

KOELINSTALLATIES

VOCHTIGE LUCHT EN LUCHTBEHANDELING



Voorwoord

Het boek koel en vriestechniek behandelt de koel en vries techniek en theorie, tevens is een aantal hoofdstukken over klimaatregeling opgenomen.

De benodigde theorie om installaties uit te rekenen is opgenomen.

Het boek beschrijft zowel de "oude" freonen als de milieuvriendelijke koudemiddelen. De rekenmethodes zijn voor beiden gelijk.

Verder zijn de aandachtspunten vermeld die nodig zijn om oude installaties over te zetten op de nieuwe koelmiddelen.

Dank is verschuldigd aan Hoekloos, vertegenwoordiger voor de Benelux van SUVA koudemiddelen van Du Pont.

Bij de tweede druk is het ammoniak systeem toegevoegd en in het hoofdstuk vochtige lucht zijn wat toevoegingen gedaan.

Ondergetekende ontvangt gaarne suggesties die de kwaliteit en bruikbaarheid van dit boek kan vergroten.

Ing. A.J. de Koster

2014

Koelinstallaties

Vochtige lucht en luchtbehandeling

Adviesbureau de Koster v.o.f.

Dorpsstraat 5

4513 AL Hoofdplaat

Tel. 0117-348223

ISBN 978-90-78142-37-9

1^e druk 2004

2^e druk januari 2014

Copyright © 2004 Adviesbureau de Koster

Copyright © 2014 Adviesbureau de Koster

© Adviesbureau de Koster, Dorpsstraat 5, 4513 AL Hoofdplaat. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Dit is tevens van toepassing op gehele of gedeeltelijke bewerking van deze uitgave.

Hoewel dit boek met veel zorg is samengesteld, aanvaarden wij geen aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en / of onvolkomenheden in dit boek.

Inhoud

1.0	Koel en vriesmachines	7
1.1	Koelcyclus	8
1.2	Schema's	10
1.2.1	Water	10
1.2.2	Druk/enthalpie	10
1.2.3	Expansie	15
1.2.4	Verdamping	15
1.2.5	Compressie	16
1.2.6	Condensatie	17
1.3	C.O.P. (Coëfficiënt of Performance)	17
1.4	Definitie van de types fluorkoolwaterstoffen	18
1.5	Enkelvoudige koudemiddelen en azeotropen	19
1.6	Niet-azeotrope koudemiddelen	19
1.6.1	De praktische gevolgen van het gebruik van niet-azeotrope koudemiddelen	20
2.0	Droge en natte compressie	21
2.1	Te hoge condensordruk	22
2.2	Lagere zuigdruk dan normaal	23
3.0	Rendementverbetering	24
3.1	Tweetraps compressie	26
4.0	Meertraps vriessystemen	32
4.1	Meertraps compressie in log p-h en T-s diagram	33
5.0	Expansieklep	37
5.1	Welke instrumenten zijn nodig voor controle goede werking	41
6.0	Eigenschappen koelmiddelen	42
6.1	Werkende middelen	42
6.1.1	NH ₃ : Ammoniak	42
6.1.2	Freonen	42
7.0	Opsporen van fouten en instelling	45
7.1	De wisselwerking tussen verdamper en thermostatisch expansieventiel	45
7.2	Grootte van het expansieventiel, aanduiding van het koelmedium en temperatuurbereik	45
7.3	Geen doorstroming van vloeistof in het expansieventiel	46
7.4	Juiste montage van drukvereffeningleiding en voeler	46
7.5	Het meten van de temperatuurvariaties bij de voeler van het expansieventiel	49
7.6	Aanpassing van het expansieventiel aan de verdamper bij "hunten"	49
7.7	Aanpassing van het expansieventiel aan de verdamper indien er geen sprake van "hunten" is	51
7.8	Kort overzicht voor het opsporen van fouten	53
8.0	Smeermiddelen en hun gedrag met SUVA[®] koudemiddelen	56
8.1	Smeermiddelen geschikt voor gebruik met SUVA [®] koudemiddelen	56
8.2	Mengbaarheid van smeermiddelen en SUVA [®] koudemiddelen	57

