

2 Der Kältekreislauf

2.1 Die Verdampfung des Kältemittels; Wärmeaufnahme

Beim Verdampfen einer Flüssigkeit wird Wärme gebunden bzw. „Kälte erzeugt“.

Die Flüssigkeit, die im Verdampfer einer Kühlanlage verdampft, ist das Kältemittel. Es siedet bei einer Temperatur, die als **Verdampfungstemperatur** T_0 (in K), t_0 (in °C) bezeichnet wird. Der Formelzeichen-Index $_0$ verweist auf die Verdampferseite der Kälteanlage.

T_0 ist immer niedriger als die Temperatur des Kühlgutes (siehe zweiter Hauptsatz).

Der Wert dieser Verdampfungstemperatur ist abhängig vom **Verdampfungsdruck** p_0 – beide Werte sind aneinander gebunden:

Zu einem bestimmten Verdampfungsdruck gehört stets eine bestimmte Verdampfungstemperatur (siehe Gasgesetze).

Maßgeblich für die Höhe des Verdampfungsdrucks sind:

- die Größe der Wärmemenge, die im Verdampfer der Kältemaschine auf das Kältemittel einwirkt, und
- die Ansaugleistung des Verdichters.

Eine bestimmte Masse Kältemittel kann eine bestimmte Wärmemenge binden. Dabei findet eine **Enthalpie-Erhöhung** von H_1 nach H_2 statt. Die aufgenommene Wärmemenge entspricht damit einer Kältearbeit:

$$Q_0 = H_2 - H_1 \quad (G: 2.1)$$

Bezieht man die Enthalpie auf eine bestimmte spezifische Masse (z. B. 1 kg Kältemittel), so ergibt sich:

$$Q_0 = m_K \cdot h_2 - m_K \cdot h_1 = m_K (h_2 - h_1) \quad (G: 2.2)$$

Hierbei ist m_K die Masse des Kältemittels in Kilogramm. Möchte man eine bestimmte Kühlleistung erreichen, so gilt:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_K (h_2 - h_1) \quad (G: 2.3)$$

\dot{m}_K bezeichnet den Massenstrom des Kältemittels in kg/h und \dot{Q}_0 die Kühlleistung.

Der Kältemittel-Massenstrom gibt an, wieviel Kältemittel im Laufe einer Stunde durch die Kälteanlage strömen und verdampfen muss, um eine bestimmte Kühlleistung (x) in kJ/h zu erreichen.

Hier sind zunächst physikalische, verlustfreie Idealfälle angeführt, ohne Berücksichtigung von Strömungsverlusten u. a. m.

Ist das spezifische Volumen eines Kältemittels oder seine Dichte bekannt, so lässt sich errechnen, welches Volumen V_0 das Kältemittel einnimmt (in m^3) bzw. wie groß sein Volumenstrom \dot{V}_0 ist (in m^3/h):

Diesem Volumenstrom muss die Ansaugleistung eines Kältemittel-Verdichters entsprechen.

So gilt:

$$\dot{Q}_0 = \frac{\dot{V}_0}{v} \cdot (h_2 - h_1)$$

\dot{V}_0 = Hubvolumenstrom des Verdichters (in m^3/h)
 v = spez. Volumen (in m^3/kg)
 h_1 = spez. Enthalpie vor Verdampfung (in kJ/kg)
 h_2 = spez. Enthalpie nach Verdampfung (in kJ/kg) (G: 2.4)

Die Werte für h , v sowie für p_0 (= Verdampfungsdruck) findet man in den Nassdampf tabellen des jeweiligen Kältemittels (siehe dazu Anhang 10.4).

2.2 Die Verflüssigung des Kältemittels

Der vorangehende Abschnitt hat gezeigt, wie durch die Wärmebindung, die mit der Verdampfung des Kältemittels einhergeht, „Kälte erzeugt“ werden kann. Das verdampfte Kältemittel nun an die Umgebungsluft abzugeben, wäre wegen der damit verbundenen Kosten und wegen der Umweltbelastung nicht möglich. Deswegen ist es so aufzubereiten, dass es für eine erneute Wärmeaufnahme zur Verfügung steht: Es muss wieder verflüssigt werden.

Zu Beginn des Verdampfungsprozesses ist das Kältemittel flüssig, es steht unter einem bestimmten Druck p_0 und siedet bei der zugehörigen Verdampfungstemperatur T_0 bzw. t_0 – es liegt eine Phase des *Nassdampfes* vor. Bei beendeter Verdampfung ist das Kältemittel gasförmig – dies ist eine Phase des *gesättigten*, ggf. auch geringfügig *überhitzten* Dampfes.

