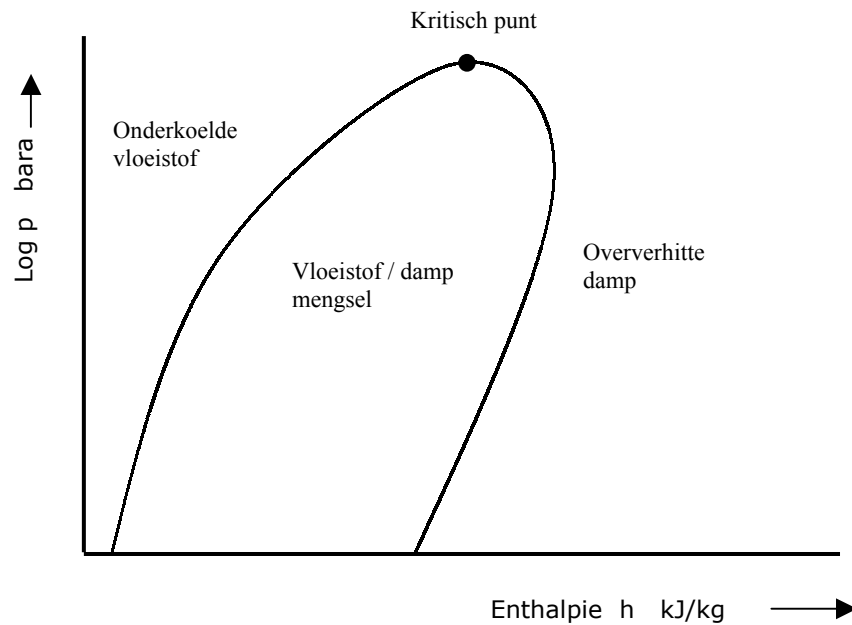


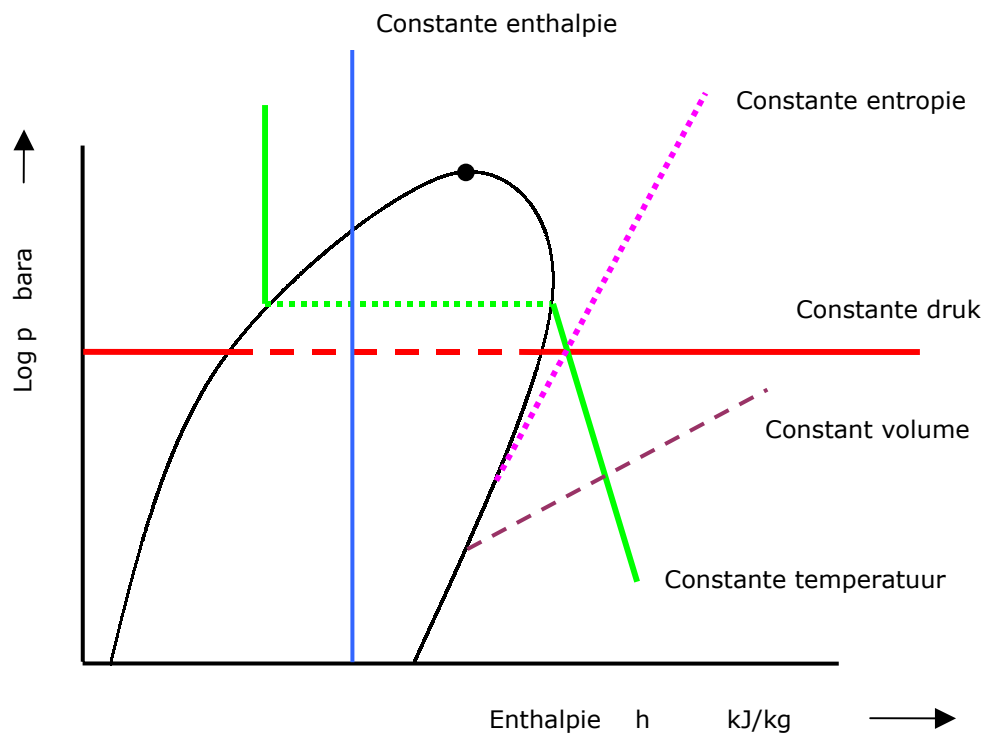
1.2.2 Druk/enthalpie



Afbeelding 4. Druk-enthalpie diagram.

Mollier-diagram

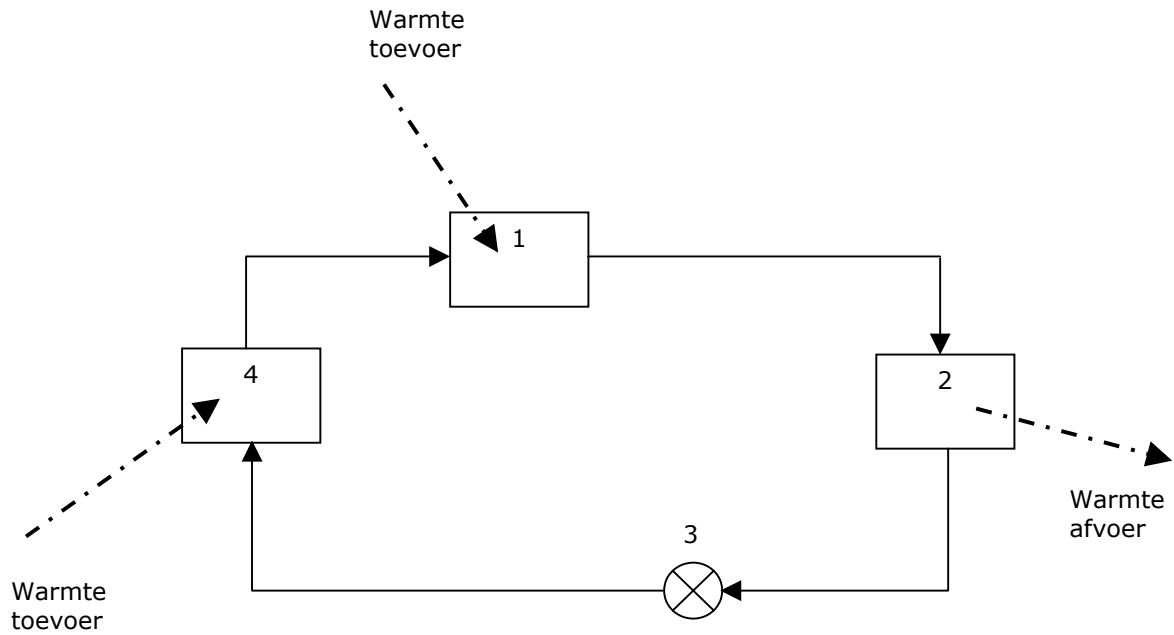
Voor elk SUVA[®] koudemiddel is een diagram te tekenen zoals hierboven weergegeven. Dit wordt ook wel een *druk-enthalpie*, *log p-h* of *Mollier-diagram* genoemd. Hierin worden de belangrijkste toestanden van een koudemiddel verklaard. Binnen de lijnen is een kokend mengsel, bestaande uit een gedeelte damp en een gedeelte vloeistof. Als we iets dieper ingaan op dit diagram, kunnen nog een aantal hulplijnen worden toegevoegd, waarmee de hoofdlijnen van een koelinstallatie berekend kunnen worden, zie afbeelding 5.



Afbeelding 5. Druk-enthalpie diagram met hulplijnen.

De verschillende lijnen geven een gelijkblijvende of constante toestand aan. In een druk-enthalpie of Mollier-diagram kan een koelcyclus in zijn geheel worden weergegeven. Een dergelijk diagram kan voor elk koudemiddel worden gemaakt, waarin getallen en de vorm van de figuur kunnen verschillen, maar de basis blijft altijd gelijk.

Op afbeelding 6 is een prinseschema van een koelinstallatie weergegeven.



Afbeelding 6. Koelinstallatie.

