

Wärmepumpen und Kältetechnik III

Bauteile
Stand 2007

Kunz - Beratungen

Peter Kunz

Fuchshalde 15

8305 Dietlikon

Tel. 01 833 08 07

Fax. 01 833 79 65

Email info@kunz-beratungen.ch

Page www.kunz-beratungen.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Bauteile der Kompressionsmaschine	3
1.1	Verdichter	3
1.1.1	Begriffe	3
1.1.2	Der Hubkolbenverdichter	4
1.1.3	Der Scroll Verdichter	5
1.1.4	Der Schraubenverdichter	6
1.1.5	Der Rollkolbenverdichter	7
1.1.6	Der Turboverdichter	7
1.2	Wärmeübertrager	8
1.2.1	Verdampfer	8
1.2.2	Kondensator	11
1.2.3	Enthitzer	13
1.2.4	Unterkühler	14
1.3	Sammler	15
1.4	Expansionsventil	15
1.5	Magnetventil	17
1.6	Filter/Trockner	17
1.7	Schauglas	18
1.8	Oelabscheider	18
1.9	Leitungen	18

1 Bauteile der Kompressionsmaschine

1.1 Verdichter

1.1.1 Begriffe

Die Wärme- oder Kälteleistung eines Verdichters ergibt sich aus dem geförderten Massenstrom multipliziert mit der massgebenden Enthalpiedifferenz.

Wärmeleistung:

$$Q_C' = m'_{KM} \cdot \Delta h_C$$

Kälteleistung:

$$Q_0' = m'_{KM} \cdot \Delta h_0$$

Als Kälteleistung einer Kältemaschine oder einer Wärmepumpe bezeichnet man die im Verdampfer umgesetzte Wärme.

Den Kältemittelmassenstrom kann man auch mit folgender Formel bestimmen:

$$m'_{KM} = V_g' \cdot \lambda \cdot \frac{1}{v''}$$

V_g' geometrisches Hubvolumen des Verdichters
 λ Liefergrad
 v'' spezifisches Volumen des angesaugten Kältemittels

Jeder Verdichter hat ein geometrisches Volumen. Beim Hubkolbenverdichter ist dies der Kolbenhub. Durch Widerstände in den Ventilen, durch Rückexpansion der verbliebenen Dämpfe, durch Absorption von Kältemittel durch Öl, durch Reibungsverluste, Wärmeverluste und Undichtigkeiten entstehen so genannte volumetrische Verluste.

Wegen dieser Verluste, entspricht der wirklich geförderte Volumenstrom nicht dem geometrischen Hubvolumen. Das Verhältnis der beiden Grössen bezeichnet man als Liefergrad.

$$\lambda = \frac{V'}{V_g'}$$

V' effektiv geförderter Volumenstrom saugseitig

>> Beim Turboverdichter hat der Liefergrad keine Bedeutung!

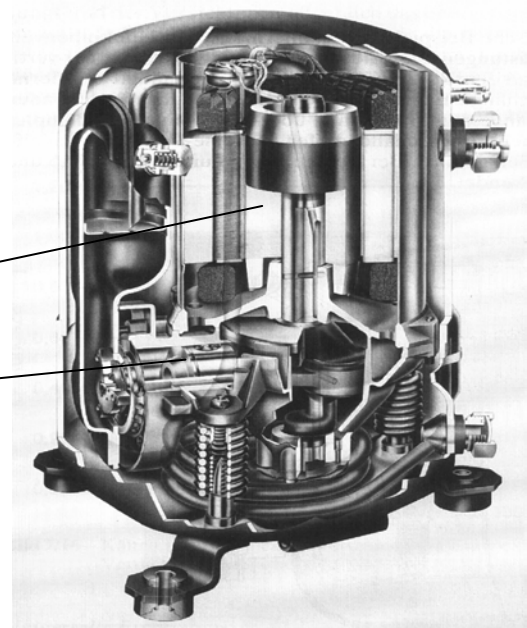
1.1.2 Der Hubkolbenverdichter

Die Verdichtung erfolgt in einem Zylinder durch den bewegten Kolben. Durch Saug- und Druckventile wird der Ansaug, die Verdichtung und der Ausstoss gesteuert.

Hubkolbenverdichter sind die am häufigsten eingesetzten Verdichter, vor allem in kleineren und mittleren Anlagegrößen.

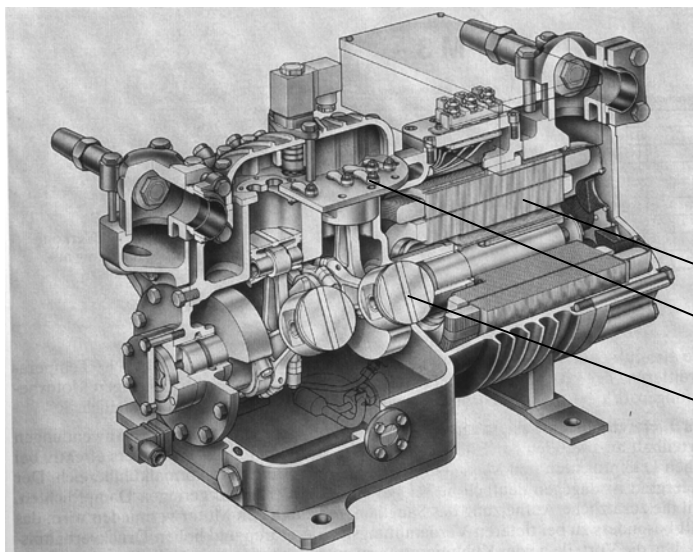
Motor

Kolben



Vollhermetischer Hubkolben-Verdichter Danfoss-Maneurop

- Vollhermetische Verdichter beinhalten in einem dicht verschlossenen (verschweissten) Gehäuse sowohl den Verdichter, als auch den Antriebsmotor. Sie können nicht mehr geöffnet und revidiert werden (im Normalfall).



Halbhermetischer Hubkolbenverdichter

- Halbhermetische Verdichter beinhalten in einem dicht verschraubten Gehäuse sowohl den Verdichter, als auch den Antriebsmotor. Sie können geöffnet und revidiert werden.

