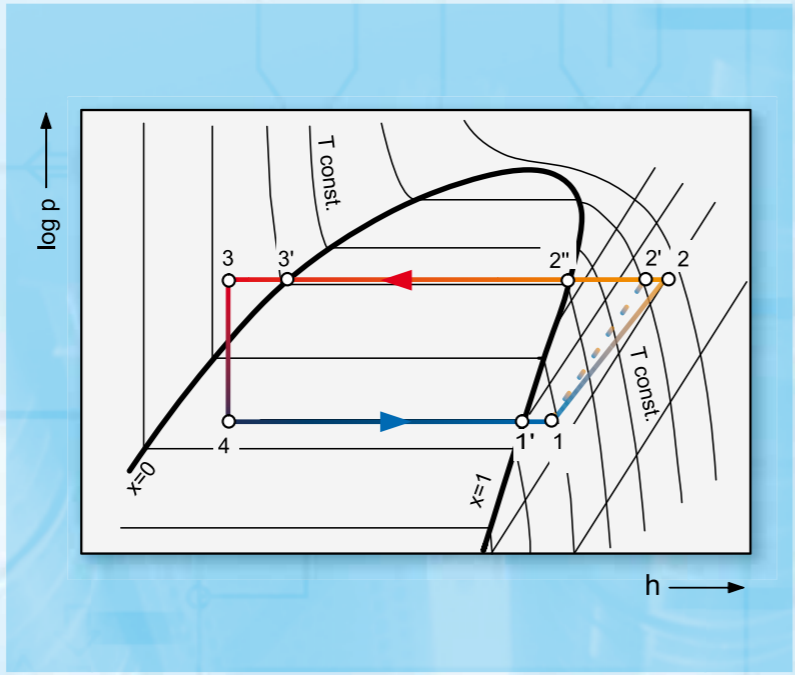
Da mit dem Kältemittel ausgetauschte Energien die Enthalpie h des Kältemittels verändern, können Energieströme unmittelbar aus dem Diagramm als waagrechte Strecken abgelesen werden.

BASISWISSEN THERMODYNAMIK DES KÄLTEKREISPROZESSES

Der Kältekreisprozess im log p,h-Diagramm

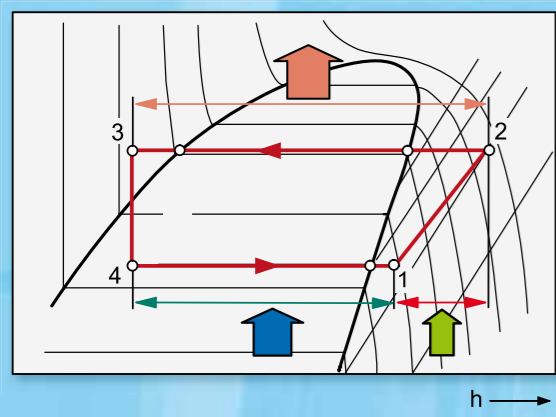
Der reale Kältekreisprozess besteht aus folgenden Zustandsänderungen:

- 1 – 2 polytrope Verdichtung auf den Verflüssigungsdruck (zum Vergleich 1 – 2' isentrope Verdichtung)
- 2 – 2'' isobare Abkühlung, Enthitzung des überhitzten Dampfes
- 2'' – 3' isobare Verflüssigung
- 3' – 3 isobare Abkühlung, Unterkühlung der Flüssigkeit
- 3 – 4 isenthalpe Drosselung auf den Verdampfungsdruck
- 4 – 1' isobare Verdampfung
- 1' – 1 isobare Erwärmung, Überhitzung des Dampfes



Kältekreisprozess im log p,h-Diagramm

Zusätzlich treten im realen Kältekreisprozess auch Druckverluste auf, so dass Verdampfung und Verflüssigung nicht genau horizontal (isobar) verlaufen.



Energieströme im Kältekreisprozess:
█ aufgenommene Kühlleistung
█ Verdichter-Antriebsleistung
█ abgegebene Wärmeleistung

Energetische Betrachtungen im log p,h-Diagramm

Die horizontale Abstände der Prozesseckpunkte im log p,h-Diagramm entsprechen den Enthalpiedifferenzen. Beim einfachen Kältekreisprozess ohne Verzweigung der Massenströme ergeben diese mit dem Kältemittelmassenstrom multipliziert die Energieströme oder Leistungen des idealen Systems. Die Abstände im log p,h-Diagramm sind also ein direktes Maß für die ausgetauschten Energieströme.