8.3	Resten minerale olie	57
8.4	Kwaliteit van het smeermiddel	57
8.4.1	Smeermiddel viscositeit	58
8.4.2	Standaard viscositeit	58
8.4.3	Viscositeit in koelsystemen	58
8.4.4	Circulatie van het smeermiddel: terugvoer naar de compressor	59
8.4.5	Olie afscheider	60
8.5	Het vullen van smeermiddel	60
8.5.1	Eerste vulling en service smeermiddelen	60
8.5.2	Voorzorgsmaatregelen	60
8.5.3	Vullen met smeermiddelen	61
8.5.4	Normale olievulprocedure	61
8.5.5	Smeermiddel aftappen	62
8.5.6	Aanbevolen methode	62
8.5.7	Alternatieve methode	63
8.5.8	Mogelijke indringing van lucht	63
9.0	Het retrofitten van bestaande systemen	64
9.1	Hoe kies ik het niet-CFK koudemiddel	64
9.2	Ombouwen van R-12 naar SUVA® MP39 en SUVA® MP66	65
9.3	Keuze	65
9.4	Verdraagbaarheid met materialen en smeermiddelen	66
9.5	Welke componenten moeten verwisseld worden?	66
9.6	Benodigde apparatuur voor de ombouw	66
9.7	Retrofit procedure	67
10.0	Hoe om te gaan met verontreinigingen in het systeem	69
10.1	De belangrijkste vervuilingen	69
10.2	Lucht	69
10.3	Water	70
10.4	Metaaloxides	70
10.5	Vaste deeltjes	70
10.6	Andere vervuilingen	71
10.7	Vacumering	71
10.7.1	Doel van het vacumeren	71
10.7.2	Methodes	72
10.7.3	Aanwezige waterdamp	72
10.7.4	Goede aflezing van het vacuüm bij lage drukken	72
10.7.5	Vacumeermethode	72
10.7.6	Capaciteit van de vacuümpomp	72
10.7.7	Hoeveelheid vrij water	73
10.7.8	Verwerking van verontreinigd koudemiddel	73
10.8	Hoe houd ik het systeem droog en schoon	73
10.8.1	Onderhoudstips voor cilinders	73
10.8.2	Het voordeel van schone en droge leidingen en aansluitingen	74
11.0	Water en drogen	75
11.1	Waarom is water een probleem?	75
11.1.1	Hoeveel water is "veilig"?	75
11.2	Oplosbaarheid	75
11.2.1	Oplosbaarheid van water in vloeibare koudemiddelen	75
11.2.2	Oplosbaarheid van koudemiddel in water	75
11.3	Vochtindicator	76
11.3.1	Kijkglasindicator	76
11.4	Hygrometers	76
11.5	Drogen in de praktijk	77
11.6	Functie van de filterdroger	77

12.0	In bedrijf stellen van nieuwe of gerepareerde installatie	78
13.0	De ozonlaag	79
13.1	Historische achtergrond	79
13.2	Wat is de ozonlaag	79
13.3	Aantasting van de ozonlaag ("Ozonepletie")	79
13.4	Ozon Depletie Potentieel	80
13.5	Huidige stand van de wetenschap	80
13.6	Andere theorieën	81
13.7	De toekomst van de ozonlaag	81
13.8	Wereldwijde opwarming	82
13.8.1	Broeikaseffect	82
13.9	TEWI	82
13.10	Wettelijke maatregelen	83
14.0	Veiligheid	84
14.1	Introductie	84
14.2	Eigenschappen	84
14.3	MAC (Maximaal Aanvaarde Concentratie)	84
14.4	Voorzorgsmaatregelen bij gebruik van SUVA® koudemiddelen	85
14.5	Eerst Hulp	86
15.0	Rekenvoorbeelden	87
15.1	Voorbeeld 1	87
15.2	Voorbeeld 2	90
16.0	De gelijke drukklep	92
17.0	De Ammoniakinstallatie	94
17.1	Inleiding	94
17.1.1	Algemeen	94
17.2	Begrippen	95
17.3	Koelcyclus	96
17.4	Schema's	99
17.4.1	Water	99
17.4.2	Druk/enthalpie	100
17.4.3	Expansie	104
17.4.4	Verdamping	104
17.4.5	Compressie	105
17.4.6	Condensatie	106
17.5	C.O.P. (Coëfficiënt of Performance)	106
17.6	Componenten	107
17.6.1	De condensor	107
18.0	Het tweetrapssysteem	110
18.1	Inleiding	110
18.2	Tweetrapssysteem met tussen insputing	111
18.3	Tweetrapssysteem met open tussenkoeler	112
18.4	Tweetrapssysteem met gesloten tussenkoeler	113
18.5	Tweetrapssysteem met tusseninsputing gecombineerd met een warmtewisselaar	114
18.6	Het cascadesysteem	115
18.7	Pompcirculatie systeem	116
19.0	De capaciteit van de ammoniakinstallatie	117
19.1	Voorbeelden	118
19.1.1	Voorbeeld 1	118

19.1.2	Voorbeeld 2	119
20.0	Vochtige lucht en klimaatbehandeling	122
20.1	Grafische voorstelling	123
20.2	Theoretische beschouwing	124
20.3	De absolute vochtigheidsgraad	126
20.4	De maximale dampspanning	127
20.5	De relatieve vochtigheidsgraad	128
20.6	Voorbeelden	129
20.6.1	Voorbeeld 1	129
20.6.2	Voorbeeld 2	131
20.7	De Enthalpie van vochtige lucht	132
20.7.1	Voorbeeld	133
21.0	Het Mollier diagram voor vochtige lucht	134
21.1	Specifieke punten en processen in het diagram	137
21.1.1	Temperatuur en dauwpunt zijn bekend.	137
21.1.2	Droge en natte bol temperatuur zijn bekend	138
21.1.3	Drukschaal	139
21.1.4	Dichtheid	140
21.3	Verwarmen van vochtige lucht	142
21.4	Mengen van vochtige lucht	144
21.5	Het koelen van vochtige lucht	146
21.6	Het bevochtigen van vochtige lucht	147
21.7	Het drogen van vochtige lucht	151
21.8	Theoretische aanpak	152
21.9	Voelbare warmte factor	153
21.9.1	Rekenvoorbeeld 1	156
21.9.2	Rekenvoorbeeld 2	158
21.9.3	Rekenvoorbeeld 3	160
21.10	De effectieve temperatuur	162
21.11	Het behaaglijkheidsgebied	163
22.0	Opgaven	164
	Opgave 1	164
	Opgave 2	166
	Opgave 3	168
	Opgave 4	168
	Opgave 5	169
	Opgave 6	169
23.0	Uitwerkingen	170
	Opgave 1	170
	Opgave 2	172
	Opgave 3	173
	Opgave 4	174
	Opgave 5	175
	Opgave 6	178
24.0	Bijlagen	179