Motor

Ventile

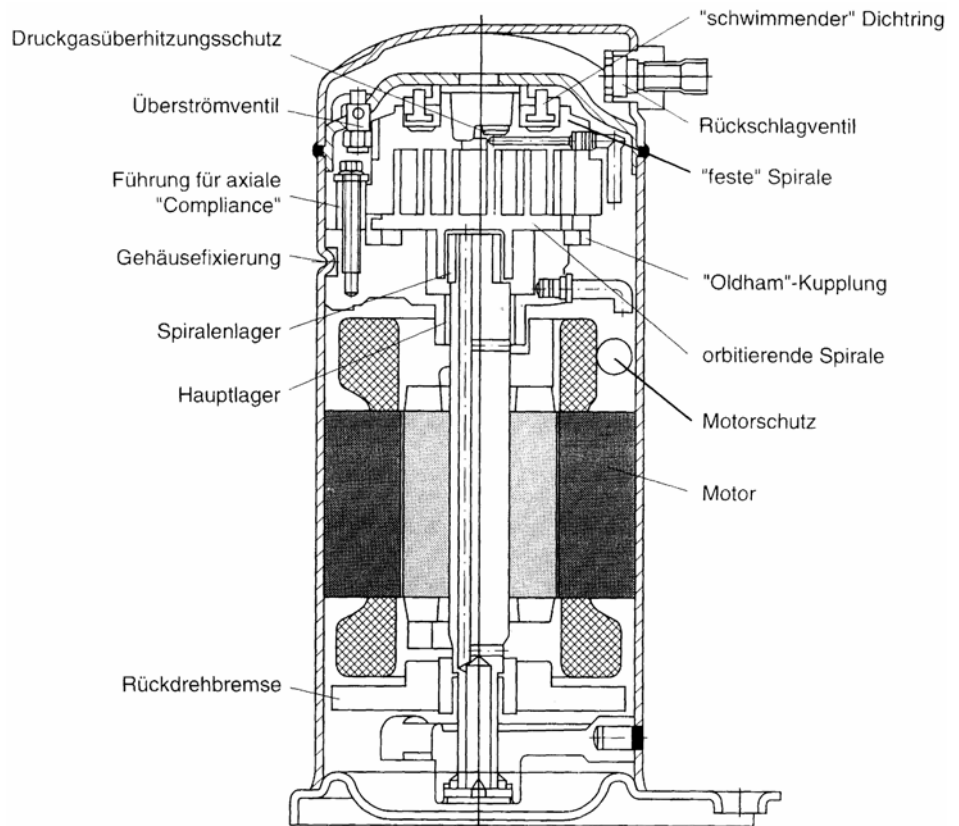
Kolben

- Offene Verdichter beinhalten in einem dicht verschraubten Gehäuse den Verdichter. Der Antriebsmotor wird an dessen Antriebswelle angeschlossen oder mit Zahn- oder Keilriemen verbunden. Im Gegensatz zu den geschlossenen Verdichtern wird der Antriebsmotor nicht mit dem Kältemittel gekühlt.

>> Ammoniakverdichter sind üblicherweise offene Verdichter.

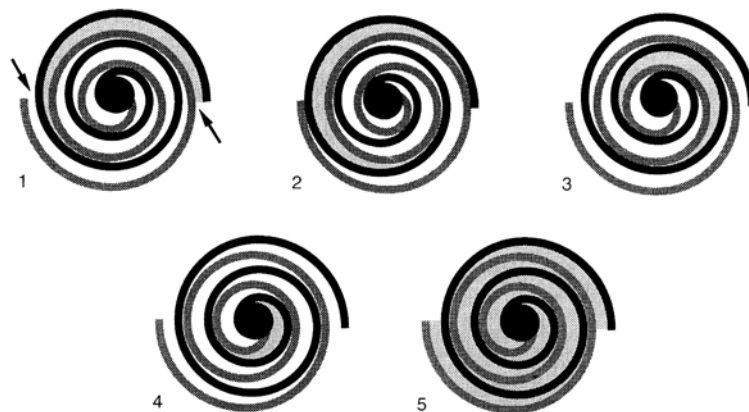
1.1.3 Der Scroll Verdichter

Die Verdichtung des Kältemittels erfolgt in spiralförmig angeordneten Rippen, die auf zwei Scheiben angeordnet sind. Eine der beiden Scheiben steht fest während sich die andere dreht.



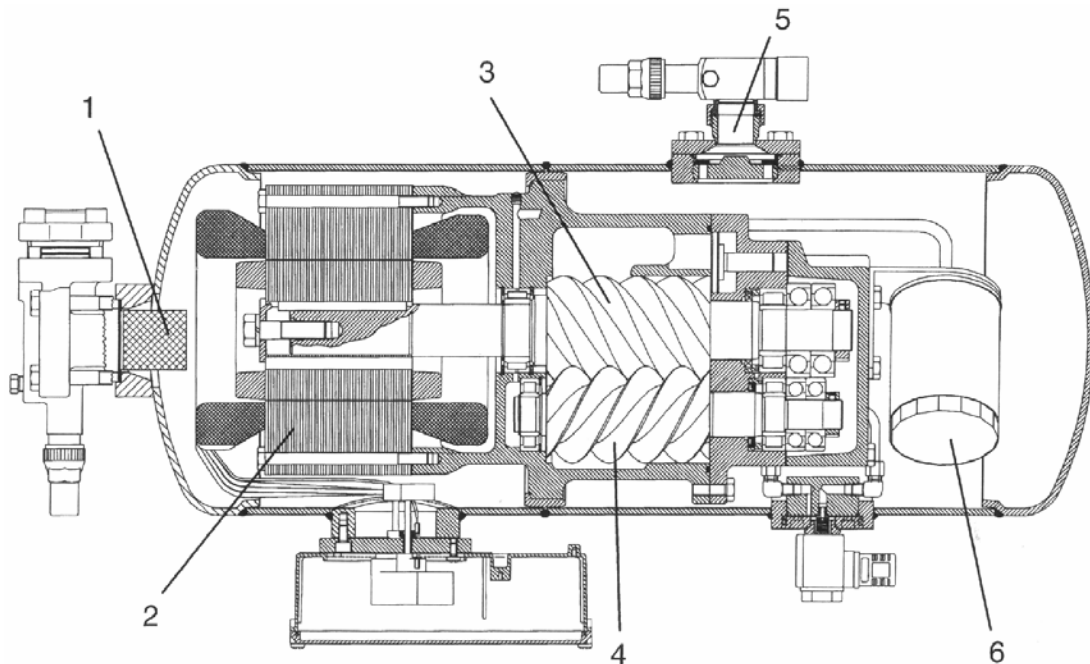
Aufbau eines Scroll -Verdichters

Die Arbeitsweise ist aus untenstehendem Bild ersichtlich.

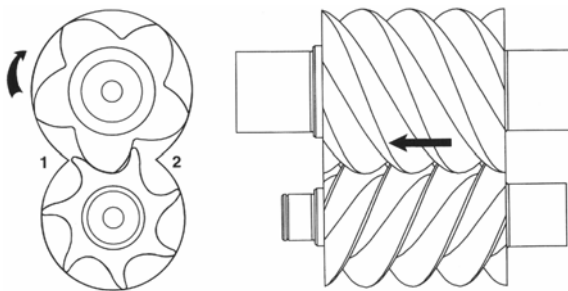


1. In die Öffnung am Aussenrand tritt symmetrisch das Sauggas ein
2. Die Einströmöffnungen schliessen sich.
3. Das Gasvolumen wird verdichtet indem sich der Gasraum verkleinert
4. In der Mitte hat das Gas den Enddruck erreicht und entweicht durch die Auslassöffnung.
5. Im Betrieb sind stets alle Kammern gefüllt. Das Gas wird kontinuierlich angesaugt, verdichtet und ausgestossen.