Die Strecke 4 – 1 entspricht der Kühlleistung und ist die Nutzleistung der Kälteanlage. Die Strecke 1 – 2 ist die über den Verdichter aufgewendete Antriebsleistung. Die Strecke 2 – 3 entspricht der über den Verflüssiger abgegebenen Wärmeleistung. Es ist die Abwärme der Kälteanlage.

Aus dem Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung lässt sich die Leistungszahl COP (Coefficient of Performance) bestimmen.

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Die Leistungszahl ist vergleichbar mit dem Wirkungsgrad bei einer Kraftmaschine.

Das Kältemittel

Jeder Kreisprozess braucht ein Arbeitsmedium, beim Kältekreisprozess ist es das Kältemittel. Das Kältemittel hat im Kältekreisprozess die Aufgabe, Wärme zu transportieren. Hier nutzt man die hohe Energieaufnahme beim Verdampfen bzw. Energieabgabe beim Kondensieren einer Flüssigkeit aus. Um dies bei den in einer Kälteanlage üblichen Temperaturen bei gut beherrschbaren Drücken durchzuführen, werden als Arbeitsmedium leicht siedende Flüssigkeiten wie verschiedene Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), Ammoniak (NH₃), Kohlendioxid (CO₂) oder Kohlenwasserstoffe wie Butan oder Propan verwendet.

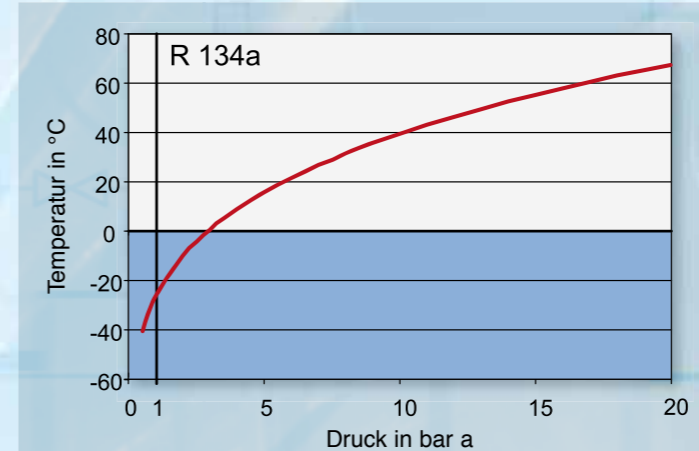
| Bezeichnung | | Siedetemperatur |
|----------------------|-----------|------------------|
| FKW R134a | Reinstoff | Ts = -26°C |
| FKW R404a | Gemisch | Ts = -47°C |
| FKW R407a | Gemisch | Ts = -39...-45°C |
| NH ₃ R717 | Reinstoff | Ts = -33°C |
| Isobutan R600a | Reinstoff | Ts = -12°C |
| CO ₂ R744 | Reinstoff | Ts = -78°C |

Die verschiedenen Kältemittel werden mit einem R und einer nachfolgenden Zahl gekennzeichnet.

Das in technischen Kreisprozessen oft eingesetzte Wasser eignet sich für den Kältekreisprozess nicht gut. Bei den in einer Kälteanlage üblichen tiefen Temperaturen ist der Verdampfungsdruck extrem niedrig und es besteht die Gefahr, dass das Wasser gefriert.

Technisch anspruchsvoll ist der Einsatz von CO₂. Hier ergibt sich aufgrund seiner tiefen Siedetemperatur eine sehr hohe Drucklage. Dies hat zur Folge, dass übliche Komponenten aus der Kältetechnik wie Ventile, Verdichter oder Wärmeübertrager nicht verwendet werden können.

Auch für NH₃ gibt es spezielle Komponenten, da kupferhaltige Werkstoffe nicht gegen Ammoniak beständig sind.



Dampfdruckkurve von FKW R134a

Wichtig für eine gute Funktion ist der Dampfdruckverlauf des Arbeitsmediums. Es soll bei niedrigen Drücken und gewünschten Kühltemperaturen gasförmig sein und bei hohen Drücken und Temperaturen flüssig. Weiterhin sollen die Drucklagen technisch gut beherrschbar sein.

Im Diagramm ist die Dampfdruckkurve des gut geeigneten FKW R134a gezeigt. Übliche Tiefkühltemperaturen von -26°C im Verdampfer lassen sich mit Drücken um 1bar realisieren, während zum Verflüssigen nur ein Druck von 17bar bei 60°C notwendig ist.

Während bei den Reinstoffen wie NH₃, Propan und CO₂ die Dampfdruckkurve festliegt, kann diese bei den FKW durch Mischungen verschiedener Grundsorten in weiten Grenzen den Bedürfnissen angepasst werden.