

Deel 1. Het Mollierdiagram

Het Mollierdiagram in theorie en praktijk

Samenstelling:

P. G. H. Uges

Inleiding

Door het gebruik van natuurlijke koudemiddelen staat nu ook water (R718) als koudemiddel in de belangstelling.

Het gebruik van de direct en indirect werkende *adiabatische koeling* en recentelijk vooral de indirect werkende systemen zoals *diabatische koeling*, dauwpuntkoeling al of niet uitgevoerd als *statische koeling*, vragen om kennis van het MOLLIERDIAGRAM.

Aan deze publicatie werkten mee :

H. J. L. KOUWENHOVEN (Frigidarium); www.frigidarium.nl

H. T. HUIZINGA (Heat Transfer Holland); www.hth-hth.nl

Ir. N. R. BOOTSVELD (TNO); www.tno.nl

Ir. M. JANSSEN (Re/gent); www.re-gent.nl

P. G. H. UGES (StatiqCooling BV); www.gekoeldventileren.nl

Onderwerpen als het mengen van verschillende luchthoeveelheden en het verband tussen absolute vocht en de waterdampspanning worden hier niet behandeld.

De opbouw van het Mollierdiagram

De toestand van het lucht-waterdampmengsel werd het eerst door Mollier in diagramvorm weergegeven. In Amerika komen wel andere diagramvormen voor, maar wij zullen hier ons beperken tot het Mollierdiagram.

In dit diagram kunnen praktisch alle toestandsveranderingen bij de luchtbehandeling worden aangegeven.

Als we over lucht en waterdamp spreken (vochtige lucht), bedoelen we: droge lucht en waterdamp, zijnde de twee gasen die als mengsel bestaan.

Verder beschouwen we steeds de hoeveelheid waterdamp die in 1 kg droge lucht aanwezig is en noemen die hoeveelheid x ; de hoeveelheden bedragen dikwijls slechts 10 of 20 gram, dus 0,01 of 0,02 kg.

Psychrometrie

De totale enthalpie van een lucht-dampmengsel is als volgt samengesteld :

- voelbare warmte van de droge lucht:
 $h_1 = 1.t \text{ kJ/kg}$
We stellen dat de enthalpie van droge lucht bij $0^\circ\text{C} = 0 \text{ kJ/kg}$ en dat de soortelijke warmte van droge lucht 1 kJ/kg bedraagt.
- latente warmte van de waterdamp:
 $h_2 = 2.500.x \text{ kJ/kg}$
De verdampingswarmte van water bij $0^\circ\text{C} = 2500 \text{ kJ/kg}$.
- voelbare warmte van de waterdamp:
 $h_3 = 1,926.x.t \text{ kJ/kg}$
De soortelijke warmte van waterdamp is $1,926 \text{ kJ/kgK}$

De totale enthalpie van het lucht-dampmengsel is derhalve :

Definities

Relatieve vochtigheid

Zodra lucht bij een gegeven dampdruk niet meer vocht op kan nemen noemen wij die verzadigd. Is die druk echter lager dan de begindruk (of de hoeveelheid vocht geringer) dan spreekt men van onverzadigde lucht.

De verhouding van de werkelijke druk tot de verzadigingsdruk, uitgedrukt in %, noemt men de relatieve vochtigheid (RV).