1.0 Koel en vriesmachines

Inleiding

Het proces van koude is een proces van warmteoverbrenging, dat door H.W. Carrier als volgt werd omschreven: "Koeling is het overbrengen van warmte van waar het niet gewenst is tot waar het geen problemen geeft". De meest gebruikelijke methoden van tegenwoordig zijn:

Fysische methoden:

- a. Omzetten van vaste stof in vloeistof (d.w.z. ijs of gebruik van latente warmte bij smelten).
- b. Omzetting door compressie en expansie bij mechanische koeling (gebruik van latente verdampingswarmte).
- c. Thermo-elektrische methode.

Fysisch chemische methoden:

- a. Absorptie van verschillende stoffen.
- b. Desorptie van verschillende stoffen.

Basisprincipes

Als we ervan uitgaan dat het koelproces uiteindelijk veel overeenkomsten vertoont met het koken, condenseren, bevriezen en smelten van water, kunnen we om de basisprincipes van het koelproces te begrijpen goed uit gaan van deze stof.

Fusie

Om van vaste stof over te gaan naar vloeistof, bij een constante temperatuur van 0 °C, absorbeert ijs een hoeveelheid energie die gelijk is aan 334,4 kJ. De warmte die het af te koelen product afgeeft, is de latente fusiewarmte.

Kookpunt

Deze temperatuur komt overeen met het begin van de omzetting van vloeistof in damp. Het kookpunt wordt bepaald door de druk boven het vloeistofoppervlak. Bij elke druk hoort een bepaald kookpunt.

Kookpunt water (°C)	Druk (bar(a))
151	5
100	1
68	0,3
12,7	0,015
6,7	0,010

Tabel. Druk/kookpunt van water.

Latente verdampingswarmte

Om van vloeistof over te gaan in damp bij een constante temperatuur van 100 °C bij 1,013 bar (760 mm Hg) atmosferische druk, vraagt water een hoeveelheid energie van 2254,69 kJ (de standaard atmosferische druk is 1,01325 bar).

Oververhitting

Indien na het verkrijgen van verzadigde damp, meer energie wordt geleverd zodat de damp temperatuur oploopt, verandert de verzadigde damp in oververhitte damp.

Condensatie

De verandering van vloeistof in gas is een omkeerbaar verschijnsel. Als we warmte van de damp wegnemen, verandert de damp in water. In het voorbeeld hierboven verandert de waterdamp door warmte aan de omringende lucht af te geven van gasvormig in vloeibaar bij een constante temperatuur van 100 °C. Als daarna het water nog verder afkoelt, wordt het onderkoeld.

SUVA 134a

In het geval van SUVA® 134a (1,1,1,2 tetrafluorethaan) ligt de verhouding druk-kookpunt-latente verdampingswarmte als volgt:

Absolute druk (bar)	Kookpunt (°C)	Latente verdampingswarmte (kJ/kg)
1	-26,3	217,3
2	-10,1	206,2
3	0,7	198,2
4	8,9	191,8
5	15,7	186,2
6	21,5	181,1

Tabel. Druk/kookpunt/latente warmte van SUVA® 134a.

1.1 Koelcyclus

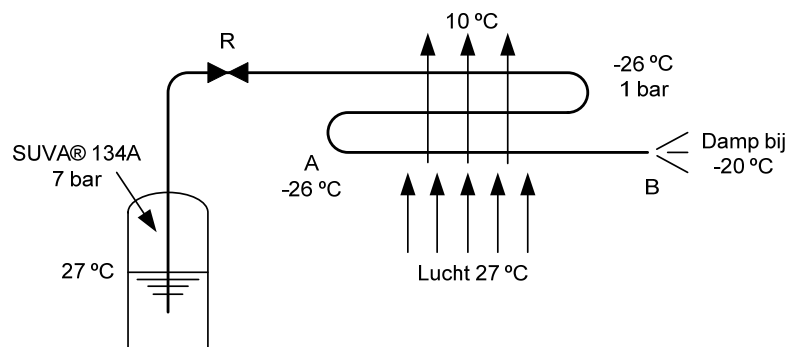
Verdamping

Om te kunnen verdampen moet een koudemiddel warmte opnemen.

Kijken we naar de installatie op afbeelding 1.

- Er zit vloeibare SUVA® 134a in de cilinder bij een druk van 7 bar(a).
- De reduceerafsluiter R is geopend.
- Het koudemiddel vloeit de leiding in bij 1 bar(a), atmosferische druk. Dit komt overeen met een temperatuur van - 26,3 °C.

Bij 27 °C wordt warmte onttrokken aan de lucht: de lucht wordt gekoeld tot 10 °C en het koudemiddel verandert van vloeistof in damp. Het apparaat waarin deze verdamping plaatsvindt is de **verdamp(er)**.



Afbeelding 1.