1.1.4 Der Schraubenverdichter

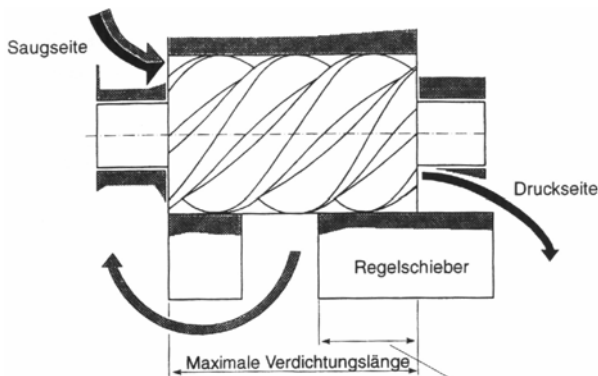


1. Sauggasfilter
2. Antriebsmotor
3. Hauptrotor
4. Nebenrotor
5. Rückschlagventil
6. Filter



Beim Schraubenverdichter wird das Kältemittel in walzenförmigen Rotoren verdichtet.

Schraubenverdichter erreichen hohe Druckverhältnisse und haben keinen schädlichen Raum.

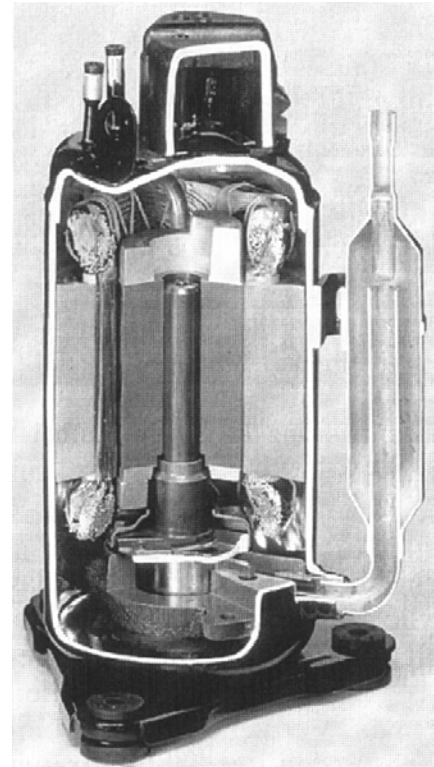


Mit einem Regelschieber kann die Verdichtungs-länge verändert werden und damit auch die Verdichtung.

1.1.5 Der Rollkolbenverdichter

Diese Verdichterbauart besteht aus einem zylindrischen Gehäuse, in dem sich ein exzentrischer Kolben dreht. Ein Trennschieber unterteilt den Verdichterraum in einen Saug- und einen Druckraum.

Rollkolbenverdichter werden vor allem in Japan hergestellt.

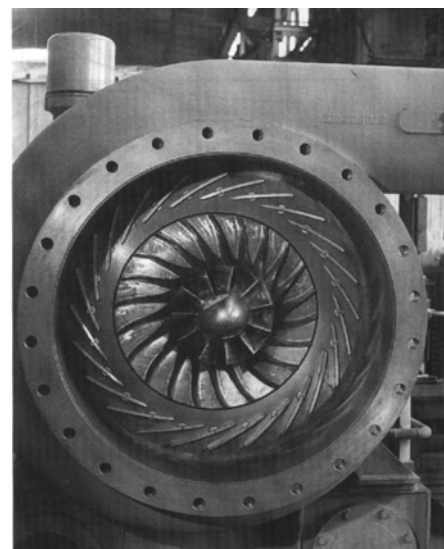


1.1.6 Der Turboverdichter

Turboverdichter können mit den Hochdruck-Radialventilatoren verglichen werden. Eine Turbine dreht mit hoher Geschwindigkeit (z.B. 15'000 Upm). Sie saugt das Kältemittel axial an und verdichtet es radial. Die kinematische Energie wird dabei in Druckenergie umgewandelt.

Turboverdichter erreichen sehr grosse Massenströme und werden vor allem für grosse Leistungen gebaut.

Die Leistungsregelung erfolgt durch Drehzahlregulierung oder durch Drallregler am Eintritt. Die Drallregler werden oft auch zur Anfahrrentlastung eingesetzt.



Lauftrad mit Diffusorschaufeln

Beispiel

Die ETH Zürich betreibt die Wärmepumpenanlage Walche, die in das Fernwärmenetz einspeist, das die ETH-Gebäude und etliche Städtische Verwaltungsgebäude mit Wärme versorgt. Am Fernwärmenetz sind auch die Kehrlichtverbrennungsanlage Hagenholz und das Heizkraftwerk Aubrugg angeschlossen. Zudem kann Wärme von diversen Wärmerückgewinnungsanlagen und der Heizzentrale ETH eingespiessen werden. Die Wärmepumpenanlage wird mit einer Vorlauftemperatur von ca. 70-73 °C betrieben.

1.2 Wärmeübertrager

1.2.1 Verdampfer

Im Verdampfer wird dem Kältemittel Wärme zugeführt. Das Kältemittel verdampft und überhitzt.

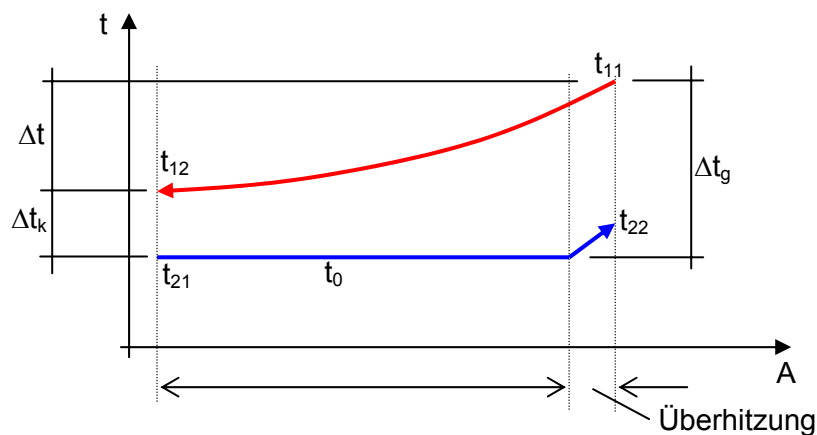
Massenstrom Kältemittel:

$$m'_{\text{KM}} = \frac{Q_0'}{\Delta h_0}$$

Massenstrom sekundär (Luft, Wasser, Sole):

$$m' = \frac{Q_0'}{c_{\text{pm}} \cdot \Delta t}$$

Temperaturverläufe:



Die mittlere Temperaturdifferenz am Verdampfer ist:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_g - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_g}{\Delta t_k}}$$

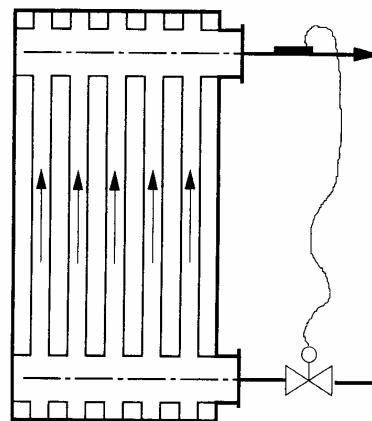
Durch Umformung erhält man für die Verdampfungstemperatur:

$$t_0 = t_{11} - \frac{\Delta t}{1 - e^{\frac{-\Delta t}{\Delta t_m}}}$$

- Verdampfer für Wasser und Sole

Hier werden heute vor allem Plattenverdampfer eingesetzt. Daneben kommen aber auch Koaxialverdampfer und Rohrbündelverdampfer zum Einsatz.

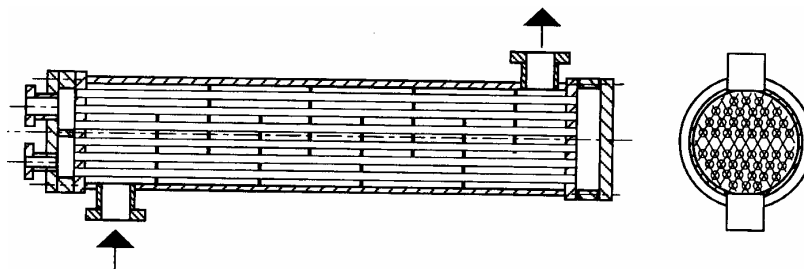
Plattenverdampfer werden vor allem bei kleineren Leistungen eingebaut. Als grosser Vorteil gilt die sehr kleine Kältemittelfüllmenge. Allerdings können Plattenverdampfer ihrer kleinen Füllmenge wegen auch viel schneller Eis (sekundärseitig) ansetzen. Geeignete Frostschutzmassnahmen sind daher unumgänglich.



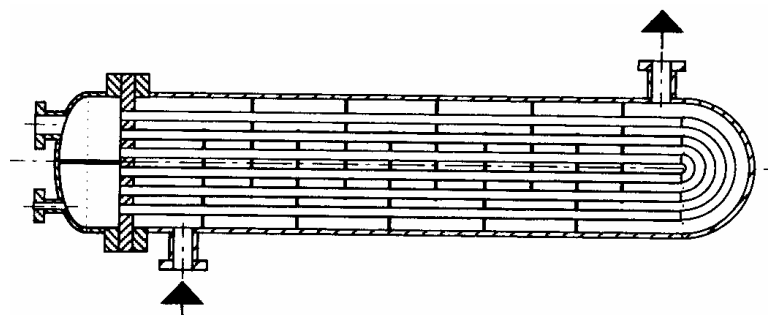
Plattenverdampfer

Beim **Rohrbündelverdampfer** erfolgt die Kältemittelverdampfung in den Rohren des Wärmeübertragers, während das Wasser oder die Sole im Mantelraum quer zu den Rohren strömt. Diese Querströmung wird durch den Einbau von Umlenklechen erreicht.

Da der Wärmeübergang auf der Kältemittelseite wesentlich schlechter ist, als auf der Wasserseite, werden die Rohre teilweise mit Innenlamellen versehen.

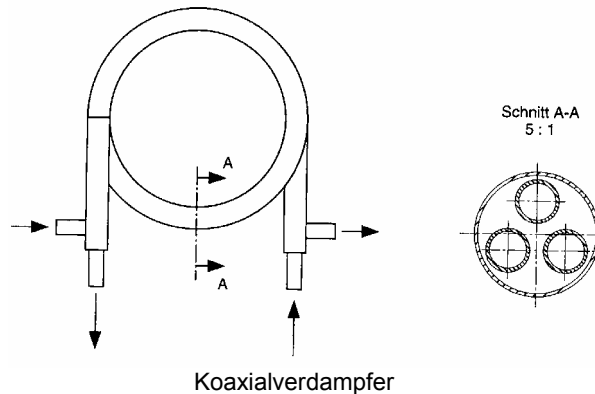


Rohrbündelverdampfer



U-Rohrbündelverdampfer

Koaxialverdampfer bestehen aus einem Doppelrohr. Im inneren Rohr wird das Kältemittel geführt. Im Gegenstrom fliesst das Wasser oder die Sole im äusseren Mantelrohr. Durch ringförmige Anordnung des Doppelrohres wird eine kompakte Bauweise erreicht.



Verdampfer für Luftkühlung werden auch als **Direktverdampfer** bezeichnet. Es sind Rippenrohrkühler und bestehen vor allem aus Kupferrohren mit Lamellen. Der k-Wert hängt vor allem von der Luftgeschwindigkeit ab.

Direktverdampfer werden dort eingesetzt, wo möglichst viel Luftfeuchte ausgeschieden werden muss.

- Überflutete und trockene Verdampfer

Dem **überfluteten Verdampfer** wird ein Überschuss an Kältemittel zugeführt. Dabei wird der Flüssigkeitsstand im Verdampfer mit einem Niveauregler (Schwimmventil) konstant gehalten. Durch diese Betriebsweise kann ein verbesserter k-Wert erreicht werden, da die Rohre mit flüssigem Kältemittel benetzt sind.

Beim **trockenen Verdampfer** wird das Kältemittel mit einem Einspritzventil als Gemisch aus Kältemitteltröpfchen und Kältemitteldampf zugeführt. Die meisten Verdampfer werden als Trockenverdampfer ausgelegt.

- Frostschutzmassnahmen für Verdampfer

Je nach Verdampferbauart kommen folgende Frostschutzmassnahmen zur Anwendung:

- Leistungsregler

Ein Leistungsregler ist ein zusätzliches Einspritzventil, das bei zu tiefen Verdampfungstemperaturen Heissgas in den Verdampfer einspritzt.

Die Einstellung der Leistungsregelung ist heikel, da unbemerkt eine Heissgaseinspritzung erfolgen kann, was eine Energievernichtung bedeutet.

- Temperaturmessung

Dabei wird die Sekundär-Austrittstemperatur gemessen und der Kompressor bei Unterschreitung der eingestellten Temperatur ausgeschaltet.

- Druckdifferenzmessung

Sekundärseitig wird die Druckdifferenz über den Verdampfer gemessen. Dabei kann eine zu tiefe Druckdifferenz (zu kleiner Massenstrom) oder eine zu grosse Druckdifferenz (Eisbildung) festgestellt werden.

