

Basiswissen Kältekreisprozess

Der Kältekreisprozess kann durch eine Folge von Zustandsänderungen eines Kältemittels beschrieben werden. Diese Folge verläuft periodisch und erreicht immer wieder den Ausgangszustand (Kreisprozess). In der Kältetechnik sind dabei insbesondere die Zustandsgrößen wie Druck, Temperatur und Dichte sowie die Abhängigkeit dieser Zustandsgrößen zueinander von Bedeutung.

Die thermodynamischen Vorgänge im Kältekreisprozess sind komplex. Die Berechnung über Formeln und Tabellen erfordert, aufgrund der drei verschiedenen Zustände des Kältemittels von flüssig, siedend und gasförmig, einen erheblichen Aufwand. Zur Vereinfachung wurde deshalb das sog. log p, h-Diagramm eingeführt.

Mit Hilfe eines log p,h-Diagrammes, lassen sich die verschiedenen Zustandsgrößen entsprechend ihrer Abhängigkeiten

grafisch darstellen. Zu jedem Zustandspunkt können die thermodynamischen Zustandsgrößen direkt ausgelesen werden und stehen für weitere Rechnungen zur Verfügung. Wärmemengen, technische Arbeit oder Druckdifferenzen einer Zustandsänderung sind als messbare Strecken dargestellt. Die Verwendung des log p,h-Diagrammes schafft eine erhebliche Vereinfachung thermodynamischer Berechnungen und ist für das Verständnis der Arbeitsweise von Kälteanlagen unerlässlich.

Auf Basis dieser Erkenntnis verfügt unsere Software für kältetechnische Geräte über eine Echtzeitdarstellung des jeweiligen log, p, h-Diagramms. Veränderungen von Betriebsparametern sind direkt im Diagramm ablesbar und erlauben einen prägenden Einblick in die Entstehung, der sonst nur statisch betrachteten thermodynamischen Zustände.

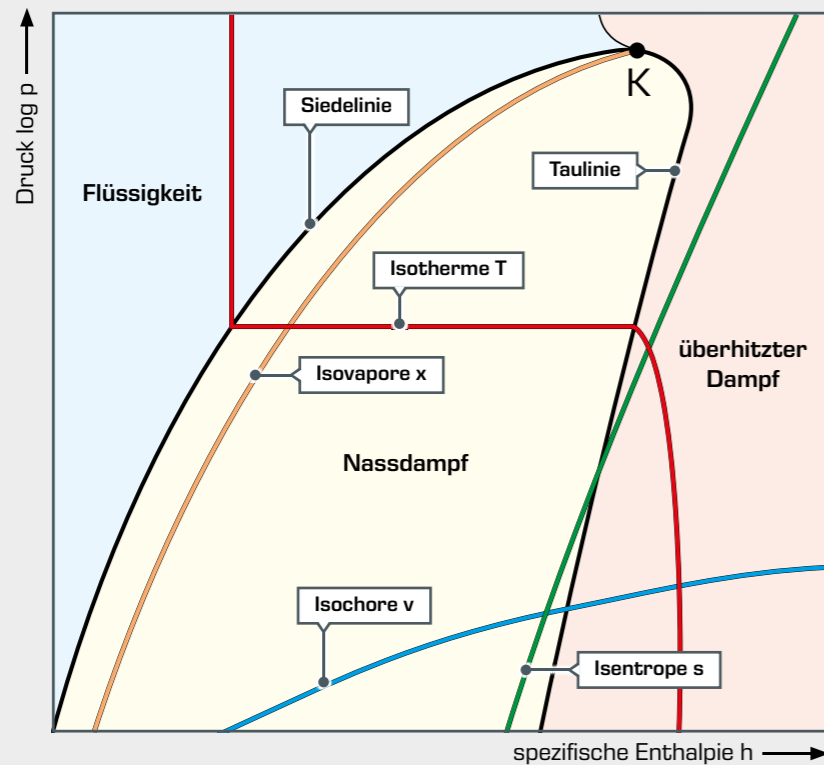
Allgemein zeigt ein log p, h-Diagramm den Aggregatzustand eines Stoffes, in Abhängigkeit von Druck und Wärme. Für die Kältetechnik ist das Diagramm auf die hierfür relevanten Bereiche von **flüssig** und **gasförmig** sowie deren **Mischform** reduziert.

Auf der senkrechten Achse ist der Druck logarithmisch dargestellt und auf der waagerechten Achse befindet sich die spezifische Enthalpie mit linearer Skalierung. Dementsprechend verlaufen die Isobaren waagerecht und die Isenthalpen senkrecht. Die logarithmische Skalierung erlaubt die Darstellung von Prozessen mit großen Druckdifferenzen.

Im kritischen Punkt **K** treffen sich Tau- und Siedelinie.