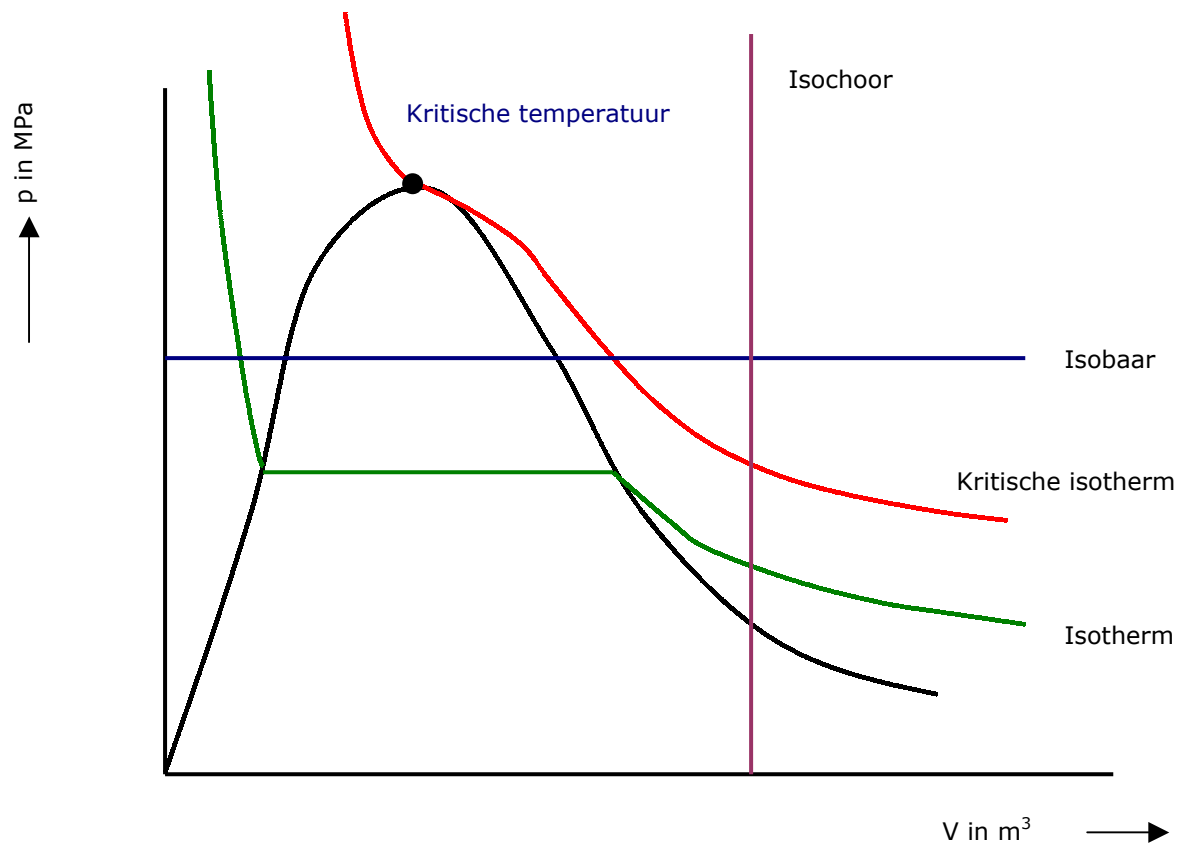
1. Compressor
2. Condensor
3. Expansieventiel
4. Verdamer

Op afbeelding 7 is een p-V diagram weergegeven met daarin enkele belangrijke lijnen.

- De isobaar is een lijn van constante druk
- De isochoor is een lijn van constant volume
- De isotherm is een lijn van constante temperatuur.

Links

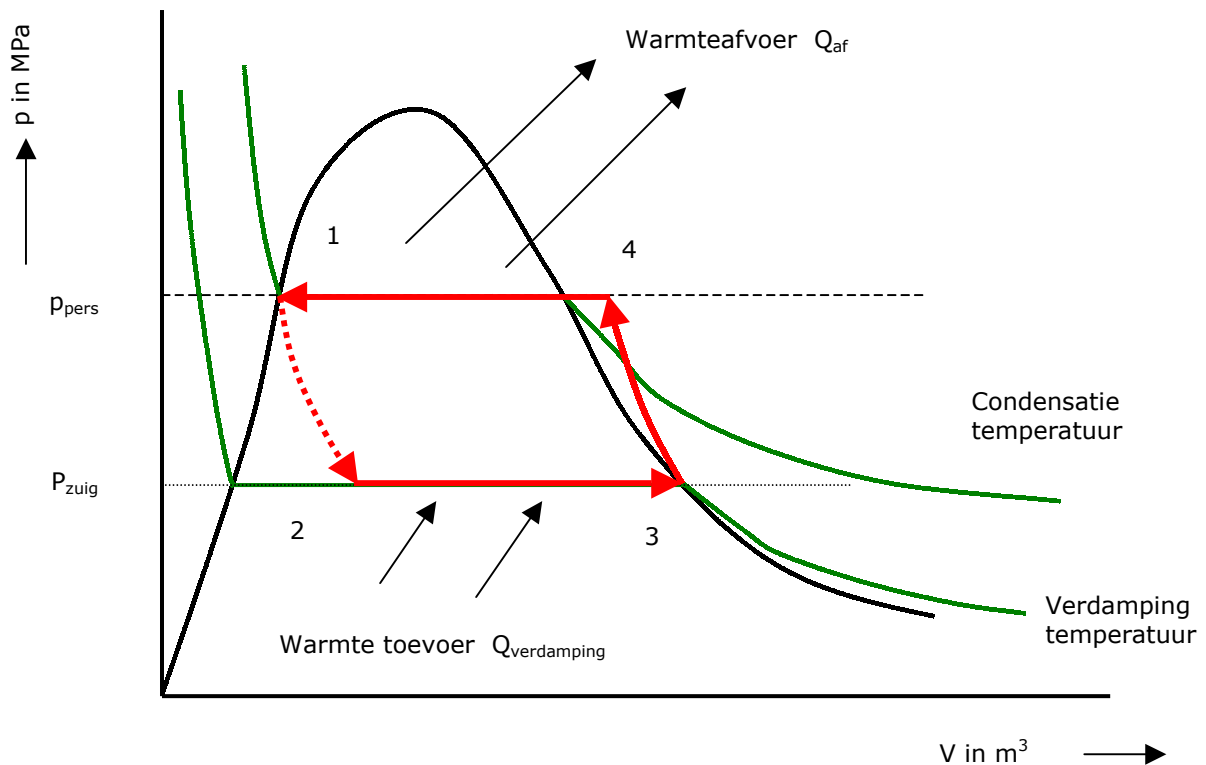
Vervolgens is op afbeelding 8 het werkelijk koelproces weergegeven, merk op dat dit een links draaiend proces is, het kost arbeid.



Afbeelding 7. Het p-V diagram.

Kritische temperatuur:

Kritische temperatuur van een gas is die temperatuur waarboven door compressie en afkoeling het gas niet meer tot vloeistof te verdichten is.



Afbeelding 8. Het koelproces in het p-V diagram.

De stippellijn is onomkeerbare expansie (stippelen!!).

1 → 2 smoorproces: proces bij constante enthalpie

$$h = U + p \cdot V$$

$$h_1 = h_2$$

$$h_1 = h \text{ verzadigde vloeistof}_1$$

$$h_2 = h \text{ verzadigde vloeistof}_2 + x \cdot r \text{ of } (1-x) \cdot h_{vv} + x \cdot h_{vd}$$

$$h_{vv1} = h_{vv2} + x \cdot r$$

$$x = \frac{h_{vv1} - h_{vv2}}{r}$$

Zuigdrukken hoog en persdrukken laag zien te houden. ⇒ x = ook klein.

$$\eta = \frac{\text{doel}}{\text{offer}} = \frac{Q_v}{Q_{comp}}$$

$$Q_v + Q_c = Q_{koelwater}$$

$$Q_c = Q_{kw} - Q_v$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_v}{Q_{kw} - Q_v} = \frac{1}{\frac{Q_{kw}}{Q_v} - 1} = \frac{1}{\frac{Q_{kw}}{Q_v} - 1}$$

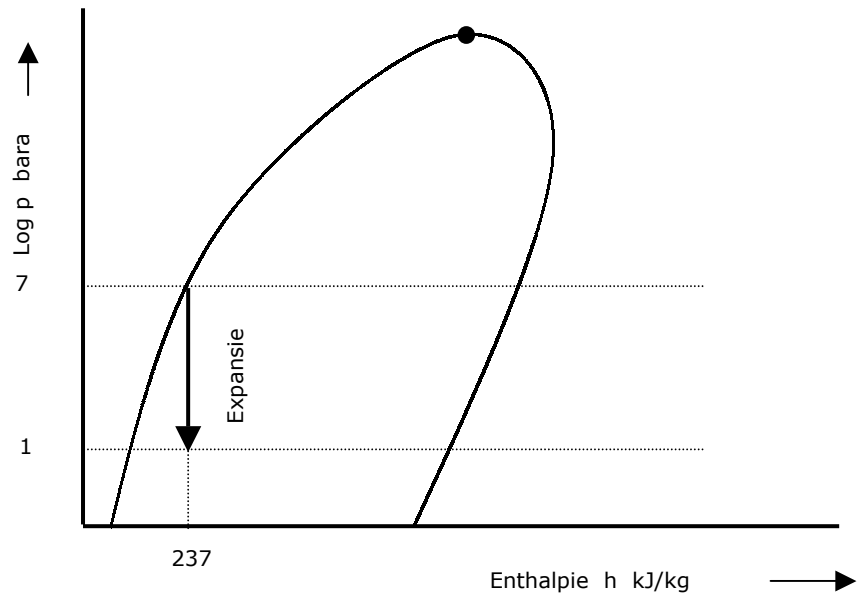
Neem aan dat $\frac{Q_{kw}}{Q_v}$ bijvoorbeeld 1,5 is:

$$\text{dan is } \eta = \frac{1}{1,5 - 1} \cdot 100\% = 200\%$$

Leveringsfactor = 2

Om een voorbeeld te geven van het verloop van een volledige koelcyclus, nemen we het druk-enthalpie diagram van SUVA[®] 134a.