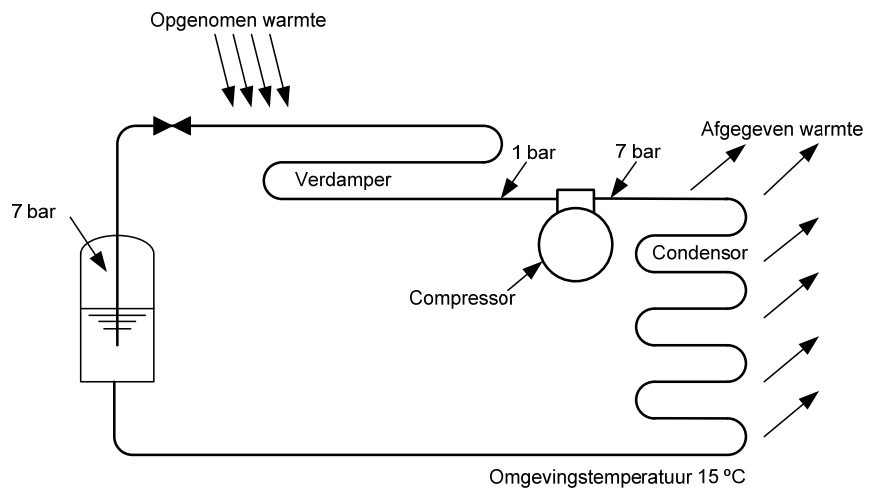
Opm.1: Als bij punt A al het koudemiddel in damp is veranderd, zal de damp tussen A en B worden oververhit; in dit voorbeeld is dit van -26,3 °C naar 20 °C.

Opm.2: Telkens wanneer 1 kg SUVA® 134a bij 1 bar verandert van vloeistof naar damp, is een energie (warmte) opname benodigd van 217 kJ. De vloeistof wordt veranderd in damp met een dichtheid van 5,2 kg/m³.

Compressie/condensatie

Om de koudemiddeldamp terug te kunnen winnen bij de uitlaat van de verdamper, kunnen we het schema uit afbeelding 1 completeren, zie afbeelding 2.

- Damp verlaat de verdamper en gaat de compressor in, bij een geopende inlaatklep.
- De zuiger gaat omlaag en het totale volume van de kamer wordt gevuld met damp.
- De zuiger gaat omhoog, de inlaatklep gaat dicht, de druk in de kamer neemt toe tot 7 bar en het gas wordt onder deze hogere druk uitgestoten.
- Het hogedrukgas gaat de tweede warmtewisselaar in en geeft warmte af aan het omringende medium. Omdat het gas warmte afgeeft, verandert het weer van damp in vloeistof. De warmtewisselaar waarin de damp wordt gecondenseerd, is de *condensor*.
- Het vloeibaar geworden koudemiddel wordt weer aan de opslagcilinder teruggegeven en de cyclus is compleet.



Afbeelding 2. Gesloten koelinstallatie.

Verdamper:

Neemt energie (warmte) op van het omringende medium (lucht, water).

Compressor:

Gaspomp die de damp van een lage druk aanzuigt en samenperst tot een hogere druk.

Condensor:

Geeft warmte af aan de omgeving en maakt condensatie van het koudemiddel mogelijk.

Expansieapparaat:

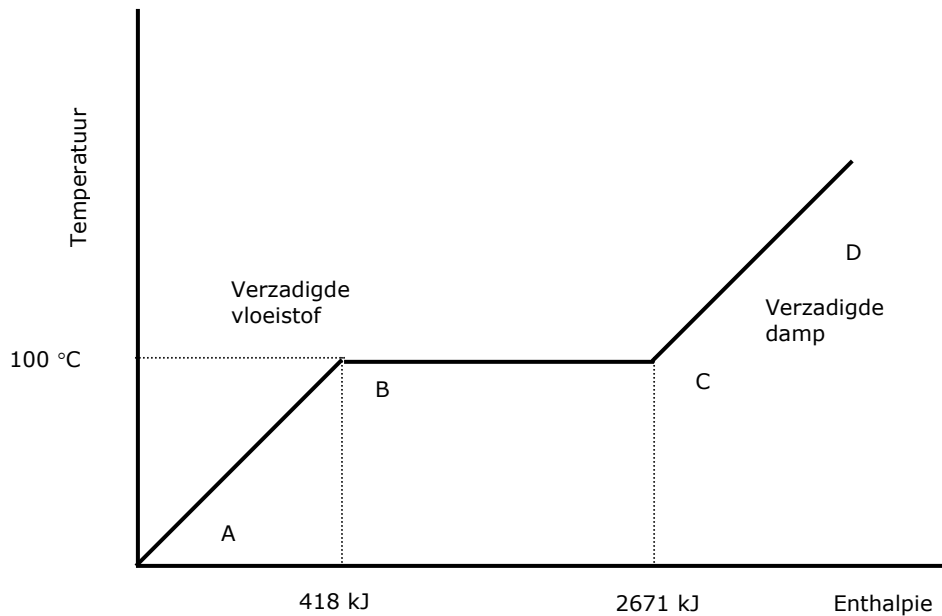
Laat de druk van het koudemiddel dalen van de hoge (condensor) druk tot de lage (verdampers) druk.

Behalve deze vier basisapparaten kunnen er ook nog diverse vaten in het systeem opgenomen zijn om de vloeistof bij hoge of bij lage druk te verzamelen en te verdelen.