$$RV = pd / pd_{\text{verz}}$$

$$X = x / x_{\text{max}} \cdot 100 \%$$

Absolute vochtigheid

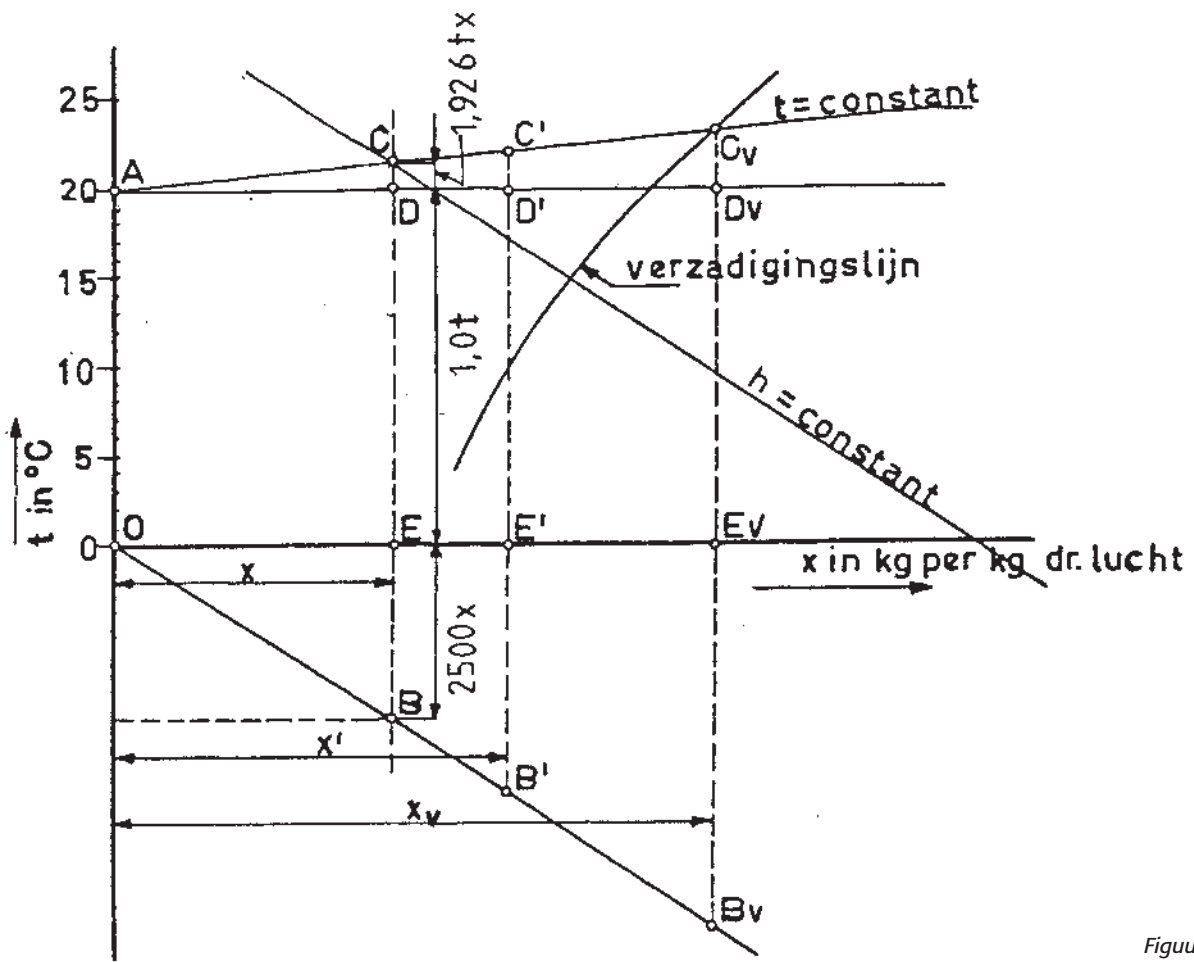
De hoeveelheid vocht die in de lucht aanwezig is in absolute zin aangeven. Deze wordt uitgedrukt in gram vocht per kg droge lucht.