1.2.3 Expansie

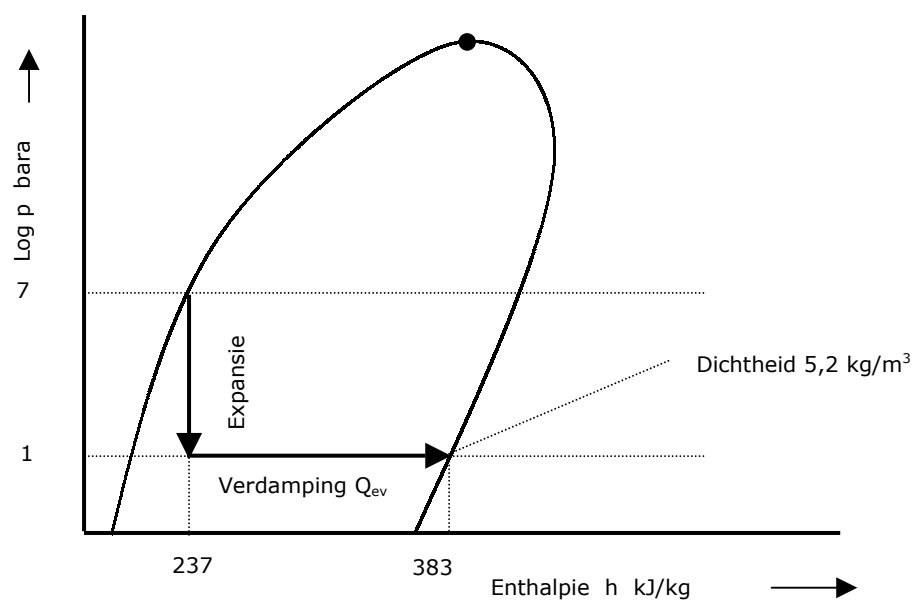


Afbeelding 9. Expansie.

De druk daalt van 7 bar naar 1 bar. De enthalpie (of inwendige energie opgeslagen in het koudemiddel SUVA[®] 134a) is 237 kJ/kg.

Tijdens de expansie verdampt een gedeelte van het koudemiddel. De expansie of drukverlaging kan plaatsvinden door het koudemiddel door een capillaire leiding te leiden, of met behulp van een automatisch of thermostatisch expansieventiel, of eventueel met een handbediende afsluiter.

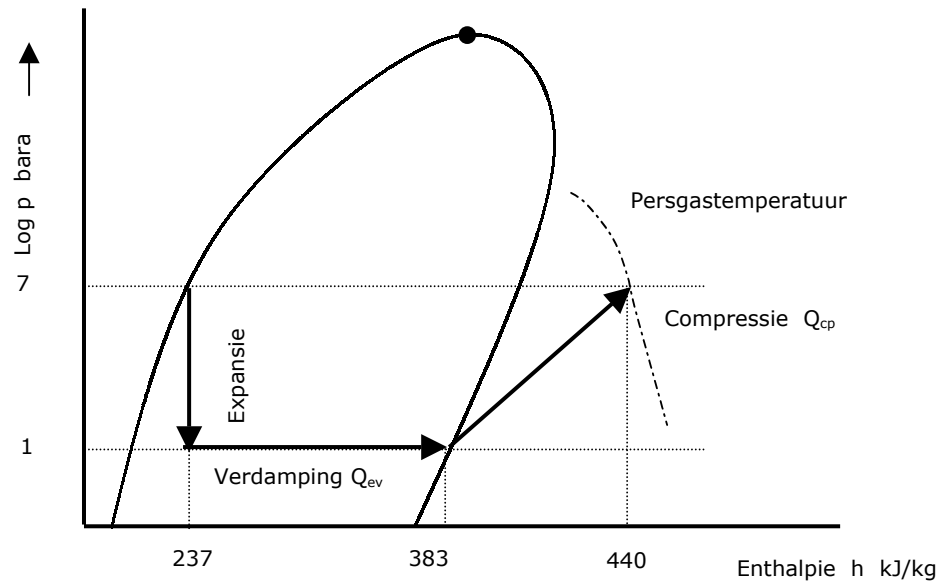
1.2.4 Verdamping



Afbeelding 10. Verdamping.

Om te kunnen verdampen, verhoogt het koudemiddel zijn enthalpie van 237 naar 383 kJ/kg. Met andere woorden, één kilogram SUVA® 134a neemt 146 kJ op om volledig in damp te veranderen, bij een dampdichtheid van 5,2 kg/m³

1.2.5 Compressie

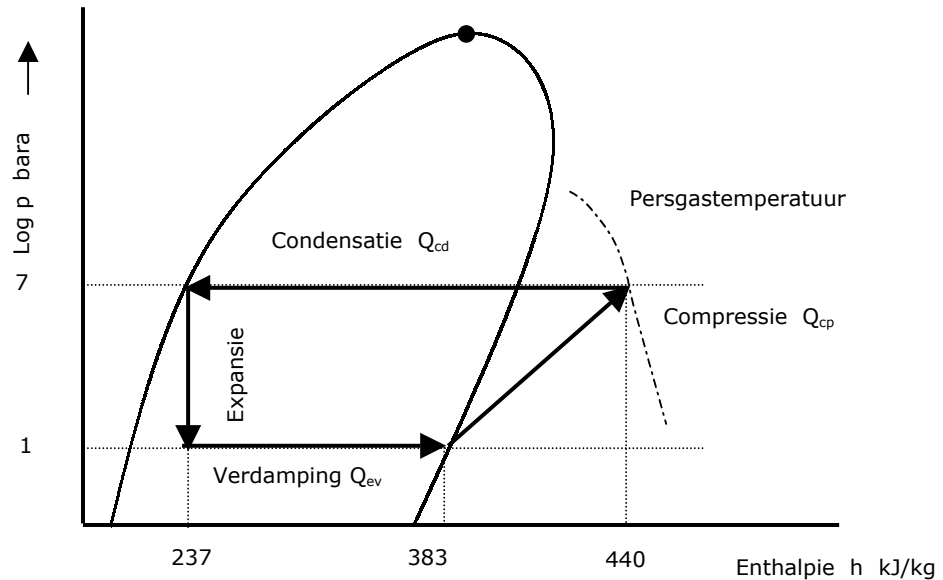


Afbeelding 11. Compressie.

Energie

Tijdens de compressie neemt het koudemiddel weer energie op, waardoor de enthalpie toeneemt tot 440 kJ/kg. Dit betekent dat de theoretische hoeveelheid energie benodigd voor de compressie 57 kJ/kg is. In de praktijk is dit meer door allerlei energieverliezen tijdens de compressie. Tevens stijgt tijdens compressie de temperatuur sterk. De eindtemperatuur is afhankelijk van het soort koudemiddel. Bij ammoniak bijvoorbeeld kan deze oplopen tot 200 °C.

1.2.6 Condensatie



Afbeelding 12. Condensatie.

Na de compressie komt het koudemiddel in de condensor. In het eerste gedeelte wordt de hete damp afgekoeld tot aan het dampverzadigingspunt, daarna begint de echte condensatie en wordt weer vloeistof gevormd, totdat het koudemiddel weer in de uitgangspositie is en de cyclus weer opnieuw begint.

Dit betekent, dat de hoeveelheid energie die in de condensor wordt afgevoerd (Q_{cd}), gelijk is aan de verdampingsenergie (Q_{ev}) plus de compressie-energie (Q_{cp}).

$$Q_{cd} = Q_{ev} + Q_{cp}$$

1.3 C.O.P. (Coëfficiënt of Performance)

Dit is een bijzonder belangrijk getal, waarin de werkingsgraad van een koelinstallatie (of een warmtepomp) kan worden uitgedrukt. Bij een koelinstallatie is de definitie van de C.O.P. als volgt (met SUVA[®] 134a als voorbeeld):

$$\text{C.O.P.} = \frac{\text{verkregen koude}}{\text{benodigde energie}} = \frac{Q_{ev}}{Q_{cp}} = \frac{383 - 237 \text{ kJ/kg}}{440 - 383 \text{ kJ/kg}} = 2,6$$

Bij een waterpomp is de definitie:

$$\text{C.O.P.} = \frac{\text{verkregen warmte}}{\text{benodigde energie}} = \frac{Q_{cd}}{Q_{cp}} = \frac{440 - 237 \text{ kJ/kg}}{440 - 383 \text{ kJ/kg}} = 3,6$$