1.2 Schema's

1.2.1 Water

Temperatuur/enthalpie



Afbeelding 3. Temperatuur/enthalpie van water.

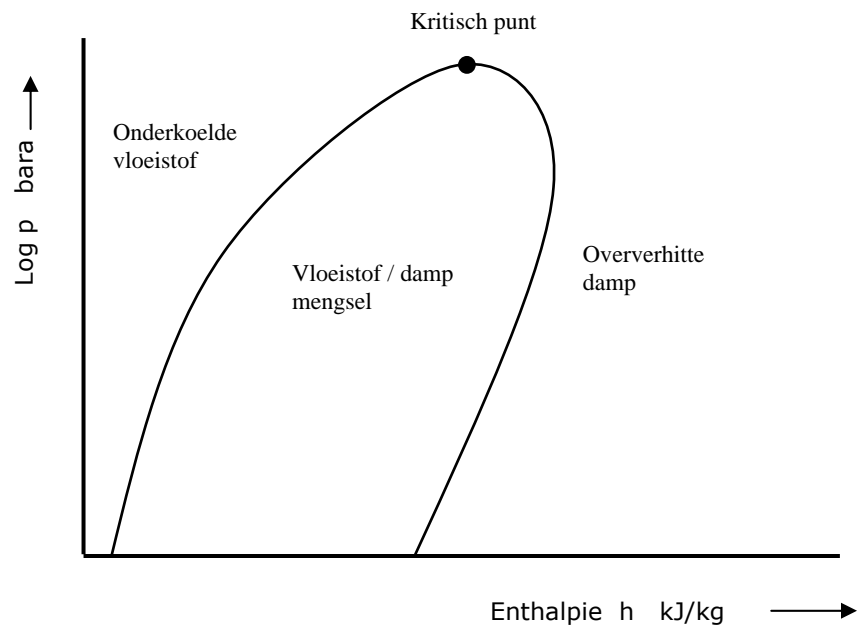
Bij een atmosferische druk van 1 bar verandert 1 kg water als volgt:

- A-B Vloeistof wordt verhit van 0 °C tot 100 °C. Bij B verschijnt de eerste damp. Voor deze temperatuurstijging is een energie (warmte) toevoer vereist van 418 kJ.
- B-C Vloeistof verandert in verzadigde damp. Bij C is de laatste vloeistof verdwenen. Tijdens deze gedaanteverwisseling is de temperatuur constant en is een energietoevoer van 2253 kJ benodigd om de omzetting te bewerkstelligen.
- C-D De damp kan verder worden verhit. Om de temperatuur van 1 kg damp met 1 °C te verhogen, is 1,88 kJ energietoevoer nodig.

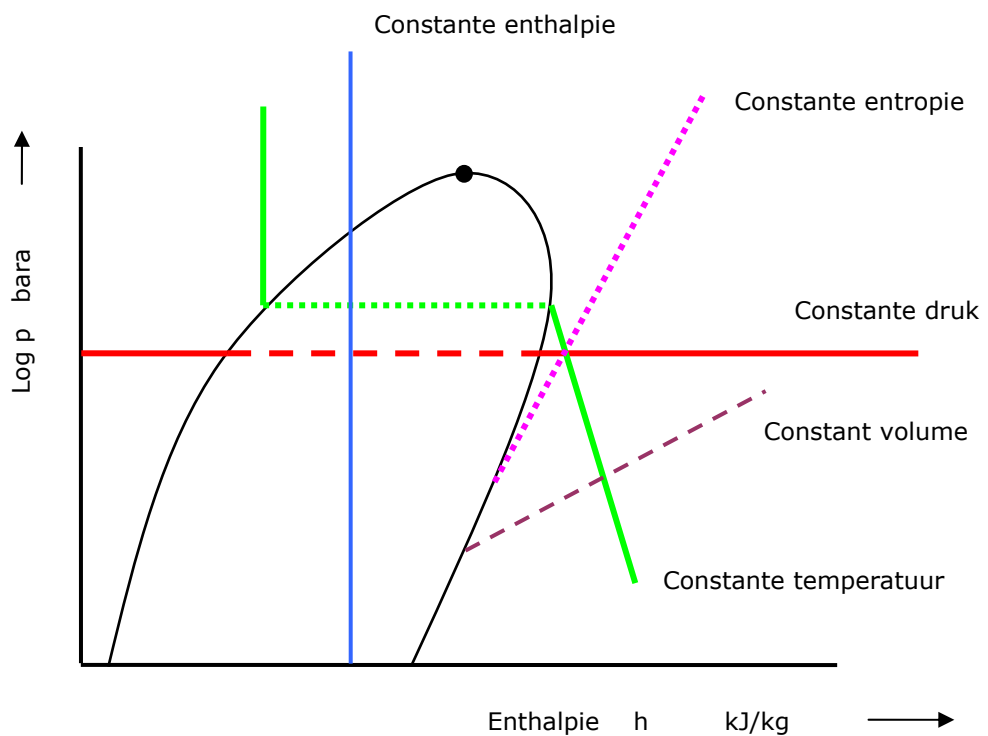
1.2.2 Druk/enthalpie

Mollier-diagram

Voor elk SUVA[®] koudemiddel is een diagram te tekenen zoals op volgende bladzijde is 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.