Dauwpunttemperatuur

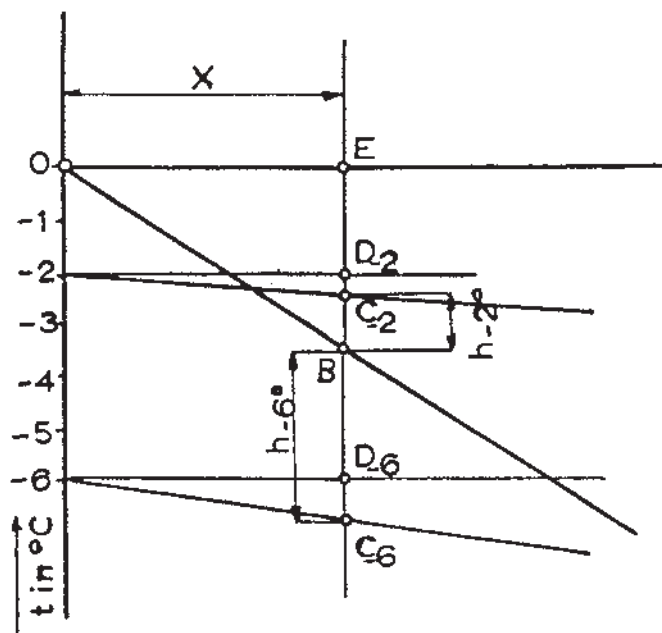
Als een waterdamp-luchtmengsel bij constante druk wordt gekoeld, wordt de temperatuur waarbij de damp verzadigd is, de dauwpunttemperatuur genoemd. Het is het punt waarbij bij verdere afkoeling condensatie op zal treden.

Natte en droge bol

De natteboltemperatuur van vochtige lucht wordt gemeten met een gewone thermometer, waarbij om de voeler een kousje van katoen is aangebracht, dat permanent vochtig wordt gehouden met gedestilleerd (of gedemineraliseerd) water. Indien de lucht niet volledig is verzadigd zal rondom de voeler



Figuur 1



Figuur 2

$h = h_1 + h_2 + h_3 =$
 $= 1,0 \cdot t + 2500 \cdot x + 1,926 \cdot x \cdot t$ kJ/kg
 droge lucht.

Mollier heeft dit alles weer gegeven in een diagram (zie figuur 1).

In het Mollierdigram (zie figuur 1) wordt verticaal de temperatuur-as uitgezet in °C. In het punt 0 wordt de horizontale as uitgezet, die de x in kg of gr/kg droge lucht aangeeft. Wanneer lucht geen vocht bevat, is $x = 0$, en stelt hier de verticale temperatuur-as droge lucht voor. Wordt hier op de h aangegeven, dan is dus de waarde $1,0 \cdot t$. Dit kan eenvoudig worden gedaan door bijvoorbeeld te stellen dat de afstand $0-20$ °C tevens voorstelt $1 \times 20 = 20$ kJ en over het algemeen $h = 0 - t = 1,0 \cdot t$.

Als voorbeeld nemen we nu lucht van 20 °C met een hoeveelheid vocht van x kg/kg droge lucht. We trekken op de afstand x de verticale lijn door E en zetten $ED = 0-20$ °C = OA af. ED stelt dan weer voor $1,0 \times 20 = 20$ kJ. Nu gaan we de beide termen $2.500 \cdot x$ en $1,926 \cdot x \cdot t$ eveneens uitzetten.

Mollier doet het als volgt. Hij zet naar beneden uit de waarde $2.500 \cdot x$ kJ. Men kan deze uitrekenen. Is bijvoorbeeld $x = 4$ gr, dan is die waarde

$$2.500 \cdot 0,004 = 10 \text{ kJ.}$$

Dat kunnen we nu op de juiste schaal naar beneden uitzetten (EB).

De term $1,926 \cdot x \cdot t$ zet Mollier boven ED uit. Ook deze kunnen we uitrekenen. Deze is hier

$$1,926 \cdot 0,004 \cdot 20 = 0,154 \text{ kJ.}$$

De waarde is heel erg klein in verhouding tot de 20 kJ. Ter verduidelijking is de waarde sterk vergroot uitgezet als DC.