Um das Kältemittel wieder in den Ausgangszustand zu versetzen, lässt man es in einen Zylinder einströmen, wo es von einem Kolben zusammengedrückt wird. Seine Moleküle werden dabei „zusammengeschoben“, es wird verdichtet. Die Verdichtung des Kältemittels bewirkt, dass seine Moleküle mit einer größeren Kraft gegen die Zylinderwandung stoßen und in heftige Schwingungen geraten – und somit, dass Druck und Temperatur des Kältemittels steigen. Dabei erreicht die Temperatur des Kältemittels einen höheren Wert als die Umgebungstemperatur.

Mit dieser hohen Temperatur strömt das Kältemittel in einen Wärmeaustauscher, den **Kondensator** (Verflüssiger*), wo es Wärme an einen kälteren Stoff (Umgebungsluft oder Kühlwasser) abgibt.

* *Kondensatoren dienen in der Kältetechnik der Verflüssigung des Kältemittels und werden daher auch Verflüssiger genannt. Der Begriff Kondensator wird auch in der Elektrotechnik verwendet, bezeichnet dort jedoch ein völlig anderes elektronisches Bauteil.*

Die Kondensation vollzieht sich bei der **Kondensationstemperatur** t_c und dem zugehörigen **Kondensationsdruck** p_c (dem sog. **Sättigungsdruck**).

Im Kondensator wird diejenige Wärmemenge abgeführt, die der Kühlleistung \dot{Q}_0 und der in Wärme umgewandelten Antriebsenergie entspricht. Aufgrund der Wärmeabgabe im Kondensator verflüssigt sich das Kältemittel wieder – es kondensiert – und steht (nach Abkühlung) für eine erneute Wärmeaufnahme zur Verfügung.

Das wieder verflüssigte Kältemittel steht unter hohem Sättigungsdruck. Dadurch liegt sein Siedepunkt so hoch, dass keine Verdampfung stattfinden kann.

Um in einem stabil flüssigen Zustand* durch die Leitungen einer Kühlanlage geführt werden zu können, und weil das flüssige Kältemittel abgekühlt werden muss, um danach wieder verdampfen zu können, erfolgt nun eine sog. **Unterkühlung** des Kältemittels. Das bedeutet, dass die Temperatur des Kältemittels, bei weiterhin herrschendem Sättigungsdruck, unter die Verflüssigungstemperatur am Kondensatorausgang sinkt.

Tritt das flüssige Kältemittel durch das Drosselorgan in den Verdampfer ein, muss die Temperatur weiter bis zur Erreichung der Verdampfungstemperatur abgekühlt werden. Hierzu verdampft ein kleiner Teil des Kältemittels, wobei diese „Kühlleistung“ des Verdampfers dem gewünschten Kälteprozess nicht mehr zur Verfügung steht.

Durch eine Wärmeabfuhr aus der Kältemittelflüssigkeit in der Flüssigkeitsleitung, indem das Kältemittel über einen zusätzlichen externen** Wärmetauscher (Luft oder Wasser gegen Kältemittel) geführt wird, kann eine erhebliche Leistungssteigerung der Kälteanlage erreicht werden (Abbildung 2.1).