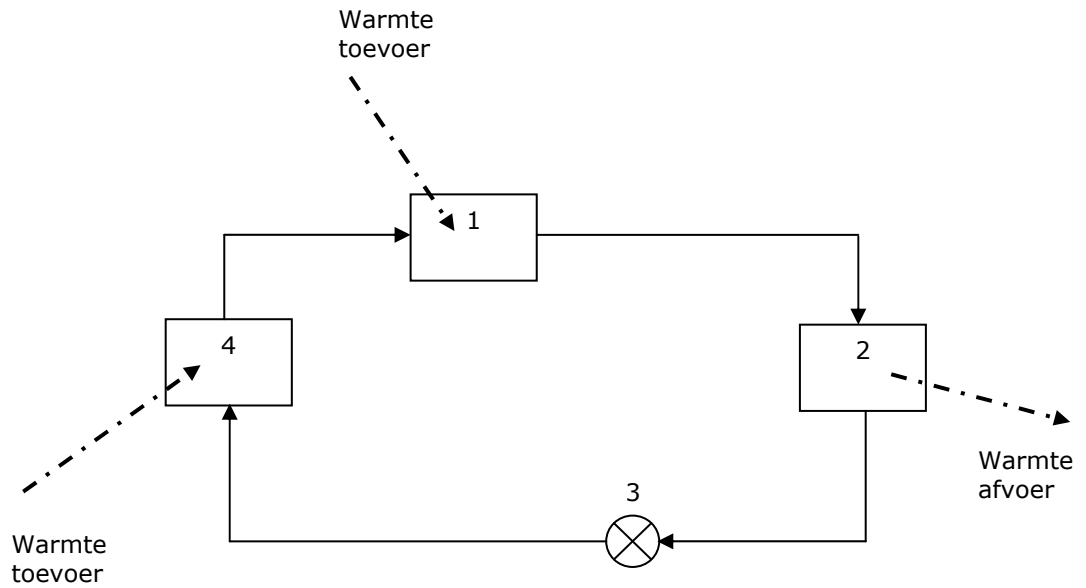
Afbeelding 4. Druk-enthalpie diagram.



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.

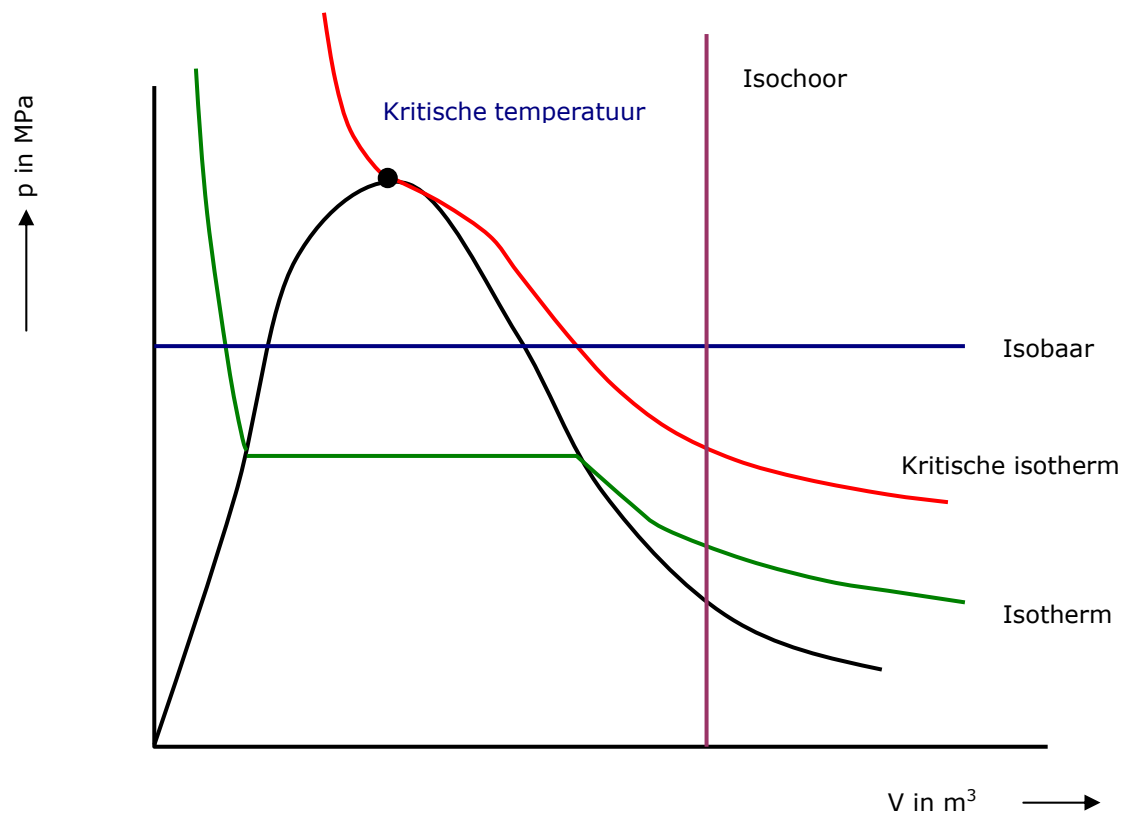
1. Compressor
2. Condensor
3. Expansieventiel
4. Verdampers