Wij zien nu de 3 waarden boven elkaar uitgezet zodat de afstand BC, de warmte-inhoud h van de vochtige lucht aanduidt, hier dus

$$0,154 + 20 + 10 = 30,154 \text{ kJ/kg.}$$

Stel nu eens dat de lucht niet x kg, maar x' kg vocht bevatte. We zetten dan de verticale lijn in E'. Daar duidt E'D' weer de $1,0 \cdot t$ aan. E'B'(x') en C'D'(x't) worden nu in dezelfde verhouding groter als waarin x toeneemt. Het punt B' ligt dan op een lijn getrokken door OB.

$$EB : E'B' = OE : O'E' = x : x',$$

zodat dus $E'B' = 2500 \cdot x'$ is.

Hetzelfde geldt nu voor het punt C'. Hier is CD ($1,926 \cdot x \cdot t$) in gelijke verhouding toegenomen als x , zodat C' ligt op de

lijn AC. Nu stelt dus C'B' weer voor de warmte-inhoud h van de vochtige lucht van t °C en x' kg vocht.

Zo kunnen we doorgaan en telkens kunnen we bij iedere andere x bijvoorbeeld x'' een punt C'' aangeven, zodat de verticale afstand tot het overeenkomstige punt B'' op de lijn OB weer de h'' aangeeft. De lijn door AC noemen we een lijn van constante temperatuur (isotherm). In ieder punt van die lijn kunnen we een h afmeten.

We kunnen hetzelfde doen voor elke andere temperatuur en vinden dan telkens een t -lijn, die ongeveer de richting heeft van AC. Telkens is voor elke x weer de afstand van een punt van die t -lijn tot aan steeds dezelfde lijn OB de warmte-inhoud van de lucht van de betreffende t met de bepaalde X .

Trekken we bijvoorbeeld door C een lijn evenwijdig aan OB. Elk punt van die lijn stelt dan weer een bepaalde luchttoestand voor. Het bijzondere nu is, dat voor elke van de luchttoestanden de warmte-inhoud even groot is, omdat, als gevolg van het evenwijdig lopen van de lijn door C aan die door OB de afstand tot OB steeds even groot is. De lijn C duidt dus inderdaad luchttoestanden aan met een even grote warmte-inhoud. Het is dus een lijn $h = \text{constant}$. Maar dan zijn ook alle lijnen evenwijdig aan OB, lijnen van $h = \text{constant}$ (isenthalp).

In het gehele diagram trekt men een reeks evenwijdige lijnen waarvan de onderlinge afstanden gelijk zijn. Door deze reeks lijnen kunnen we nu heel gemakkelijk de h voor elke situatie aflezen.

Alvorens nu het gehele diagram te gaan behandelen, merken we nog op, dat, zoals bekend, bij elke temperatuur hoogstens een bepaalde maximum hoeveelheid vocht aanwezig kan zijn. Dan hebben we immers de verzadigings-toestand en spreken we van x_v (zie fig. 1.). Daarbij vinden we dan de punten C_v, D_v, E_v en B_v, waarbij dus C_v-E_v de warmte-inhoud bij het verzadigingspunt voorstelt.

Nog even een bijzonderheid van de t -lijnen. Hoe groter de t , des te groter wordt de waarde $1,926 \cdot x \cdot t$, dus de afstand CD. Hoe kleiner t , des te kleiner CD.

Bij $t = 0$ is de waarde

$$1,926 \cdot x \cdot t = 1,926 \cdot 0 \cdot x = 0;$$

dus voor de lijn $t = 0$ is CD altijd $= 0$; de lijn loopt dus zuiver horizontaal.

Is t negatief, dan wordt ook $1,0 \cdot t$ negatief

voortdurend water verdampen. De voor de verdamping benodigde warmte wordt aan de voeler onttrokken, waardoor deze in temperatuur daalt. De afgelezen waarde wordt de natteboltemperatuur genoemd.