1.4 Definitie van de types fluorkoolwaterstoffen

- CFK** ChloorFluorKoolwaterstof. Verzadigde alifatische moleculen die koolstof (C), chloor (Cl) en fluor (F) bevatten en geen andere atomen. De bekendste CFK's zijn CFK-11 (CCl_3F) en CFK-12 (CCl_2F_2). Een andere is bijvoorbeeld CFK-115 ($\text{CF}_3\text{.CClF}_2$). Deze worden gebruikt als koudemiddel en in het verleden ook in toepassingen als drijfmiddel, oplosmiddel en schuimblaasmiddel. Van CFK's is nu bekend dat zij de ozonlaag aantasten.
- HCFK** HydroChloorFluorKoolwaterstoffen. Chemisch vergelijkbaar met de CFK's met het belangrijke verschil, dat HCFK's één of meer waterstofatomen (H) bevatten. De aanwezigheid van waterstof maakt het molecuul minder stabiel in de atmosfeer en beschadigt daarmee ook de ozonlaag minder. Zij zijn echter niet volledig onschadelijk. De bekendste HCFK is HCFK-22 (CHClF_2). Andere zijn bijvoorbeeld HCFK-123 ($\text{CF}_3\text{.CHCl}_2$), HCFK-124 ($\text{CF}_3\text{.CHClF}$), HCFK-141b ($\text{CCl}_2\text{F.CH}_3$) en HCFK-142b ($\text{CClF}_2\text{.CH}_3$).
- HFK** HydroFluorKoolwaterstof. Verzadigd alifatisch molecuul, dat koolstof, fluor en waterstof bevat. Het bevat geen specifiek chloor en heeft dus geen effect op de ozonlaag. De bekendste HFK's zijn brandbaar: HFK-32 (CH_2F_2), HFK-152a ($\text{CH}_3\text{.CHF}_2$) en HFK-143a ($\text{CH}_3\text{.CF}_3$). Gemengd met andere niet-brandbare koudemiddelen kunnen deze een niet-brandbaar mengsel vormen.
- PFK** PerFluorKoolwaterstof. Het molecuul bevat alleen koolstof en fluor. Deze worden soms ook "FK" genoemd. Voorbeelden zijn PFK-14 (CF_4) en PFK-116 ($\text{CF}_3\text{.CF}_3$). PFK zijn meestal broeikasgassen met een zeer lange levensduur.
- BCFK** BroomChloorFluorKoolwaterstoffen. Vergelijkbaar met CFK's, maar met één of meer broomatomen in het molecuul. Deze worden soms halonen genoemd, vanwege hun belangrijkste gebruik als brandblusser. R-13B1 (CBrF_3) wordt gebruikt als koudemiddel. Het is nu bekend dat het broomatoom schadelijker is voor de ozonlaag dan het chlooratoom.

Du Pont

Koudemiddelen worden nog steeds aangeduid volgens het systeem dat in de jaren 30 door Du Pont is ontwikkeld en nu wereldwijd wordt geaccepteerd. De definities worden uitgegeven door de ASHRAE (American Society for Heating, Refrigeration and Airconditioning Engineers) het IIR (International Institute of Refrigeration) en nationale normalisatie-instituten zoals DIN en BSI. Het voorvoegsel "R" (voor "Refrigerant") wordt meestal gebruikt ter vervanging van de afkortingen zoals eerder gebruikt. Bijvoorbeeld R-134a is hetzelfde als HFK-134a. Getallen in de 500-serie, zoals R-502 worden gebruikt voor azeotrope producten. De R-400 koudemiddelen zijn niet-azeotropen (soms aangeduid als zeetroop), mengsels en bijna-azeotropen. De benummering wordt toegekend door de ASHRAE en beschrijven niet de chemische samenstelling van de koudemiddelen. Verschillende niet-fluorkoolwaterstoffen worden gebruikt als koudemiddel. De Engelse benaming hiervoor is "Not-In-Kind" (NIK) en krijgen ook een "R" aanduiding. Deze koudemiddelen hebben meestal grote gevolgen voor de veiligheid.

Koolwaterstoffen bevatten alleen koolstof en waterstof en zijn daarmee zeer brandbaar en explosief. Voorbeelden zijn R-290 (propaan, C_3H_8) en R-600 (butaan C_4H_{10}).

Tenslotte zijn de R-700 koudemiddelen anorganische stoffen, zoals R-717 (ammoniak NH_3). Ammoniak is brandbaar en zeer giftig.

1.5 Enkelvoudige koudemiddelen en azeotropen

Zowel enkelvoudige koudemiddelen als azeotropen gedragen zich op dezelfde manier. De verzadigde dampfase heeft dezelfde samenstelling als de vloeistoffase.

Constante

Zij verdampen en condenseren op één constante temperatuur en hebben een enkelvoudige druk-enthalpie grafiek.

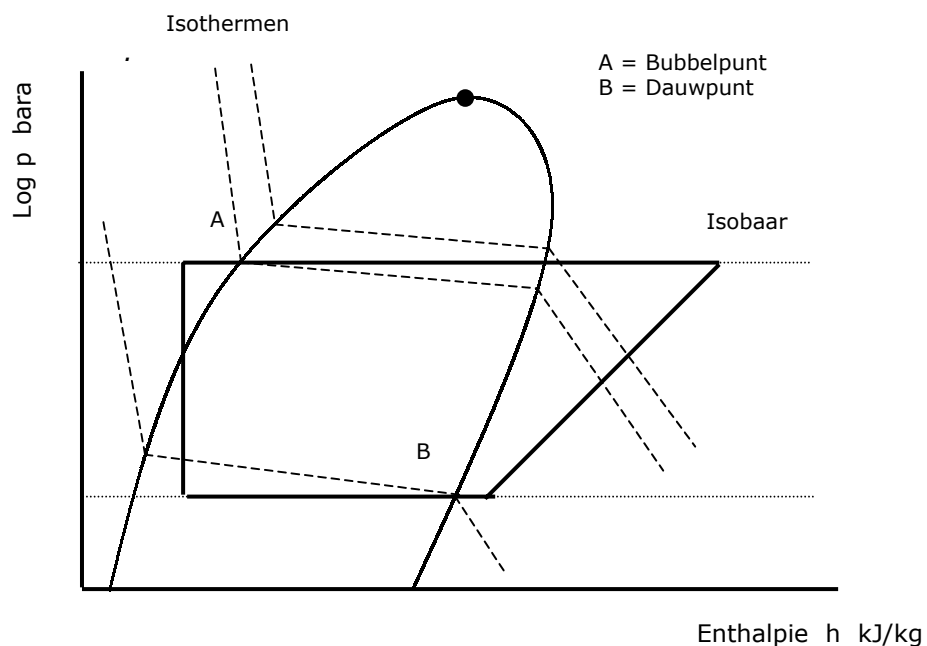
De oorspronkelijke FREON® koudemiddelen zoals R-11, R-12 en R-502 behoorden tot deze groep, net zoals sommige van de nieuwe SUVA® koudemiddelen, zoals SUVA® 123 en SUVA® 134a.

1.6 Niet-azeotrope koudemiddelen

De niet-azeotrope koudemiddelen waar wij mee te maken krijgen gedragen zich op een beperkte manier zoals de echte azeotropen. Alle koudemiddelen uit de R-400 serie bevinden zich in deze groep. Dat wil zeggen inclusief SUVA® MP39 (R-401A), SUVA® MP66 (R-401B), SUVA® HP80 (R-402A), SUVA® HP81 (R-402B), SUVA® 404A, SUVA® 507, SUVA® 407C en SUVA® 410A.

Voor deze koudemiddelen is de samenstelling van de damp anders dan die van de verzadigde vloeistof. Dit betekent, dat naarmate de verdamping verder gevorderd is (dat wil zeggen als de hoeveelheid damp toeneemt in de verdamper), de samenstelling van de kokende vloeistof verandert. Deze verandering van samenstelling gaat samen met een verandering (= verhoging) van de kooktemperatuur bij de gegeven druk. Dit betekent, dat er gedurende het verdampingsproces, bij gelijkblijvende druk, een verhoging van de temperatuur plaatsvindt. Deze toename van temperatuur wordt het *verdampingskooktraject* genoemd.

Kooktraject



Afbeelding 13. Log p-h diagram niet azeotroop koudemiddel.

Andersom vindt er tijdens de condensatie, als de damphoeveelheid afneemt, een daling van temperatuur plaats (condensatiekooktraject). Deze kooktrajecten zijn verschillen voor alle koudemiddelen en het verdampingskooktraject is licht afwijkend van het condensatiekooktraject. In het geval van de SUVA® koudemiddelen, varieert het kooktraject van 0,5 K voor SUVA® 404A tot 6 K voor SUVA® 407C.

De tabellen voor verzadigingseigenschappen voor deze producten wijken dan ook af van de tabellen voor de enkelcomponent en azeotrope koudemiddelen. De niet-azeotropen hebben twee verschillende verzadigde druk/temperatuur curven. Eén voor de verzadigde vloeistof (ook wel bubblepoint) en één voor de verzadigde damp (ook wel dauwpunt). Dit in tegenstelling tot één gecombineerde curve voor zowel damp als vloeistof in het geval van enkelvoudige of azeotrope koudemiddelen. In de eigenschapstabellen worden de waarden voor zowel vloeistof als damp gegeven.