1.2.2 Kondensator

Im Verflüssiger wird dem Kältemittel Wärme entzogen. Das Kältemittel wird abgekühlt, verflüssigt und wird unterkühlt.

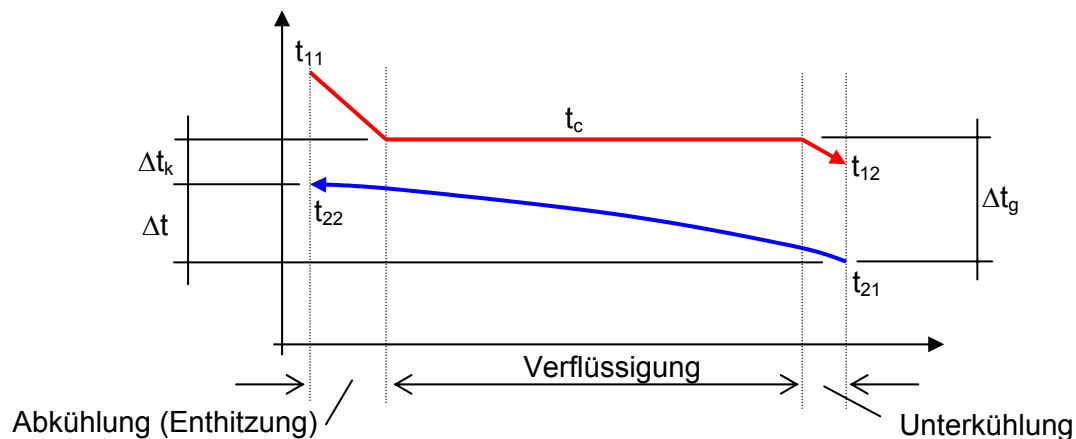
Massenstrom Kältemittel:

$$m'_{\text{KM}} = \frac{Q_c'}{\Delta h_c}$$

Massenstrom sekundär (Luft, Wasser):

$$m' = \frac{Q_c'}{c_{\text{pm}} \cdot \Delta t}$$

Temperaturverläufe:



Die mittlere Temperaturdifferenz am Kondensator ist:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_g - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_g}{\Delta t_k}}$$

Durch Umformung erhält man für die Kondensationstemperatur (Verflüssigungstemperatur):

$$t_c = t_{21} - \frac{\Delta t}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta t_m}}}$$

Luft- und Wasserkühlung:

Sowohl in der Klimatechnik, wie auch bei Wärmepumpen gibt es luft- oder wassergekühlte Verflüssiger.

Bei Wärmepumpen wird in der Regel in einem wassergekühlten Verflüssiger das Heizungswasser erwärmt. Es gibt aber auch Luftheizungen mit Wärmepumpen.

Bei Klimaanlage werden beide Arten eingesetzt. Betrachtet man allerdings die üblichen Auslegungsdaten im Sommer, so erhält man unterschiedliche Verflüssigungstemperaturen.

a) Rückkühlung mit Wasser z.B. mit einem Kühlturm

Wassererwärmung im Verflüssiger von ca. +27°C auf 32°C, Verflüssigungstemperatur ca. +37°C, Verdampfungstemperatur ca. 0°C.

Carnot'sche Leistungszahl:

$$\varepsilon_{KC} = \frac{T_0}{T_c - T_0} = \frac{273}{310 - 273} = 7,4$$

b) Rückkühlung mit Luft

Lufterwärmung im Verflüssiger von ca. +32°C auf 45°C, Verflüssigungstemperatur ca. +50°C, Verdampfungstemperatur ca. 0°C.

Carnot'sche Leistungszahl:

$$\varepsilon_{KC} = \frac{T_0}{T_c - T_0} = \frac{273}{323 - 273} = 5,5$$

Die Luftkühlung erfordert also für die gleiche Kälteleistung einen grösseren Energiebedarf und Energieaufwand für den Verdichter, als eine Rückkühlung mit Wasser. Für die Wahl der Art der Rückkühlung bei Kälteanlagen empfiehlt es sich, einen Wirtschaftlichkeitsvergleich zu erstellen.

Wassergekühlte Verflüssiger:

Plattenverflüssiger erfordern eine geringere Kältemittel-Füllmenge. Deshalb werden sie vor allem bei kleineren Anlagen häufig eingesetzt.

Röhrenkessel-Verflüssiger sind ähnlich aufgebaut, wie die Rohrbündel-Verdampfer. Das Kältemittel fliesst jedoch um die (oft lamellierten) Rohre und das Wasser mit relativ hohen Geschwindigkeiten in den Rohren. Röhrenkessel sind gut zu reinigen.

Koaxial-Verflüssiger sind ähnlich aufgebaut, wie die Koaxial-Verdampfer. Das Kältemittel fliesst jedoch im Mantelrohr und das Wasser in den innen liegenden Rohren.

Bündelrohr-Verflüssiger sind ähnlich aufgebaut, wie die Koaxial-Verflüssiger. Die Rohrbündel werden aber nicht zu einem Ring gewickelt.

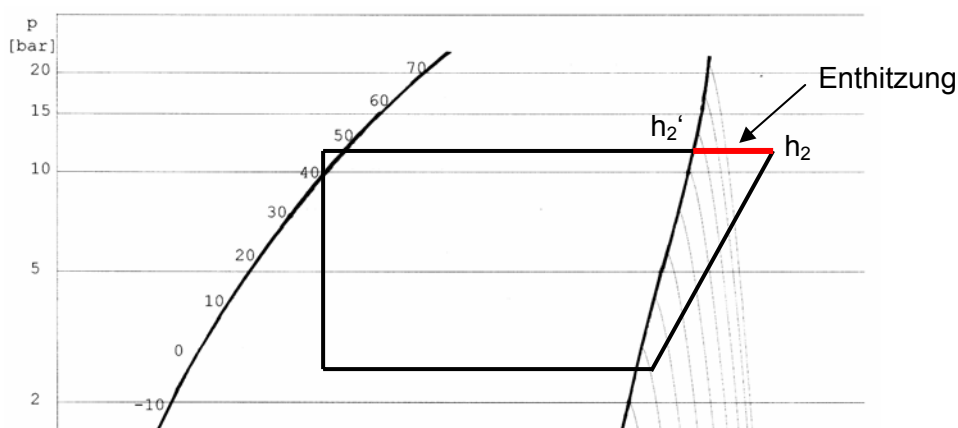
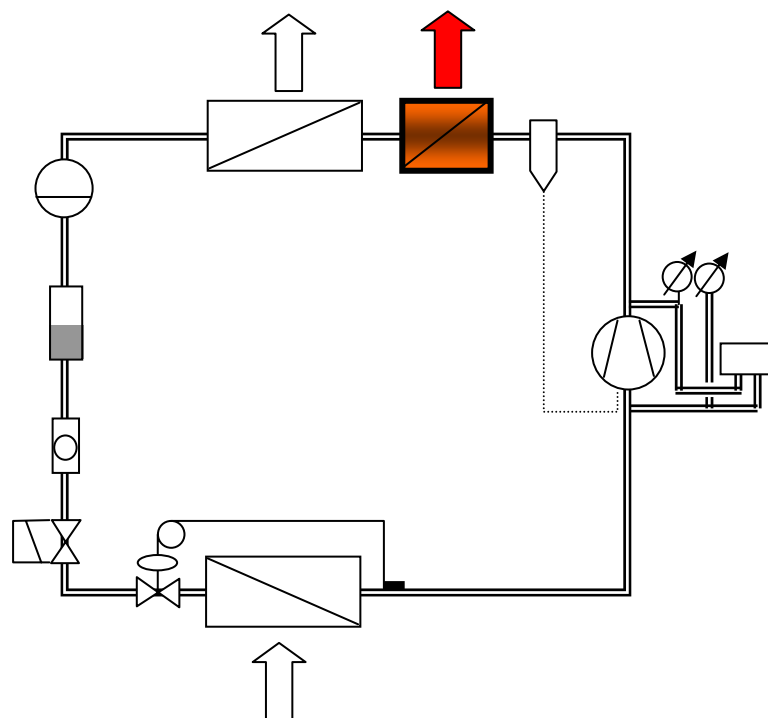
Luftgekühlte Verflüssiger:

Luftgekühlte Verflüssiger sind Rippenrohr-Wärmeübertrager, wie auch die Direktverdampfer. Sie bestehen meist aus lamellierten Kupferrohren. Der Verflüssigungsdruck kann durch zuschalten von Kühlventilatoren (Axial- oder Radialventilatoren) geregelt werden.

Axialventilatoren werden vor allem bei Aussenaufstellungen eingesetzt, währenddem Radialventilatoren dort eingesetzt werden müssen, wo grössere Druckverluste zu überwinden sind, also wenn Schalldämpfer, Filter und Luftkanäle benötigt werden.

1.2.3 Enthitzer

Mit einem Enthitzer wird dem Kältemittel die Heissgaswärme bis zum Beginn der Kondensation entzogen. Dadurch können höhere Sekundärtemperaturen erreicht werden.



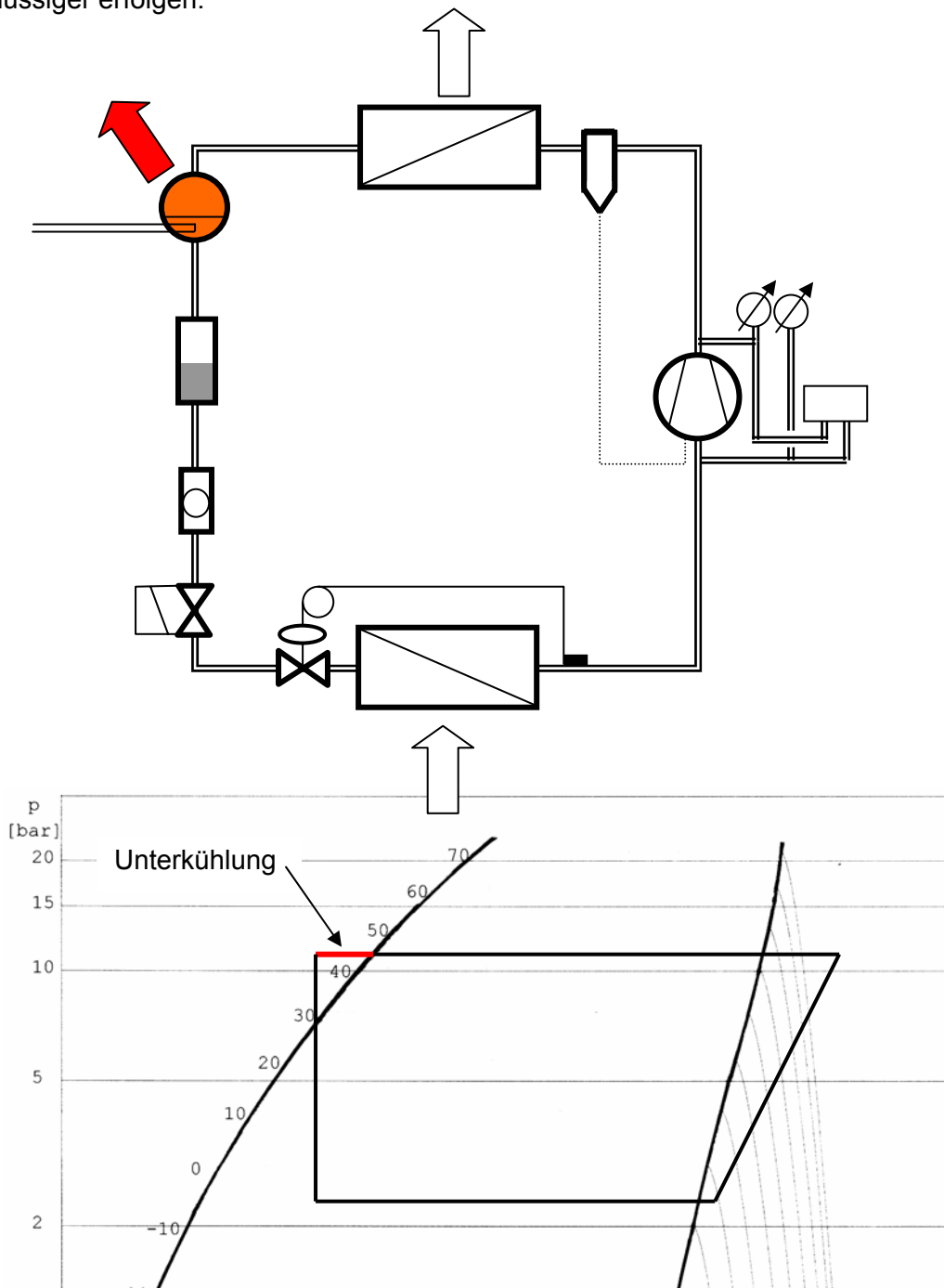
$$Q_E' = m_{KM} \cdot (h_2 - h_2')$$

1.2.4 Unterkühler

Mit einem Unterkühler, der oft mit dem Sammler kombiniert wird, kann bei gleichem Aufwand eine grössere Kälteleistung erreicht werden.

Auch bei Wärmepumpen ist der Einsatz eines Unterkühlers, z.B. zur Wasservorwärmung möglich.

Anstelle eines separaten Unterkühlers, kann aber die gewünschte Unterkühlung auch im Verflüssiger erfolgen.



1.3 Sammler

Bei allen Bauarten, die kleine Wärmeübertrager-Volumen aufweisen ist ein Kältemittel-Sammler notwendig. Bei Kessel-Verflüssiger usw. dient der Mantel zugleich als Sammler.