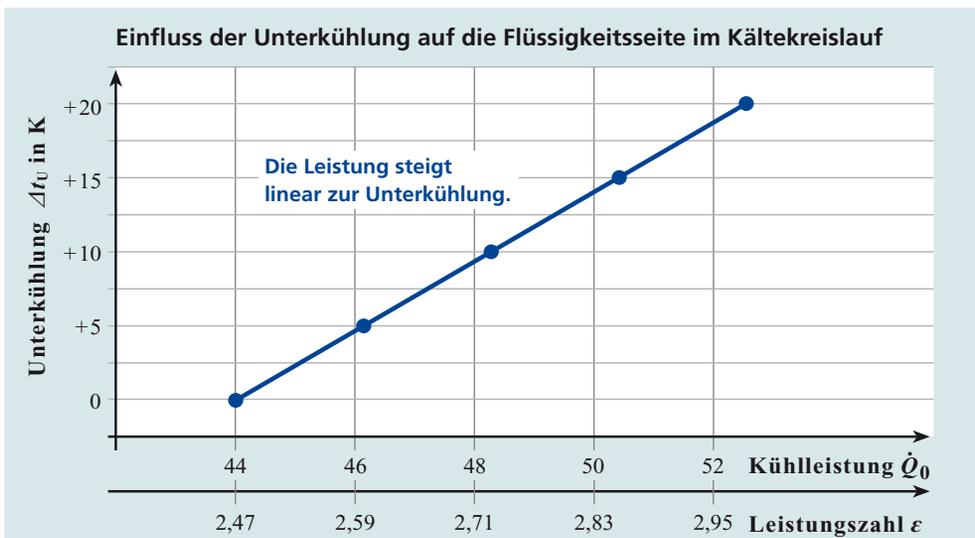


Abbildung 2.1: Leistungssteigerung durch Unterkühlung der Kältemittelflüssigkeit

* ohne Bildung von Gasblasen, die sonst bei sinkendem Druck durch Strömungsverluste entstehen.

** nicht zu verwechseln mit dem internen Wärmetauscher (siehe 8.3.3).

2.3 Der Verdichtungsprozess

Um die Verflüssigung des Kältemittels zu erklären, haben wir den Vorgang der Verdichtung bereits kurz angesprochen.

Die Verdichtung ist notwendig, um das gasförmige Kältemittel auf eine Temperatur zu bringen, die höher ist als die desjenigen Stoffes, an den das Kältemittel im Kondensator Wärme abgeben soll (Umgebungsluft oder Wasser). Es sei hier an den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre erinnert:

Ein Wärmefluss kommt nur zustande, wenn die Temperaturen zweier Stoffe unterschiedlich hoch sind.

Der Verdichter saugt eine bestimmte Menge gasförmigen Kältemittels an, die durch den Vorschub des Kolbens verdichtet wird. Das Gas wird dadurch in einen neuen Zustand gebracht: sein Druck und seine Temperatur steigen (siehe hierzu Abbildung 2.3).

Dieser Vorgang erfordert eine zusätzliche Energiemenge, die jedoch nicht durch Erwärmung, sondern durch einen mechanischen Kraftaufwand, die Schubkraft des Kolbens, eingebracht wird. Diese mechanische Energie wandelt sich im verdichteten Gas in Wärmeenergie und wird zu der bereits im Verdampfer aufgenommenen Wärmemenge Q_0 addiert.

Entsprechend dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre sind Wärme und mechanisches Arbeitsvermögen gleichwertige Energieformen:

Wärme lässt sich in Maschinen in mechanische Arbeit umwandeln und umgekehrt.

Die für den Verdichtungsprozess aufgewendete mechanische Arbeit trägt das Formelzeichen W .

Im Kondensator werden sowohl die im Verdampfer aufgenommene Wärmemenge Q_0 als auch die in Wärme umgewandelte Verdichtungsarbeit W abgegeben.

Die **Kondensationswärme** Q_c ist demnach:

$$Q_c = Q_0 + W \tag{G: 2.5}$$

Abbildung 2.2 (Seite 35) zeigt die Arbeitsweise eines Kompressionszylinders mit Kolben und Arbeitsventilen: Mit der Bewegung des Kolbens verändert sich der Rauminhalt des Zylinders.

In einem Diagramm kann der Kolbenweg als waagerechte Achse für die Änderung des Volumens dienen. Weil der Druck mit geringerem Volumen zunimmt, erhält er die senkrechte Achse, so dass ein Diagramm mit den Koordinaten p (Druck) und V (Volumen) – also ein p,V -Diagramm – entsteht.

Stellt man sich nun vereinfacht vor, der Kolben sei ganz oben (im Diagramm: ganz links), so ist das Volumen des Zylinders am geringsten. Bewegt sich der Kolben abwärts (im Diagramm: nach rechts) so nimmt das Volumen zu, während der Druck konstant bleibt, weil durch das Saugventil Kältemittel nachströmt. Im Diagramm erhalten wir daher parallel zur Volumenachse eine Gerade, deren Länge dem gesamten Hub des Kolbens entspricht (Linie 1 → 2).

Mit der Umkehrung der Kolbenbewegung steigt der Druck, während das Volumen abnimmt. Es findet aber keine zusätzliche Wärmezufuhr oder -abfuhr statt. Auf das Diagramm übertragen ergibt dies eine schräg aufwärts gerichtete Gerade (Linie 2 → 3); sie verbindet den Punkt des maximalen Zylindervolumens mit demjenigen Punkt, an dem das Gas seine maximale Komprimierung erreicht.