Aus dem log p, h-Diagramm können die thermodynamischen Zustandsgrößen, in der jeweiligen Phase, abgelesen werden.

- Druck **p**
- spezifische Enthalpie **h**
- Temperatur **T**
- spezifisches Volumen **v**
- spezifische Entropie **s**
- Gasanteil **x**

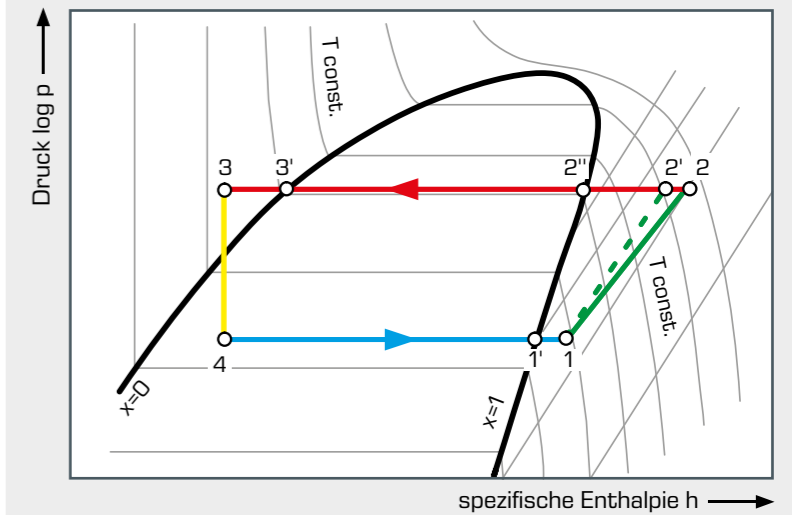


Der Kältekreisprozess im log p,h-Diagramm

Die Besonderheit des Kältekreisprozesses ist, dass dieser linksläufig erfolgt, also entgegengesetzt zum Joule- oder Dampf-kraftprozess. Eine Zustandsänderung erfolgt beim Durchströ-

men des Kältemittels durch eine der vier Hauptkomponenten der Kälteanlage. Der reale Kältekreisprozess besteht aus den folgenden Zustandsänderungen:

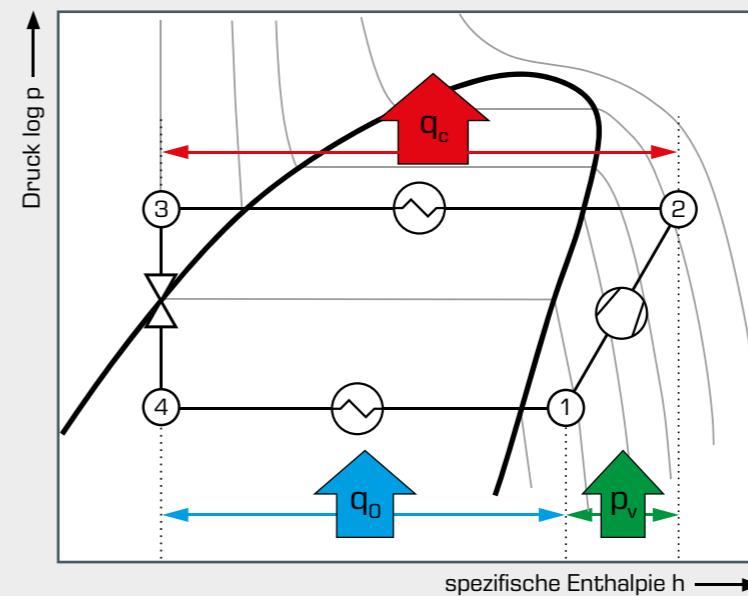
- 1 – 2 polytrope Verdichtung auf den Verflüssigungsdruck (zum Vergleich 1 – 2' isentrope Verdichtung)
- 2 – 2'' isobare Abkühlung, Enthitzung des überhitzten Dampfes
- 2'' – 3' isobare Verflüssigung
- 3' – 3 isobare Abkühlung, Unterkühlung der Flüssigkeit
- 3 – 4 isenthalpe Entspannung auf den Verdampfungsdruck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



Kältekreisprozess im log p,h-Diagramm

■ Verdichter, ■ Verflüssiger, ■ Expansionsventil, ■ Verdampfer

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



Die **spezifischen Energiemengen**, die zum Erreichen der Zustandspunkte aufgenommen und abgegeben werden, sind im log p,h-Diagramm als Strecken gekennzeichnet. Die spezifische Enthalpie **h**, lässt sich für jeden einzelnen Zustandspunkt direkt aus dem log p,h-Diagramm abgelesen.

Ist der Massenstrom des Kältemittels bekannt, so kann mit Hilfe der spezifischen Enthalpie im jeweiligen Zustandspunkt die zugehörige **thermische Leistung** berechnet werden.