De druk/enthalpie grafieken voor niet-azeotrope koudemiddelmengsels zijn ook licht afwijkend van die van enkelvoudige koudemiddelen. De isothermen, ofwel lijnen van constante temperatuur, zijn in het tweefasen gebied niet parallel met de isobaren (lijnen van constante druk). Afbeelding 13 geeft de verdamping- en condensatiekooktrajecten weer.

1.6.1 De praktische gevolgen van het gebruik van niet-azeotrope koudemiddelen

Er zijn bepaalde belangrijke verschillen tussen niet-azeotrope en enkelvoudige koudemiddelen die in het oog gehouden dienen te worden wanneer men SUVA[®] mengsels gebruikt.

Een aantal vuistregels voor het gebruik van niet-azeotrope mengsels:

1.

Vul altijd vanuit de vloeistoffase. Omdat de evenwichtsamenstelling van de damp anders is dan die van de vloeistof, moet het koudemiddel altijd vanuit de vloeistoffase overgepompt worden. Als de cilinder geen stijgbuis heeft, moet de cilinder op zijn kop gezet worden. Het geeft geen problemen, wanneer de vloeistof direct verdampt in de vulleiding (na de afsluiter). Het is niet nodig om vloeistof te vullen als de cilinder volledig leeg gemaakt wordt.

2.

Wanneer de installatie ingeregeld moet worden, is het van belang de juiste tabellen te gebruiken: voor verdamperoververhitting (compressorzijde) moeten de verzadigde gas (bubblepoint) tabellen gebruikt worden. Voor condensoronderkoeling moeten de verzadigde vloeistof (dauwpunt) tabellen gebruikt worden.

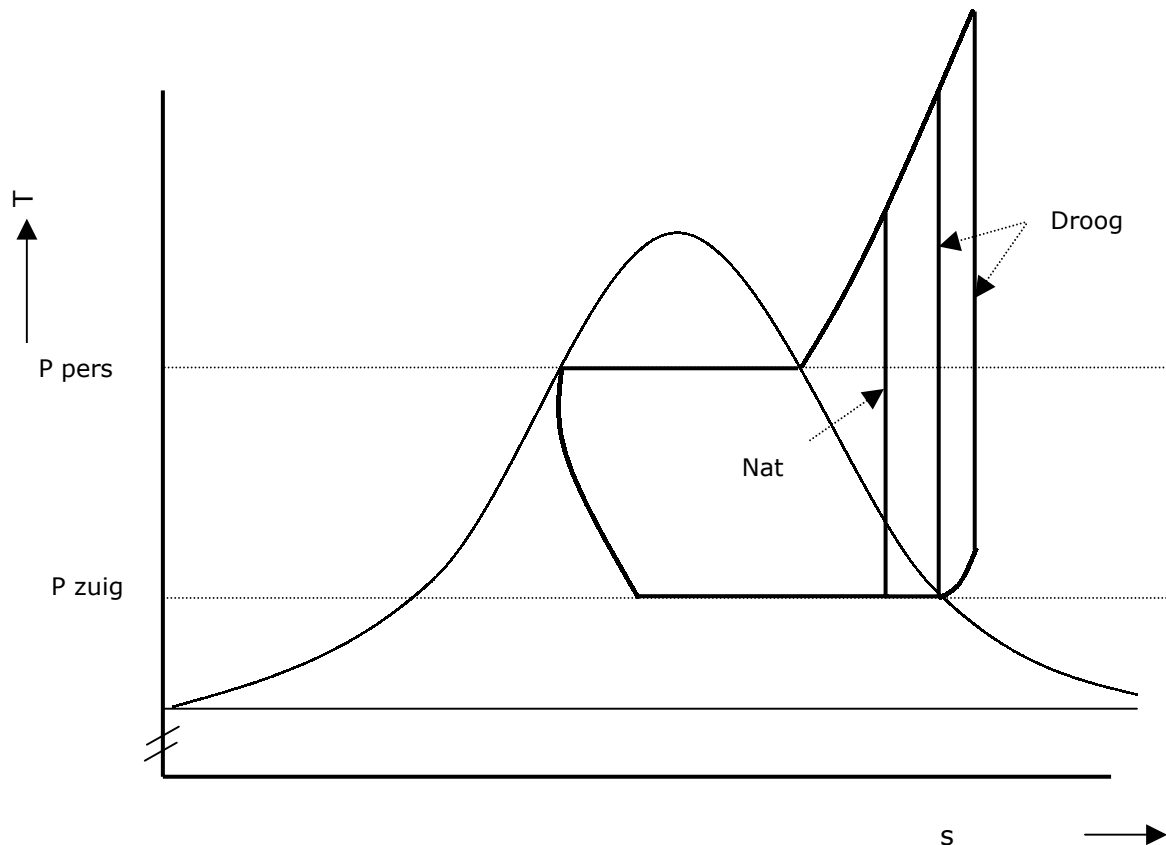
3.

De effectieve condensortemperatuur is het gemiddelde tussen dauwpunt en bubblepoint voor de gegeven druk. Om de effectieve verdampingstemperatuur te berekenen, moet rekening gehouden worden met flashgas.

Gemiddelde

2.0 Droge en natte compressie

We spreken van natte compressie als de door de compressor aangezogen dampdruppeltjes werkend middel bevatten.



Afbeelding 1. Droge en natte compressie in het T-s diagram.

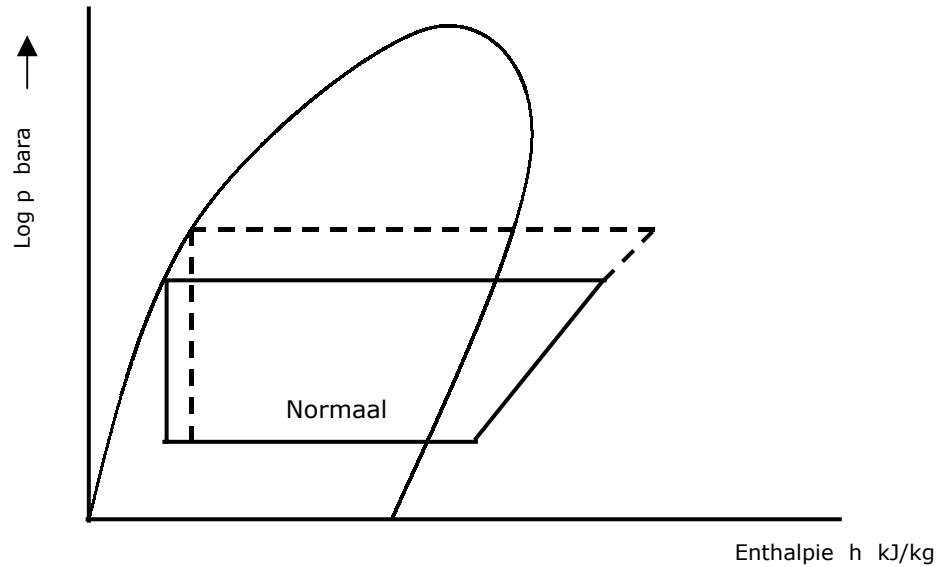
Door natte compressie toe te passen wordt de eindcompressie temperatuur lager, dit is van belang bij NH_3 . NH_3 valt bij $150\text{ }^\circ\text{C}$ uiteen in stikstof en waterstof.

NH_3 heeft dus een lage ontledingstemperatuur, $150\text{ }^\circ\text{C}$.

Minder warmte

Het gevolg van natte compressie is minder warmte opname per kg werkend middel. Dus voor een bepaalde capaciteit is dan een grotere circulerende massa per tijdseenheid noodzakelijk. Tijdens aanzuigen van nat gas in een nog warme cilinder zal er wat vloeistof in de damp verdampen waardoor de werkelijk aangezogen massa kleiner wordt. Van dit laatste is het gevolg dat de compressor een nog groter slagvolume per tijdseenheid moet hebben. Uit dit verhaal volgt dat men uit principe graag droge compressie toepast. De eindcompressietemperatuur mag ook weer niet te hoog zijn, anders moeilijkheden met smeren.

2.1 Te hoge condensordruk



Afbeelding 2. Hogere persdruk dan normaal.

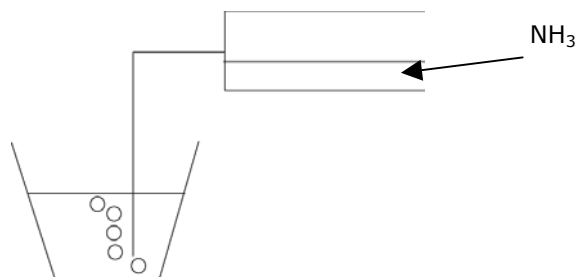
De compressor gaat nu meer arbeid vragen per kg werkend middel.
De compressor gaat nu minder warmte opnemen in verdamper.

Controle

Compressor af, koelwater bij laten staan; als de temperatuur op de manometer overeenkomt met de zeewatertemperatuur dan is alles ok. Als de temperatuur op de manometer hoger is, dan zit er een vreemd gas in het systeem.