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

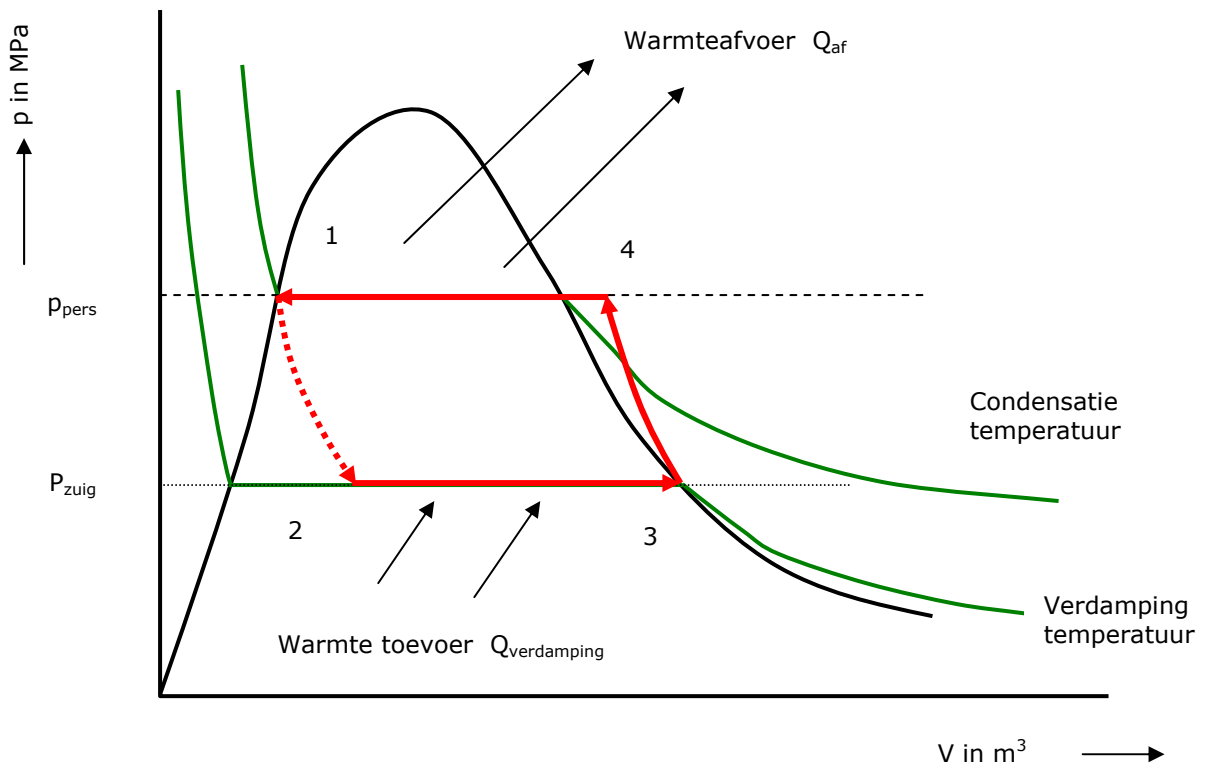
Vervolgens is op afbeelding 8 het werkelijk koelproces weergegeven, merk op dat dit een links draaiend proces is, het kost arbeid.



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.

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

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

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

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

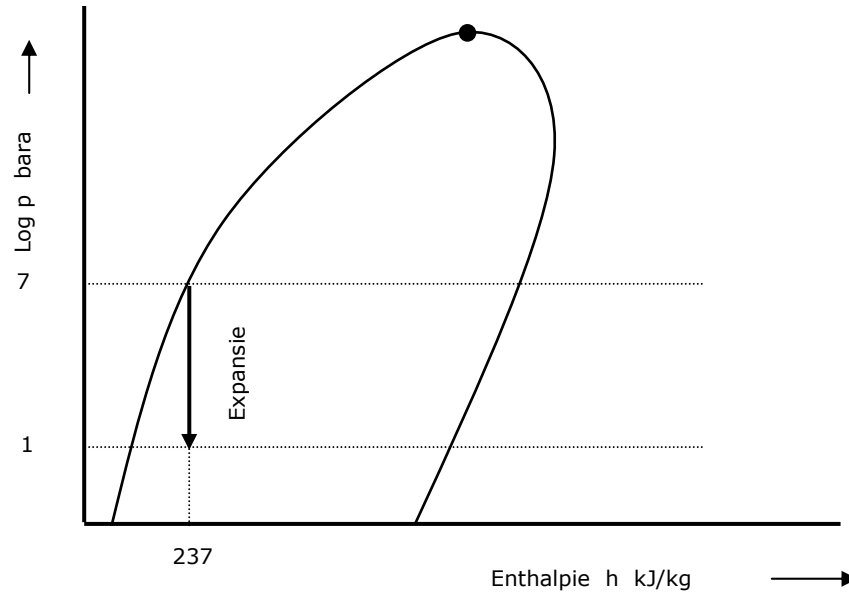
Neem aan dat $\frac{Q_{kw}}{Q_v}$ bijvoorbeeld 1,5 is:

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

Leveringsfactor = 2

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

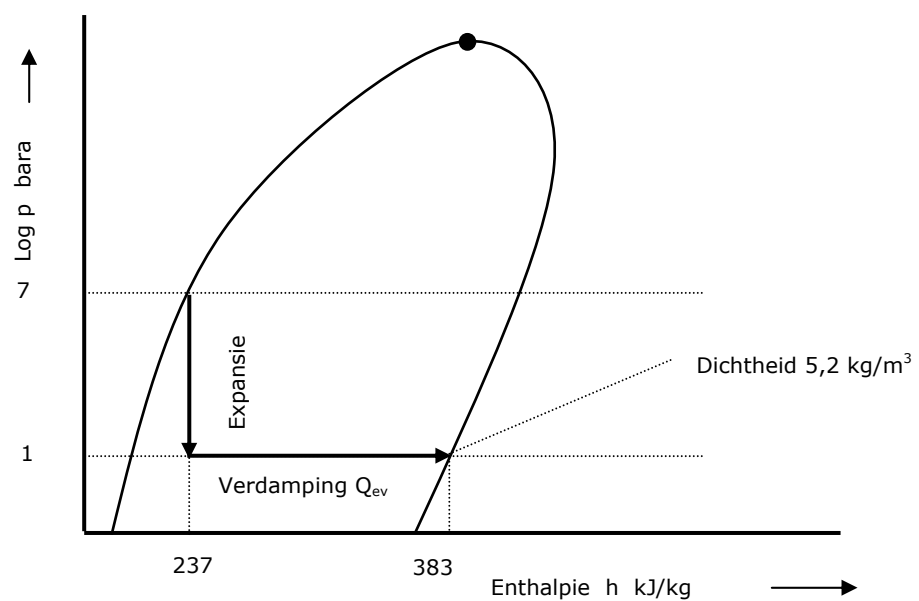
1.2.3 Expansie



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.

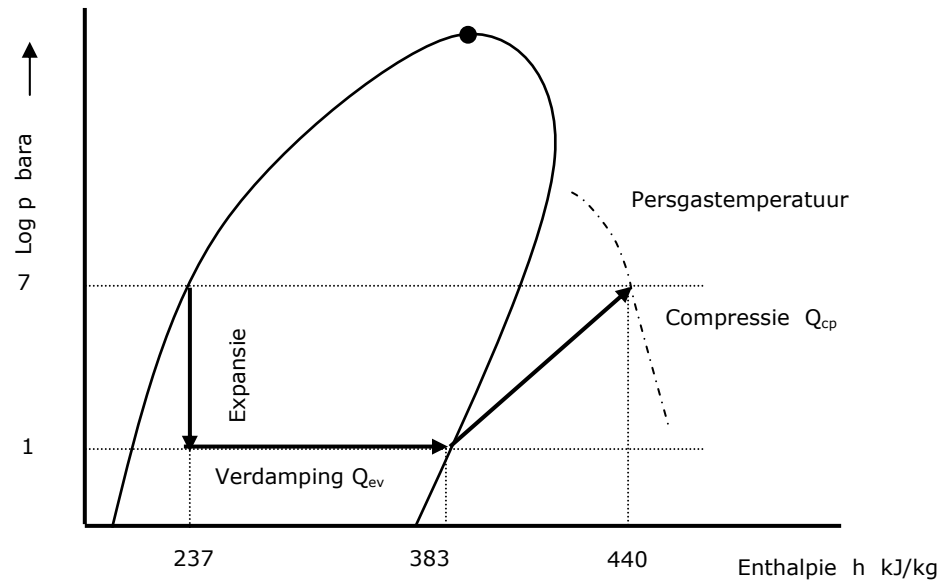
1.2.4 Verdamping



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

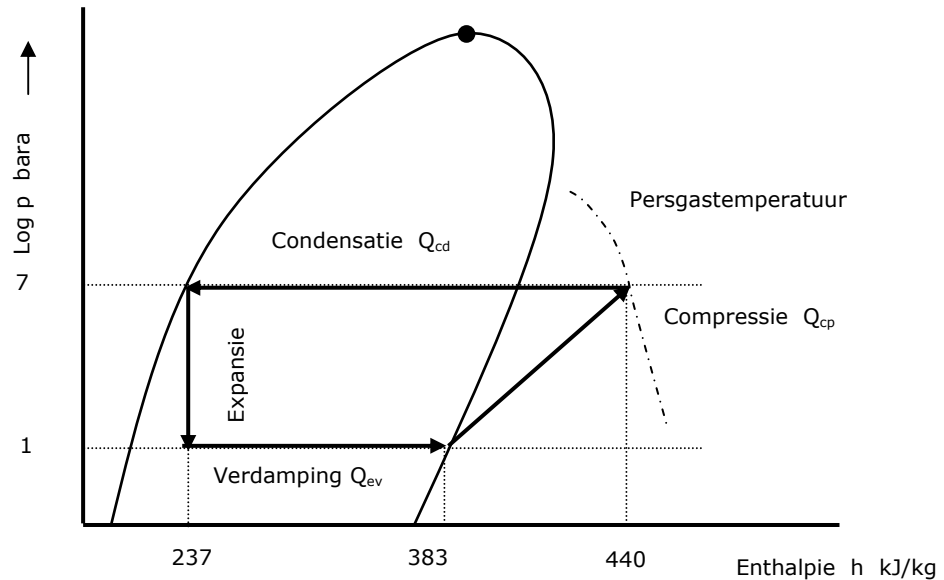


Afbeelding 11. Compressie.

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 warmtepomp is de definitie:

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