In het Engels spreekt men van 'Wet Bulb' (natte bol) en 'Dry Bulb' (droge bol) of wel W.B. en D.B.-temperatuur

De temperatuur zal dus lager worden omdat de lucht zelf de benodigde warmte levert voor zowel het verdampen van het water als het verwarmen van de waterdamp. Dit geldt totdat de lucht verzadigd is en geen water meer kan verdampen. Omdat de warmte aan de lucht wordt onttrokken is hier dan sprake van een adiabatisch proces met als eindtemperatuur de natteboltemperatuur. Aan de hand van de grootte van het verschil der aanwijzingen van natte en droge thermometer kan men de RV bepalen.

Als in een speciale behuizing 2 thermometers worden opgesteld, waarvan er een is voorzien van een vochtig kousje, spreken we van een psychrometer, ook wel natte-/drogebolthermometer genoemd. Door lucht langs beide thermometers te laten stromen kan gelijktijdig de droge- en natteboltemperatuur worden bepaald.

Voelbare en latente warmte

De enthalpie van het lucht-waterdampmengsel is opgebouwd uit latente en voelbare warmte.

De *voelbare warmte* is de warmte die nodig is, of vrijkomt bij het verwarmen en koelen van lucht en waterdamp zonder vochtafname of vochttoename. Men noemt de voelbare warmte (VW), in het Engels: sensible heat (SH).

De *latente warmte* vertegenwoordigt de verdampingswarmte van waterdamp.

Bij vochtonttrekking wordt de waterdamp uit de lucht bijvoorbeeld op een koeler neergeslagen (condensatie) zonder dat de temperatuur van het gevormde water verandert. Dat is de verdampingswarmte, die een latente (verbod-

en ook CD; DC wordt dus naar beneden gezet. In fig. 2 wordt een toestand beneden 0 °C weergegeven.

Ook hier is de CB weer de warmte-inhoud. Die is hier voor -2 °C nog groter dan 0 kJ, dus positief, want $h - 2$ ligt boven de lijn OB ($h = 0$). Bij -6 °C is de h negatief want BC ligt onder OB

($h = 0$). Let goed op hoe in deze figuur de h wordt gevonden. Omdat ED en DG negatief zijn worden ze van EB afgetrokken.

De t -lijnen hebben een zeer flauwe waaivorm, waarbij de lijn $t = 0$ horizontaal is, de lijnen boven 0 °C naar rechts naar boven, de lijnen beneden de 0 °C naar rechts naar beneden lopen.

Soortelijk volume

In sommige uitgaven van het Mollier-diagram komen de lijnen voor van constant soortelijk volume in m³/kg. In andere uitgaven, worden lijnen van Constante dichtheid aangegeven in kg/m³.

Attentie :

- de dichtheid van droge lucht van 20 °C is 1,205 kg/m³;
- de dichtheid van verzadigde lucht van 20 °C is 1,195 kg/m³ en dus kleiner.

Nattebollijnen

(een adiabatisch proces)

De nattebollijnen zijn gebaseerd op de zogenaamde adiabatische verzadiging. Een adiabatisch proces, zoals hier bedoeld, is een proces waarbij geen uitwisseling van warmte met de omgeving plaats vindt.

Zoals uit het diagram blijkt wijken de nattebollijnen in de richting weinig af van de $h = \text{constant}$ -lijnen.

Voor de richting worden de $h = \text{constant}$ -lijnen dan ook wel gebruikt. De gemaakte fout is klein.

In het Mollierdiagram van figuur 3 staan als voorbeeld een aantal toestandsveranderingen met vochtige lucht weergegeven

Verwarmen (3 in fig. 3.)

In het Mollierdiagram wordt verwarmen weergegeven door een verticale lijn. Omdat tijdens verwarmen de vochtinhoud (gr/kg) niet wijzigt, loopt deze volgens de lijn van constant blijvend absoluut vochtgehalte.

Uit het diagram blijkt dat tijdens het verwarmen, de Relatieve Vochtigheid (RV) sterk daalt.

Bevochtigen met water of stoom (4 en 5 in fig. 3.)