Bij NH_3 zit de ontluchting laag, dus vlak boven het vloeistofniveau.

$$\rho_{\text{NH}_3} = \frac{14 + 3 \cdot 1}{22,4} = 0,758 \text{ kg/m}_0^3$$

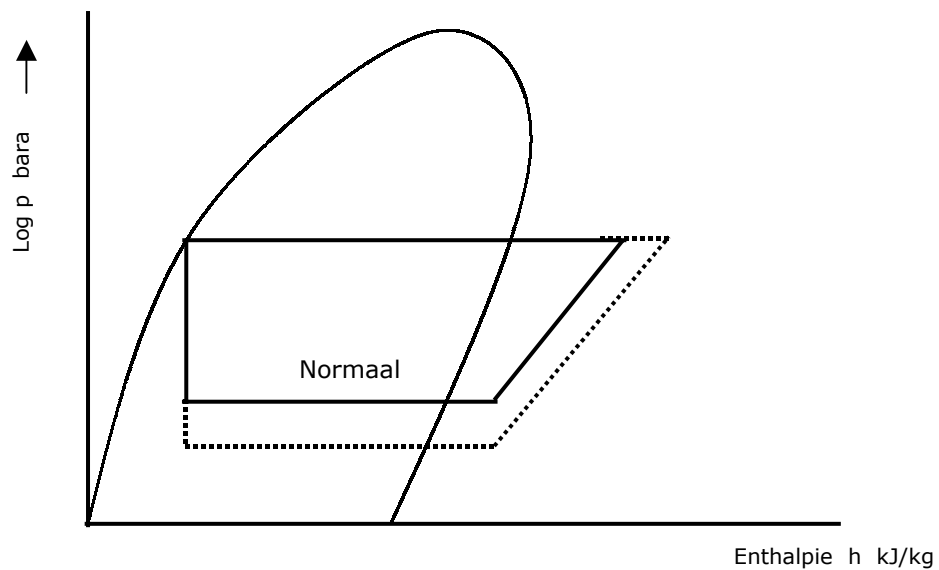


Afbeelding 3. Ontluchten ammoniakinstallatie.

Ontluchten via emmer water, bij borrelen lucht.
Als het borrelen ophoud dan zit er NH_3 in, want NH_3 lost op in water.

Oorzaken van een hogere persdruk dan normaal.

1. Vreemd gas.
2. Te weinig koelwater.
3. Condensor aan waterzijde vuil.
4. Condensor aan gaszijde vervuult.
5. Bij een condensor zonder vloeistofvat, waarin teveel werkend middel zit.
6. Watertemperatuur te hoog.

2.2 Lagere zuigdruk dan normaal

Afbeelding 4. Lagere zuigdruk dan normaal.

Oorzaken van een lagere zuigdruk dan normaal

1. Verdampers bevroren.
2. Expansieventiel verstopt of gedeeltelijk dicht, vastgevroren door water in freon.
3. Expansieventiel of magneetklep of droger filter vervuult.
4. Verdamperventilator stuk.
5. Te weinig werkend middel in systeem, dan ook te lage persdruk.

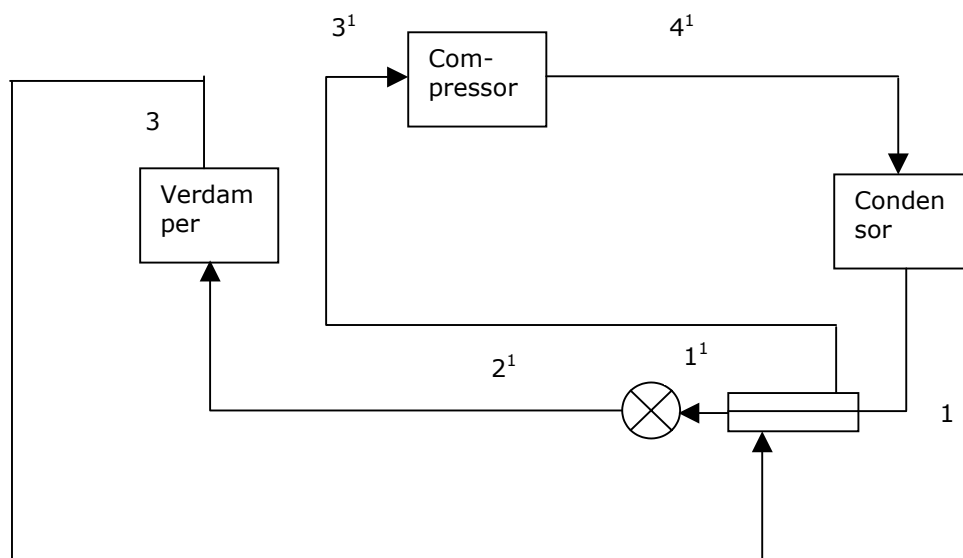
3.0 Rendementverbetering

We proberen het koelmiddel in de condensor te onderkoelen.

Onderkoelde vloeistof

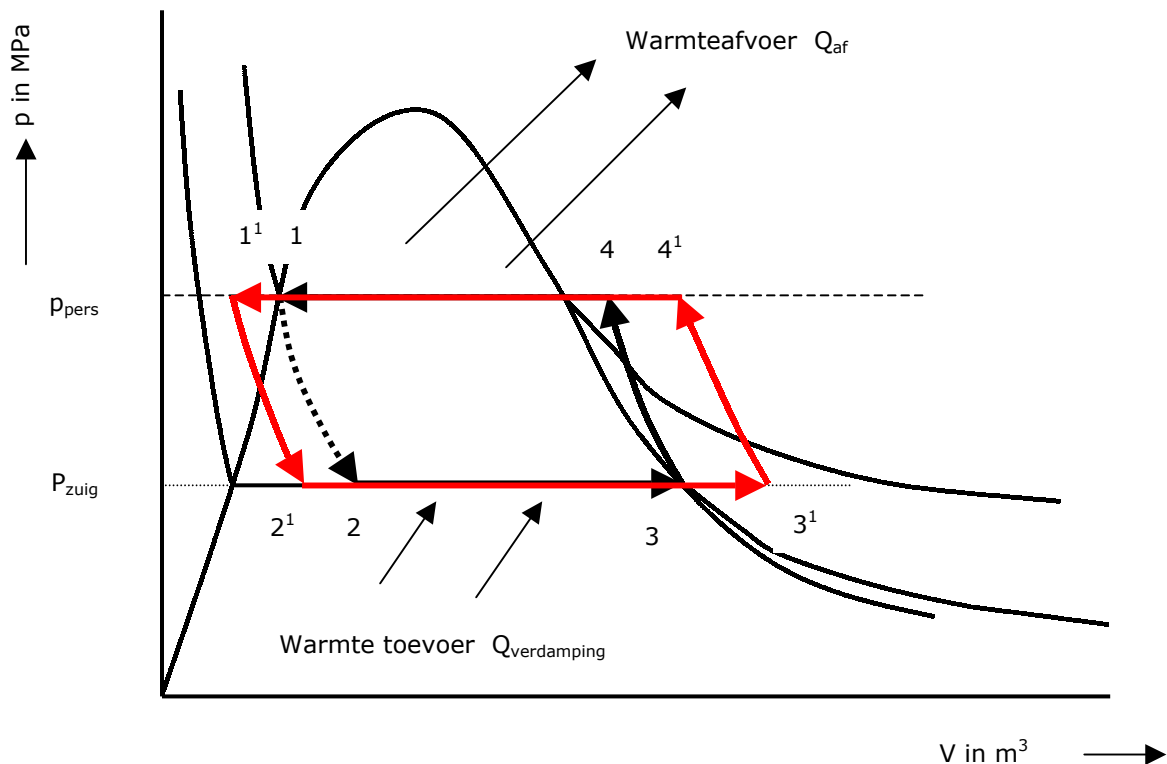
Onderkoelde vloeistof is vloeistof met een temperatuur die lager is dan de kooktemperatuur bij de heersende druk.

De bedoeling is het theoretisch thermisch rendement zo hoog mogelijk te maken. Dus Q_v moet groot worden en Q_c moet zo klein mogelijk blijven. Door middel van een warmtewisselaar is het mogelijk dit te bereiken, zie afbeelding 1.



Afbeelding 1. Koelsysteem met warmtewisselaar.

Dit proces is in het p-V diagram op afbeelding 2 weergegeven.



Afbeelding 2. Koelproces met warmtewisselaar.

Het proces 1-2-3-4-1 is het proces zonder warmtewisselaar.
Het proces 1¹-2¹-3¹-4¹-1¹ is het proces met warmtewisselaar.

Als toestand 1 en 3¹ op dezelfde isotherm komen te liggen vindt er geen warmtewisseling meer plaats in de warmtewisselaar, dus er is een limiet.

Dus door middel van een warmtewisselaar is het mogelijk het rendement (thermisch) te verbeteren.

De warmtetoevoer in de compressor blijft nagenoeg gelijk, terwijl de opgenomen warmte in de verdamper toegenomen is.