Der Sammler dient der Pufferung des Kältemittels. Üblicherweise ist der Sammler mit einem Schauglas ausgestattet. Dadurch lässt sich der Flüssigkeitsstand und damit die Kältemittel-Füllmenge überwachen.

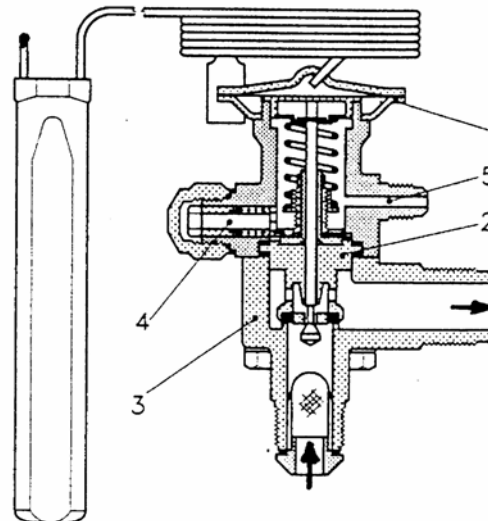
1.4 Expansionsventil

Das Expansionsventil regelt den Kältemittel-Massenstrom und hält so eine konstante Temperatur nach dem Verdampfer ein.

Am häufigsten werden thermostatische Expansionsventile eingesetzt. Bei sehr einfachen Anlagen genügt ein Ventil ohne Druckausgleich.

Thermostatisches Expansionsventil:
 (Danfoss)

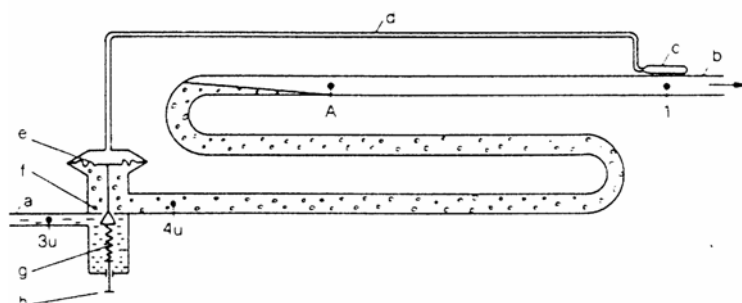
- 1 Membrankapsel
- 2 Düseneinsatz
- 3 Ventilgehäuse
- 4 Einstellspindel (Überhitzung)
- 5 äusserer Druckausgleich



Wenn im Betrieb unterschiedliche Verdampfungsdrücke möglich sind und eine konstante Überhitzung erreicht werden soll, muss auch der Verdampfungsdruck als Regelgrösse mit einbezogen werden.

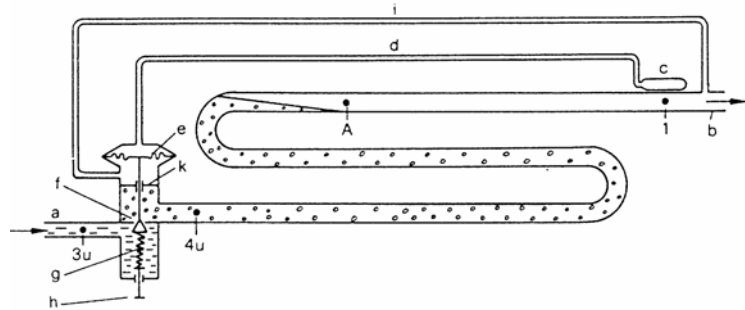
Thermostatisches Expansionsventil mit innerem Druckausgleich:

- a Flüssigkeitsleitung
- b Saugleitung
- c Temperaturfühler
- d Kapillarrohr
- e Membrane
- f Düse und Düsennadel
- g Feder
- h Überhitzungs-Einstellung

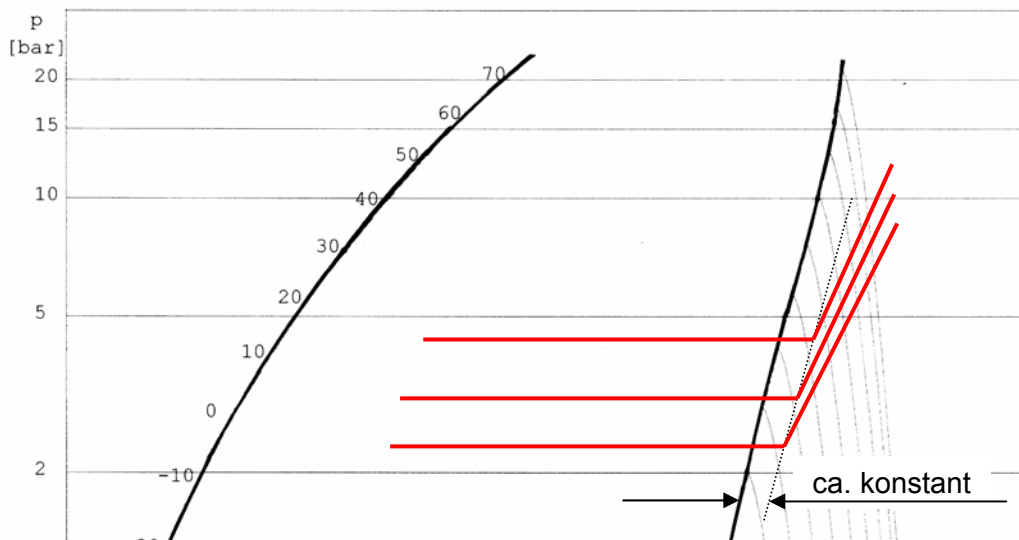


Thermostatisches Expansionsventil mit äusserem Druckausgleich:

- a Flüssigkeitsleitung
- b Saugleitung
- c Temperaturfühler
- d Kapillarrohr
- e Membrane
- f Düse und Düsennadel
- g Feder
- h Überhitzungs-Einstellung
- i Kapillarrohr des äusseren Druckausgleichs
- k Zwischenwand



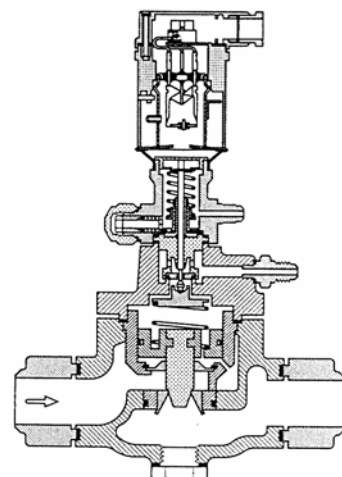
Die Überhitzung wird an der Stellschraube h verstellt, indem man die Federvorspannung verändert. Da der Verdampfungsdruck auf der Gegenseite zur Temperatur-Kapillaren wirkt, kann eine fast konstante Überhitzung erreicht werden.