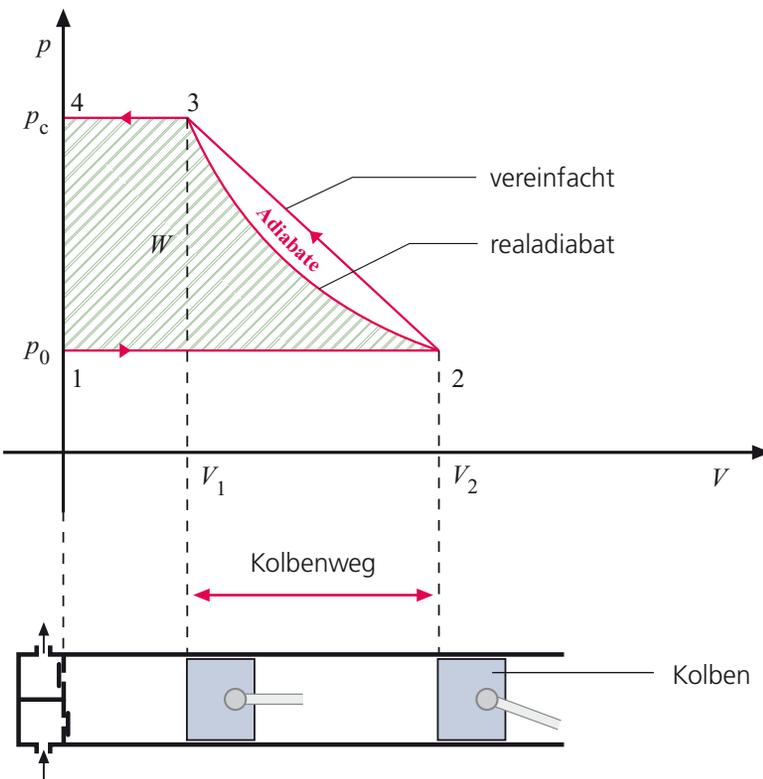


Abbildung 2.2: p, V -Diagramm eines verlustlosen Verdichters

Da der Druck mit Beginn des Gasausstoßes konstant bleibt, hört die Schräge an diesem Punkt auf und setzt sich als Gerade fort, die parallel zur Volumenachse verläuft; im Zylinder herrscht nun der Kondensationsdruck p_c . Das Arbeitsventil öffnet sich, und das Kältemittelgas wird ausgestoßen (Linie 3 → 4).

Ist das Gas ausgestoßen, beginnt der Zyklus von neuem; mit der Abwärtsbewegung des Kolbens öffnet sich das Saugventil, und im Zylinder herrscht wieder der Verdampfungsdruck p_0 .

Der auf das Diagramm übertragene Bewegungszyklus des Kolbens hat eine Fläche eingeschlossen, die näher zu untersuchen ist. Es handelt sich um eine zusammengesetzte Fläche, die, zur Erklärung vereinfacht, aus einem rechtwinkligen Dreieck und einem Rechteck besteht.

Die Fläche eines Rechtecks berechnet man durch Multiplikation seiner Länge und Breite; beim rechtwinkligen Dreieck entspricht die Fläche der Hälfte des Produkts der beiden kürzeren Seiten (Katheten).

Im Diagramm wird die Länge des Rechtecks bzw. eine Seite des Dreiecks durch das Volumen V in m^3 dargestellt, die Breite bzw. Höhe durch den Druck p in N/m^2 . Werden die Einheiten miteinander multipliziert, so gilt:

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m}$$

(G: 2.6)

Das Ergebnis dieser Gleichung – Einheit äußerer Arbeit – zeigt, dass

die Fläche im p,V -Diagramm, die der Bewegungszyklus des Kolbens eingeschlossen hat, ein Maßstab für die bei der Verdichtung zu leistende Arbeit ist.

Auch hier findet eine Zustandsänderung entsprechend den *Gasgesetzen* (siehe Kapitel 1.11) statt. Diese vierte Zustandsänderung, bei der es keinen Wärmeaustausch zwischen dem Gas und seiner Umgebung gibt, wird als *adiabatisch* (gr. „nicht hindurchtretend“) bezeichnet; ihre Kurve wird **Adiabate** genannt (vgl. hierzu Abbildung 2.2).