Bij bevochtigen speelt de adiabatische verzadiging een belangrijke rol.

Stel dat we 1 kg droge lucht hebben van t °C en dat we daar aan X gr water van 0 °C toevoegen. 1 kg droge lucht van t °C heeft als enthalpie :

$$1 \cdot t \text{ kJ} \cdot X \text{ gr.}$$

Water van 0 °C heeft als warmte-inhoud $X \cdot 0 = 0$ kJ; immers de warmte-inhoud van vloeistof van 0 °C is per definitie 0. De eindtoestand na de menging zal dus nog steeds $1 \cdot t$ zijn. Echter de X gr water is verdampt, waarvoor warmte aan de lucht is onttrokken. Men verkrijgt dus een eindtoestand waarbij we vochtige lucht hebben van lagere temperatuur dan de droge lucht.

Verwarmen en tegelijk bevochtigen

Neemt zowel de temperatuur als de hoeveelheid vocht toe dan wordt dat weergegeven bij 8 in fig 3.

Ontvochtiging (6 en 7 in fig.3)

Ontvochtiging treedt op zodra de oppervlakte temperatuur van de koeler lager is dan het dauwpunt van de er langs stromende lucht. Op de horizontale as van het Mollierdiagram kan de mate van ontvochtiging (X) worden afgelezen en wordt weergegeven door het verschil met punt 6.

Wil men niet ontvochtigen dan zal de koelertemperatuur boven het Dauwpunt moeten liggen.

Bij installaties werkend volgens het DX-systeem is zo goed als altijd sprake van ontvochtiging, omdat de oppervlaketemperatuur van de verdamper onder het dauwpunt van de lucht ligt. Werkt men met water als koudedragers dan is het regeltechnisch zeer goed mogelijk de oppervlakte temperatuur boven die van het Dauwpunt te handhaven.

Voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld Plafondkoeling en Dauwpuntkoeling. Drogging met een absorberend wordt weergegeven door de lijn naar punt 7.

Toepassingsvoorbeelden

- een lagere absolute vochtigheid (voorbeeld: airconditioning werkend met een direct expansiesysteem [DX] systeem);
- een hogere absolute vochtigheid (voorbeeld: direct werkende adiabatische koeling, waarbij het vocht in de te conditioneren ruimte terecht komt);

gen) warmte is (LW), in het Engels latent heat (LH).

Uiteindelijk moet echter de koeler alle warmte afvoeren die men wil, zodat de totale warmte (TW) gelijk is aan de som van de voelbare en latente warmte: $TW = VW + LW$. Dit met de keuze: met ontvochtiging, met bevochtiging of juist zonder ontvochtiging ($LW = \text{dan } 0$).

Bij de koelcapaciteitsberekening voor een installaties moet men dus altijd een onderscheid maken tussen het koelen van de lucht (voelbare warmte) en het afscheiden van vocht (latente warmte).

Gebruikte symbolen en eenheden

- x = kg waterdamp per kg droge lucht
- t = temperatuur in °C
- h = warmte-inhoud of enthalpie in kJ/kg
- c_p = soortelijke warmte bij constante druk in kJ/kg.K
- r = verdampingswarmte van het water in kJ/kg.

Index l duidt op lucht

(C_{pl} = s.w. van lucht)

Index w duidt op waterdamp

(h_w = warmte-inhoud waterdamp)