Elektronisches Expansionsventil:
 (Danfoss)

Elektronische Expansionsventile sind dann zu verwenden, wenn die Verdampferleistung exakt geregelt werden muss. Dies ist vor allem bei Direktverdampfern notwendig.

Bei allen Systemen, wo keine exakte Verdampferregelung nötig ist, wie zum Beispiel, wenn ein Kaltwasserspeicher oder ein Eisspeicher vorhanden ist, erübrigt sich der Einsatz eines elektronischen Einspritzventils.



Für die Auslegung des Expansionsventils müssen Druckdifferenz und Verdampferleistung bekannt sein.

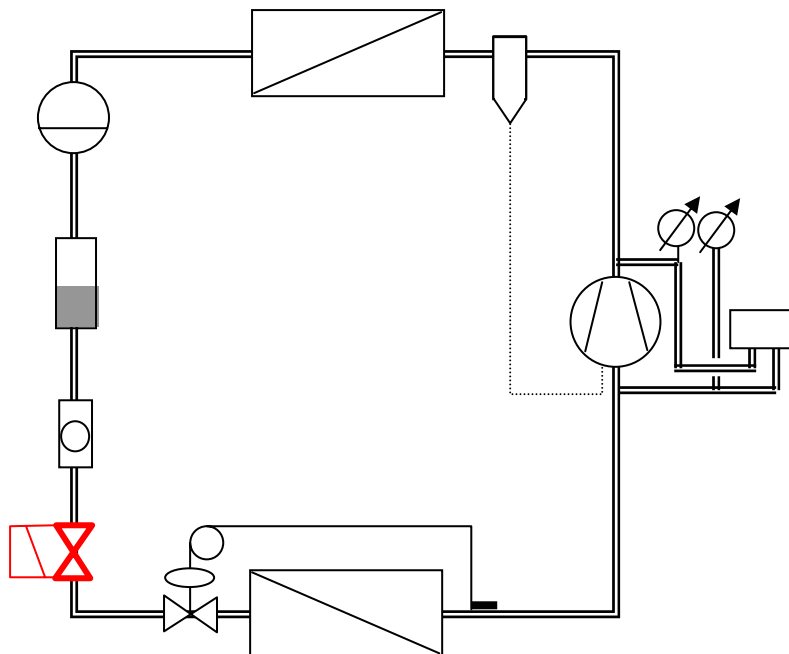
Die Druckdifferenz für das Expansionsventil ergibt sich aus:

$$\Delta p = p_c - p_0 - \Delta p_v \quad \text{bar}$$

- p_c = Verflüssigungsdruck
- p_0 = Verdampfungsdruck
- Δp_v = Druckverluste (ca. 0,5 bar)

1.5 Magnetventil

Das Magnetventil vor dem Einspritzventil wird beim Einschalten des Kompressors geöffnet.



Nach dem Ausschalten des Kompressors verhindert das geschlossene Magnetventil ein Nachströmen des Kältemittels.

Bei der Auslegung des Magnetventils muss darauf geachtet werden, dass das Ventil auch bei minimaler Druckdifferenz schliesst.

1.6 Filter/Trockner

Filter und Filtertrockner müssen eingebaut werden, damit auch kleinste Verunreinigungen nicht in den Verdichter gelangen können.

Wenn eine Anlage gefüllt wird, muss sie vorgängig gründlich gereinigt und vakuiert werden. Sowohl feste Partikel und Schmutz, wie auch die Feuchtigkeit müssen aus dem Kälte-

kreis entfernt werden. Da aber immer noch kleine Restmengen zurückbleiben, wird ein Filter gegen Partikel und Schmutz und ein Trockner zur Aufnahme von Wasser eingebaut. Diese Bauteile müssen ausgewechselt werden, wenn der Feuchtigkeitsgehalt des Kältemittels ansteigt (siehe Schauglas).

1.7 Schauglas

Mit dem Schauglas kann kontrolliert werden, ob das Kältemittel, das zum Einspritzventil strömt, flüssig ist. Gasblasen sind sehr gut erkennbar. Dies ist dann ein Zeichen dafür, dass zuwenig Kältemittel eingefüllt ist und das Kältemittel nicht vollständig kondensiert ist.

Zudem sind die meisten Schaugläser mit einem Indikatorfeld versehen, das eine Farbänderung zeigt, wenn der Feuchtigkeitsgehalt (Wasser im Kältemittel) zu hoch ist.

1.8 Oelabscheider

Die Verdichter müssen geschmiert werden. Das dazu verwendete Oel strömt zum Teil mit dem Kältemittel in die Druckleitung und so in den Kreislauf. Wenn nicht gewährleistet ist, dass das Oel zum Verdichter zurückströmt, muss das Oel nach dem Verdichter ausgeschieden und zurückgeführt werden.

1.9 Leitungen

Die Leitungen werden üblicherweise in Kupfer oder Stahl (Ammoniak) ausgeführt. Kupferleitungen werden vor allem gelötet.

Folgende Strömungsgeschwindigkeiten sind empfehlenswert:

- Saugleitungen (Gas) 7 ... 15 m/s
- Druckleitung (Gas) 5 ... 8 m/s
- Flüssigkeitsleitungen 0,1 .. 1 m/s

Der richtigen Leitungsführung und Leitungsdimensionierung muss besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dabei ist dafür zu sorgen, dass das Öl zum Verdichter zurück fliesst.

Mechanische Blockaden oder Öldruckstörungen sind die Folge. Das Öl kann aber eine Kälteleitung auch förmlich verschliessen: durch steigenden Ölpegel nimmt der freie Strömungsquerschnitt ab. Leider kommt nun aber das Öl durch die steigende Strömungsgeschwindigkeit nicht langsam, sondern auf einen Schlag zurück. Eine starke Gasströmung über einer Flüssigkeit bringt diese nämlich zum Wellenschlagen (Vergleich: See bei Sturm => Wellen). Berührt nun eine solche Welle die obere Rohrwandung, so ist der gesamte Strömungsquerschnitt verschlossen - es baut sich über die Welle schlagartig eine Druckdifferenz auf, die diese vor sich her schiebt und immer grösser werden lässt. Das Öl kommt jetzt also zur Maschine zurück, aber schlagartig. Dies kann zu Ölschlägen, Öldruckstörungen und mechanischen Blockaden führen - insbesondere wenn in der Zwischenzeit der "Ölmangel" behoben wurde. Die Strömungsgeschwindigkeit im Kältekreislauf muss also ein Kompromiss zwischen möglichst kleinen Verlusten und garantiertem Öltransport sein.

Bei Verbundanlagen und den damit verbundenen variablen Massenströmen und Geschwindigkeiten kann es notwendig werden, in gefährdeten Bereichen so genannte Doppelsteigleitungen auszulegen.