Diese Arbeitsleistung ist unverzichtbar, um das gasförmige Kältemittel zu verdichten und seinen Wärmeinhalt auf ein höheres Temperaturniveau zu befördern. Nur so kann zwischen dem Kältemittel und demjenigen Stoff, an den die Wärme im Kondensator abgegeben werden soll, ein für den Wärmefluss ausreichendes Temperaturgefälle entstehen.

Beim Austritt aus dem Verdichter ist das gasförmige Kältemittel überhitzt; weil es als *Dampf* in den Verdichter eingetreten ist, macht sich die im Verdichtungsprozess in Wärme umgewandelte Arbeitsleistung als sensible Wärme bemerkbar.

Die Überhitzung bestimmt jedoch nicht den Druck des Gases; auch in der zum Kondensator führenden heißen Leitung herrscht der Kondensationsdruck p_c .

Mit der Überhitzungstemperatur strömt das Kältemittel in den Kondensator, wo zunächst die in Wärme umgewandelte Verdichtungsarbeit W abgeführt wird, so dass die Temperatur auf den Kondensationswert T_c sinkt.

Sodann wird die im Verdampfer aufgenommene Wärmemenge Q_0 abgegeben. Der Druck bleibt auf der ganzen Strecke durch den Kondensator theoretisch konstant (Abbildung 2.3).

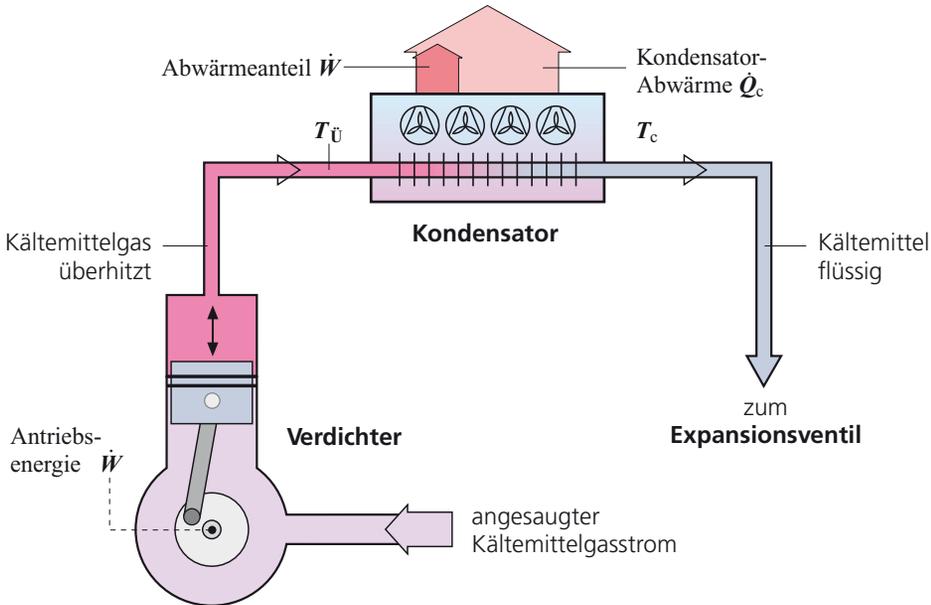


Abbildung 2.3: Kondensationsvorgang, Funktionskizze

2.4 Der Expansionsvorgang

Das wieder verflüssigte Kältemittel verlässt den Kondensator mit hohem Druck, dem Kondensationsdruck p_c . Bevor das Kältemittel erneut in den Verdampfer einströmt, muss sein Druck auf den Verdampfungsdruck p_0 verringert werden, damit es im Verdampfer unverzüglich zu sieden beginnt – und beim Verdampfen abermals Wärme aufnimmt.

Zur Druckverringering dient eine als *Expansionsvorrichtung* bezeichnete Trennstelle, die grundsätzlich die Gestalt einer *Drosseldüse* besitzt. Ihre Bezeichnung ist abgeleitet von der das Kältemittel-Volumen ausdehnenden – „expandierenden“ – Wirkung.

Die Drosseldüse muss so groß bemessen sein, dass der notwendige Kältemittel-Massenstrom \dot{m}_K bei vorgegebener Druckdifferenz $p_c - p_0$ hindurchströmen kann.

Die erforderliche Größe der Düsenöffnung lässt sich berechnen; da aber (aufgrund unterschiedlicher Kühlleistungen) unterschiedliche Massenströme notwendig sind, werden als Expansionsvorrichtung geregelte Ventile konstruiert. Diesen *Expansionsventilen* ist ein eigener Abschnitt vorbehalten (siehe Kapitel 7.3).