Index v duidt op verzadigings-toestand

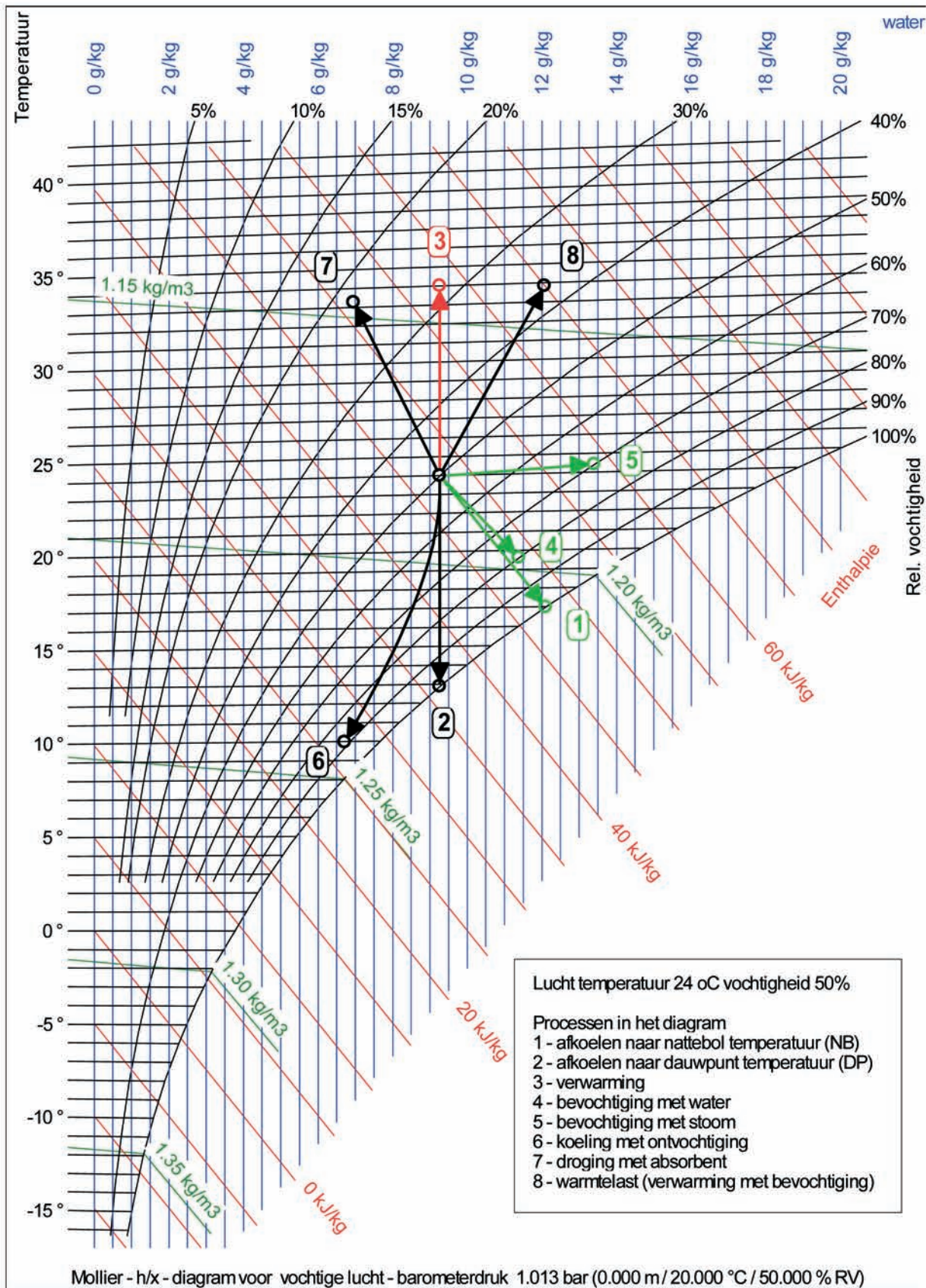
(t_v = verzadigingstemperatuur)

Er wordt uitgegaan van een barometerdruk van 1.013 bar

- met een *gelijkblijvend* absoluut vochtgehalte (voorbeeld: indirect werkende dauwpuntkoeling);
- *mengvormen* met afzonderlijke koeling van de luchtverversing (voelbaar en latent) en bijvoorbeeld plafondkoeling voor het koelen van de voelbare warmte in de ruimte.



(wordt vervolgd)



Figuur 3