- Die Strecke $h_1 - h_4 = q_0$ entspricht der Kühlung und ergibt durch Multiplikation mit dem Massenstrom die **Kälteleistung**.
- Die Strecke $h_2 - h_1 = p_v$ entspricht der technischen Arbeit des Verdichters, die tatsächlich auf das Kältemittel übertragen wird.
- Die Strecke $h_2 - h_3 = q_c$ entspricht der abgegebenen Wärme und ergibt durch Multiplikation mit dem Massenstrom die **Verflüssigerleistung**. Es ist die Abwärme einer Kälteanlage.

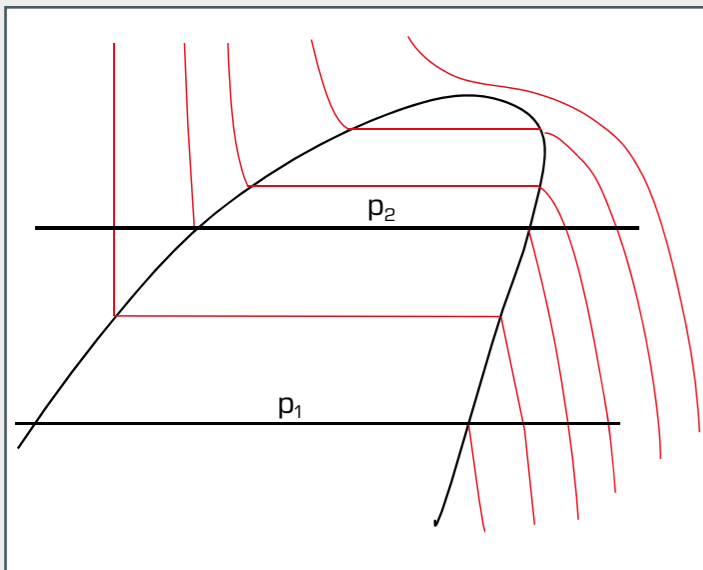
Basiswissen

Darstellung eines Kälteprozesses im log, p, h-Diagramm

Der Exkurs soll helfen, den funktionellen Zusammenhang zwischen den Komponenten der Kälteanlage und den thermodynamischen Prozessen zu verstehen. Um einen Kältekreisprozess im log p, h-Diagramm darzustellen sind folgende Zustandsgrößen erforderlich:

- p_1 Verdampfungsdruck
- T_1 Temperatur am Verdichtereintritt
- p_2 Verflüssigungsdruck
- T_2 Temperatur am Verflüssigereintritt
- T_3 Temperatur am Verflüssigeraustritt

1. Schritt: Begrenzende Isobaren eintragen

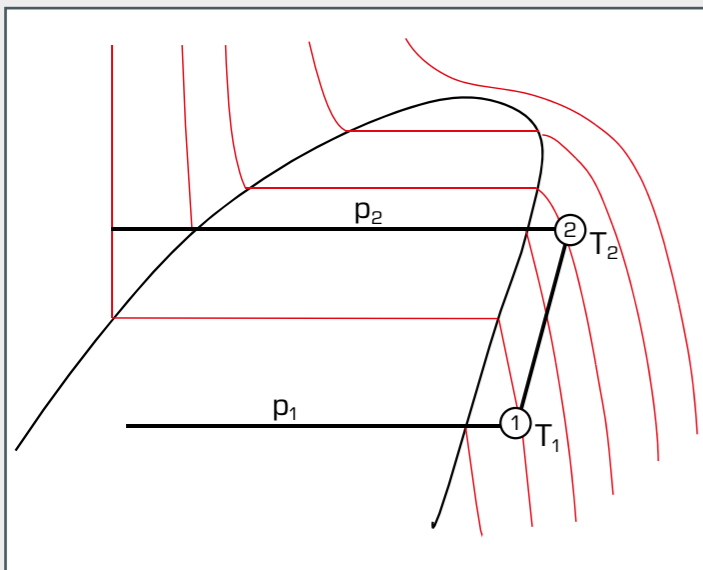


Zunächst müssen die isobaren Zustandsänderungen in das Diagramm eingetragen werden.

- p_1 Verdampfungsdruck
- p_2 Verflüssigungsdruck

Dabei ist es wichtig, dass Absolutdrücke in das Diagramm eingetragen werden.