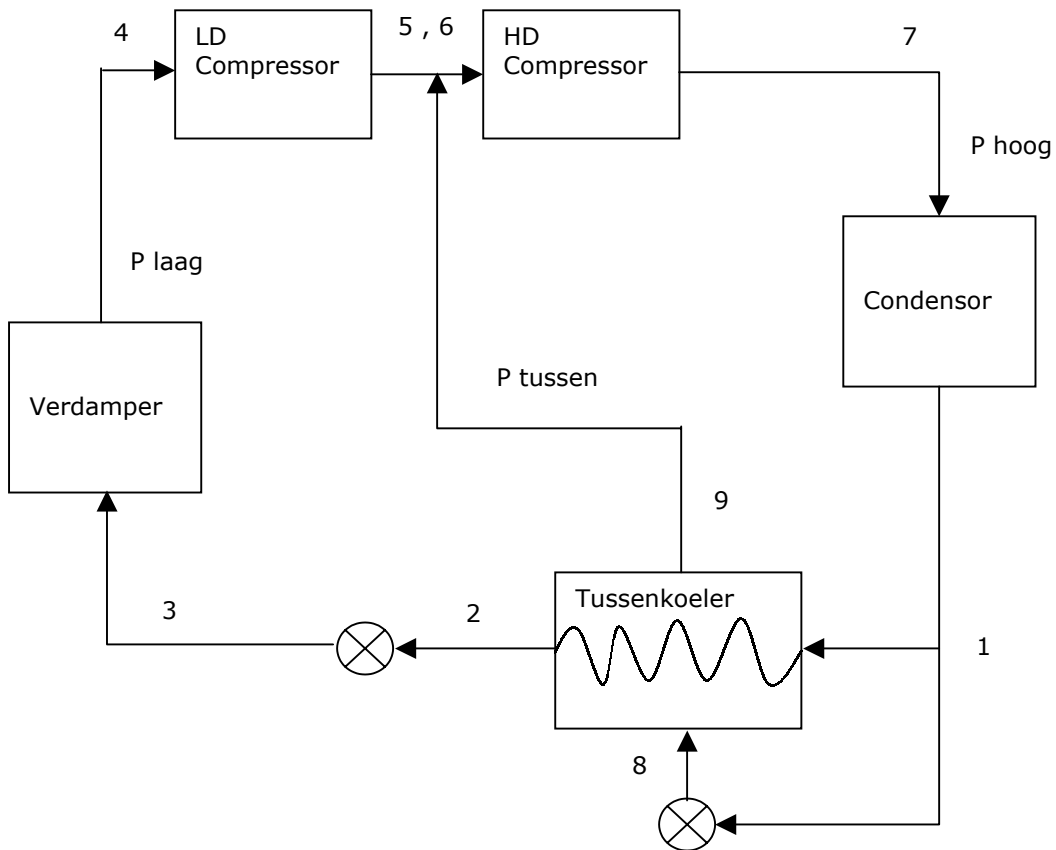
Let op, uit het log p-h diagram blijkt dat het rendement toeneemt, dit is echter niet per definitie zo. Als de damp wordt oververhit neemt ook het volume toe, kortom het gewicht van het circulerende koelmiddel neemt af.

Volumetoename

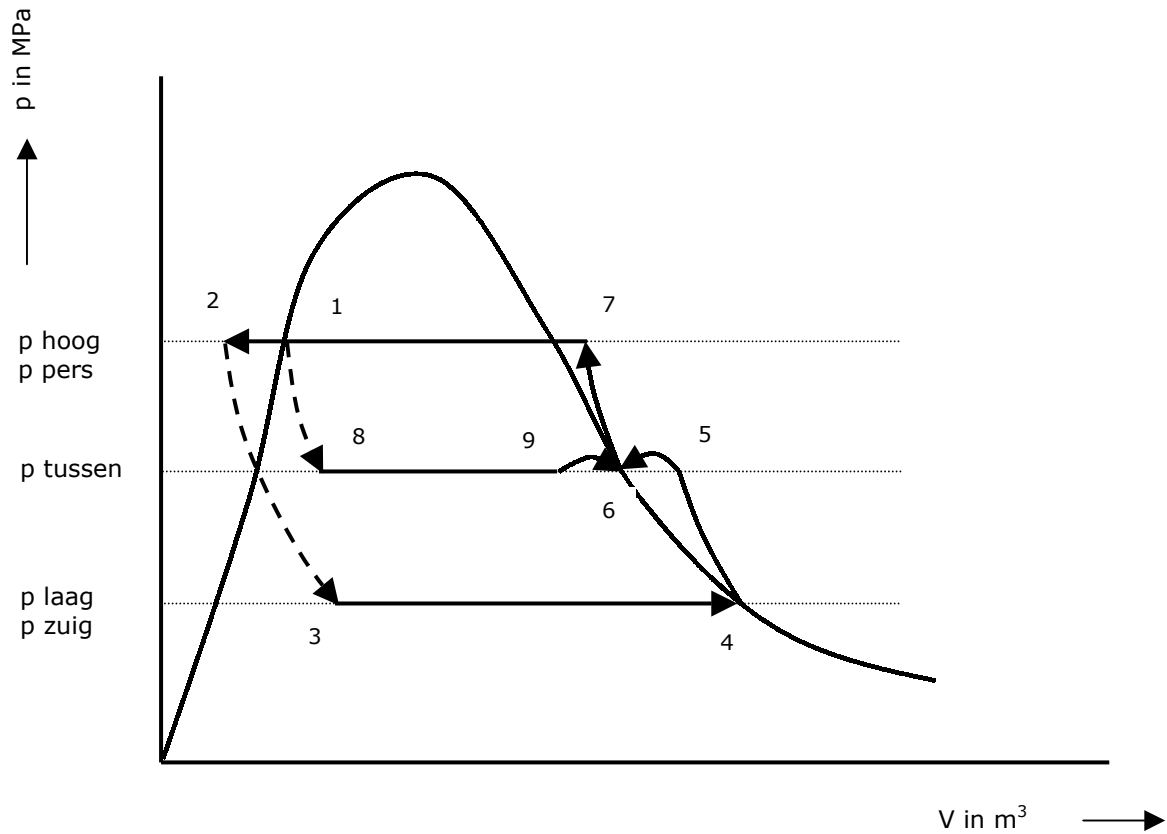
We hebben dus enerzijds een winst als gevolg van de warmtewisselaar, maar anderzijds een verlies door volumetoename. Het verschil van deze twee is de netto winst, dit hangt af van het gebruikte koelmiddel.

3.1 Tweetraps compressie

Een andere manier om verbetering van het thermisch rendement te verkrijgen is door middel van een tweetraps compressie met een tussenkoeler, zie afbeelding 3.



Afbeelding 3. Tweetraps compressie.



Afbeelding 4. Tweetraps compressie in het p-V diagram.

- 4 → 5 Warmtetoevoer in LD compressor, Q_{cLD}
 6 → 7 Warmtetoevoer in HD compressor, Q_{cHD}
 3 → 4 Warmteopname in de verdamper, Q_v

$$\eta_{th} = \frac{Q_v}{Q_{cHD} + Q_{cLD}}$$

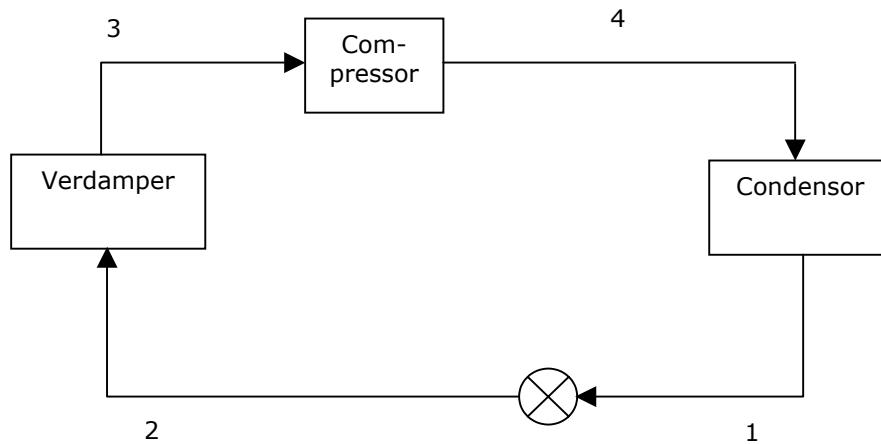
Leveringsfactor

Een koelinstallatie kost energie, men zal dus trachten het theoretisch thermisch rendement of ook wel de leveringsfactor genoemd, zo hoog mogelijk te maken. De compressiearbeid moet dan zo laag mogelijk zijn en de opgenomen warmte in de verdamper zo hoog mogelijk. De vloeistof voor de regelklep moet dan zo ver mogelijk worden onderkoeld. Een manier om dat te doen is met behulp van een warmtewisselaar waar de koude damp uit de verdamper doorheen stroomt. Het nadeel hiervan is dat deze damp in volume toeneemt en ook in temperatuur, zodat de eindcompressie temperatuur ook hoger wordt. De invloed van zo'n warmtewisselaar is echter gering daar voor warmtewisseling temperatuurverschil nodig blijft.