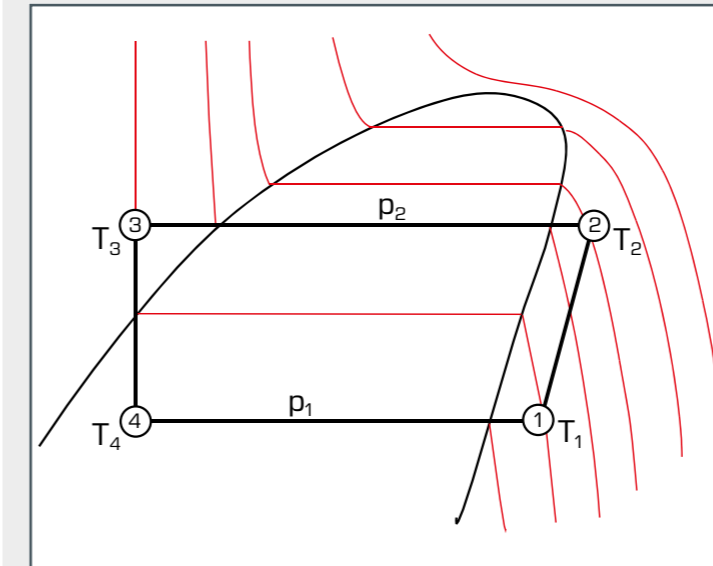
2. Schritt: Verdichtungsprozess eintragen



Nachdem die begrenzenden Isobaren in das Diagramm eingetragen sind, kann nun der Verdichtungsprozess eingetragen werden.

- Kennzeichnen des Schnittpunktes der Isobaren p_1 mit der Temperatur am Verdichtereintritt T_1 ergibt den Zustandspunkt 1.
- Kennzeichnen des Schnittpunktes der Isobaren p_2 mit der Temperatur am Verflüssigereintritt T_2 ergibt den Zustandspunkt 2.
- Die Verbindung zwischen den beiden Zustandspunkten 1 und 2 beschreibt den Verdichtungsprozess.

3. Schritt: Isenthalpe Entspannung eintragen

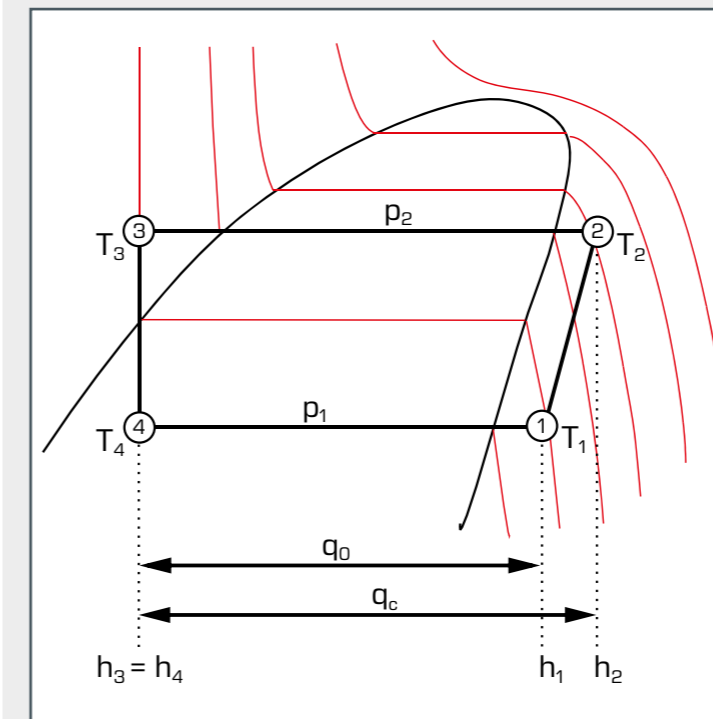


Der Entspannungsprozess wird wie folgt in das Diagramm eingetragen:

- Kennzeichnen des Schnittpunktes der Isobaren p_2 mit der Temperatur T_3 am Austritt des Verflüssigers ergibt den Zustandspunkt 3.

Bei der Entspannung handelt es sich um einen isenthalpen Prozess. Deshalb kann der zuvor markierte Schnittpunkt durch eine senkrechte Linie mit der Isobaren p_1 verbunden werden. Dadurch entsteht der letzte Zustandspunkt 4 mit der Verdampfungstemperatur T_4 .

4. Schritt: Spezifische Enthalpiewerte abtragen



Für die Berechnung von Betriebszuständen einer Kälteanlage ist es erforderlich, die spezifischen Enthalpien der einzelnen Zustandsänderungen zu ermitteln. Die Vorgehensweise dafür ist wie folgt:

Durch eine senkrechte Verbindung der Zustandspunkte mit der x-Achse, kann jeweils die spezifische Enthalpie abgelesen werden.

- h_1 spez. Enthalpie nach Verdampfer
- h_2 spez. Enthalpie nach Verdichter
- h_3 spez. Enthalpie nach Verflüssiger
- h_4 spez. Enthalpie nach Expansionsventil

Die spezifische Kälteleistung q_0 und die spezifische Verflüssigerleistung q_c können direkt aus dem log p, h-Diagramm abgelesen werden.

spezifische Kälteleistung $q_0 = h_1 - h_4$

spezifische Verflüssigerleistung $q_c = h_2 - h_3$