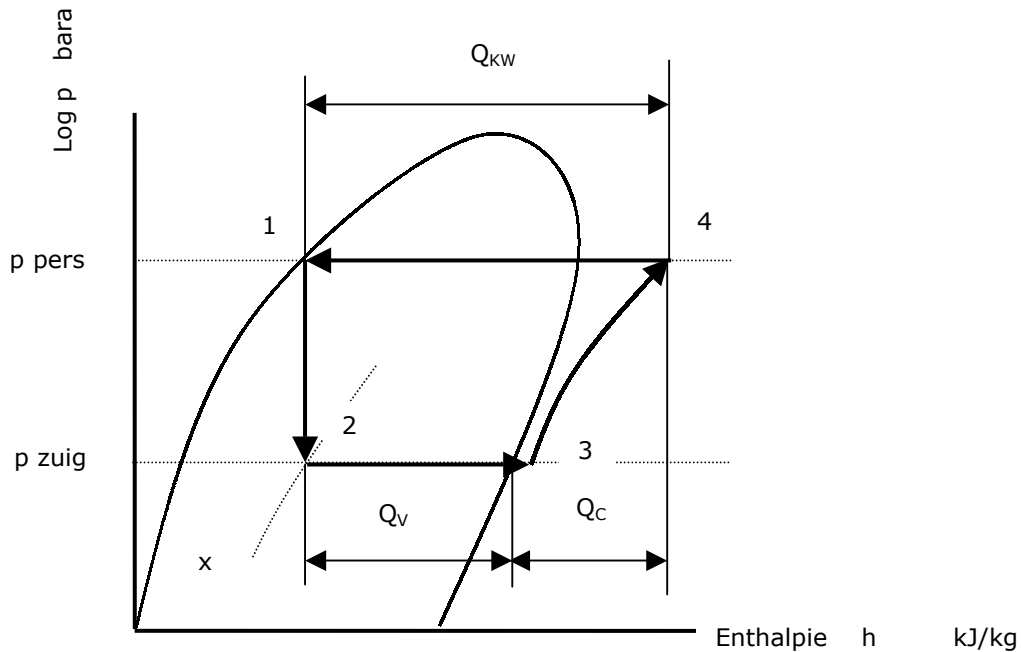
Een andere manier is met behulp van een LD en HD compressor plus een tussenkoeler. In deze tussenkoeler laten we dan een klein gedeelte van de hoofdvloeistofstroom via een regelklep verdampen.

De vloeistof voor de regelklep wordt dan onderkoeld door een verdampende hoeveelheid vloeistof. Men maakt hier dus gebruik van de verdampingswarmte. De vloeistofstroom door de inspuikcoeler mag niet te groot zijn, daar anders de capaciteit van de verdamper terugloopt. In de praktijk is dit percentage ongeveer 5 à 10% van de hoofdvloeistofstroom.

Tot slot zullen we de drie installaties in het log p-h diagram zetten, op afbeelding 5 en 6 ziet u een installatie zonder warmtewisselaar. Op afbeelding 7 en 8 een installatie met warmtewisselaar en op afbeelding 9 en 10 een tweetraps compressie met warmtewisselaar.



Afbeelding 5. Eenvoudige koelinstallatie.



Afbeelding 6. Log p-h behorende bij afbeelding 5.

1 → 2 Smoorproces bij constante enthalpie.

$$h_1 = h_2$$

$$h_1 = h_{vvp2}$$

$$h_2 = h_{vvp2} + x \cdot r$$

$$x = \frac{h_{vvp2} - h_{vvpz}}{r}$$

2 → 3 Verdamping bij constante druk.

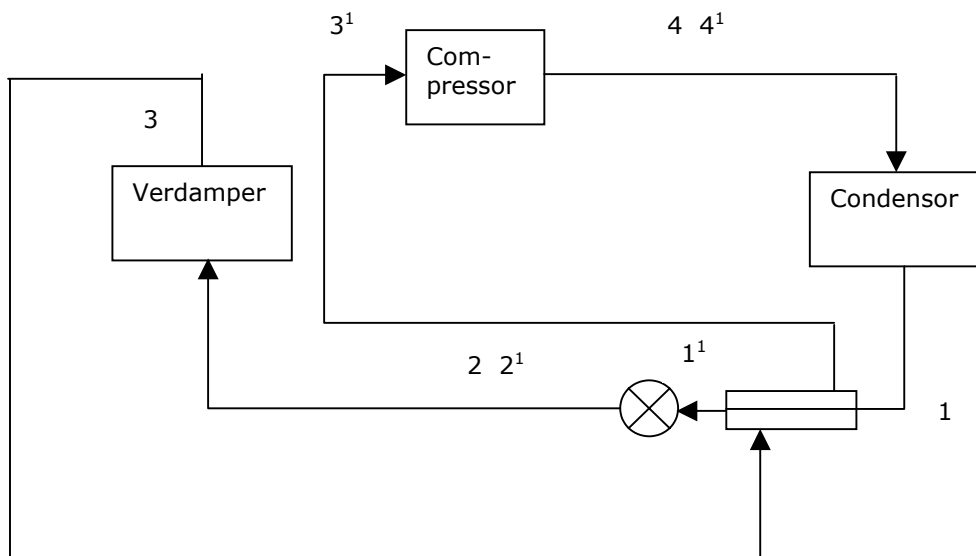
$$Q_v = (1-x)r \text{ kJ/kg}$$

3 → 4 Isentropische compressie.

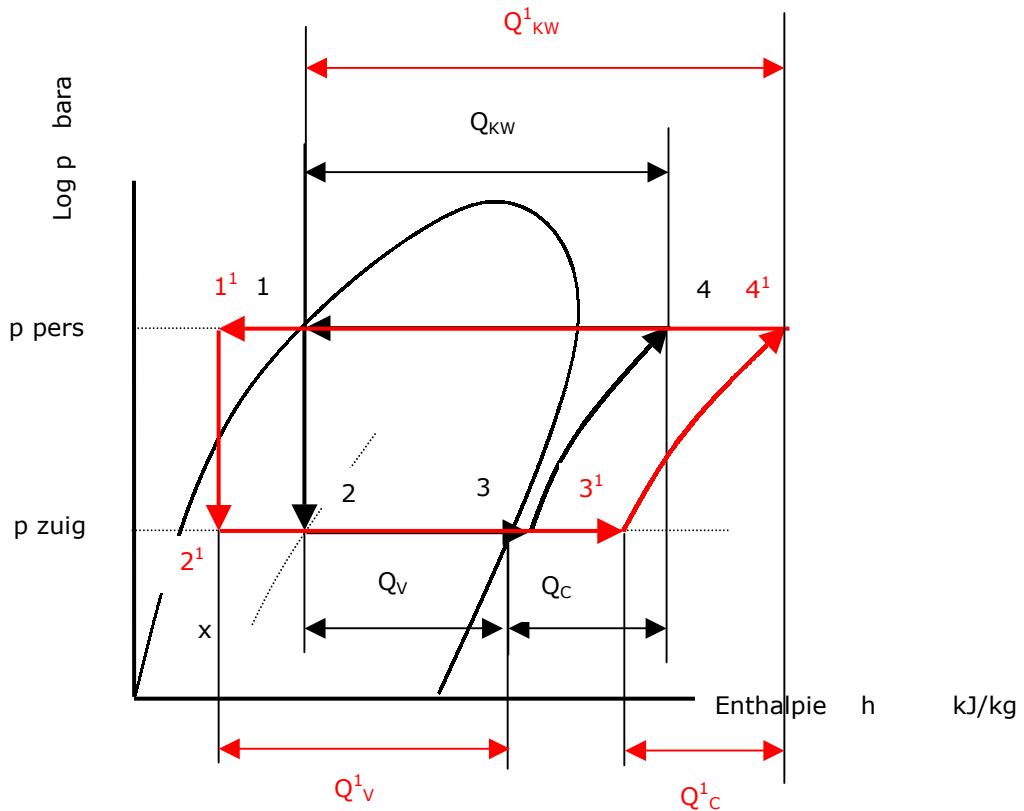
$$Q_c = \frac{n}{n-1} (p_p V_{1-4} - p_z V_{2-3})$$

4 → 1 Afvoer warmte bij constante druk.

$$Q_{kw} = h_4 - h_1$$



Afbeelding 7. Koelinstallatie met warmtewisselaar.



Afbeelding 8. Log p-h behorende bij afbeelding 7.

$$1-1' = 3-3'$$

De warmtewisselaar zorgt ervoor dat de opgenomen warmte in de verdamper Q_v groter wordt.

De warmtewisselaar vraagt geen extra vermogen. $Q_c \approx Q'_c$

De compressor moet echter groter zijn want $V_{3'} > V_3$.

Grotere eindtemperatuur na compressie, warmer gas in condensor met groter volume, dus grotere condensor. (Q_{kw} meer warmte afvoeren).