

**Post-HBO opleiding Bouwfysica**

Mollier

**Docent: ing. A.M. de Vries**  
**Schrijver: ing. C.G.Dingemans**

# Inhoudsopgave

<b>1.</b>	<b>Vochtige lucht</b> .....	3
2.1	Het watergehalte van vochtige lucht .....	4
2.2	Absolute en relatieve vochtigheid .....	6
<b>2.</b>	<b>De specifieke enthalpie van vochtige lucht.</b> .....	7
<b>4</b>	<b>Het h,x diagram van vochtige lucht.</b> .....	9
4.1	Inleiding. ....	9
4.2	<b>Het diagram voor vochtige lucht.</b> .....	10
4.2.1	Inleiding .....	10
4.2.2	Het Mollier-diagram .....	10
4.2.3	De lijnen van constante temperatuur .....	11
4.2.4	De verzadigingslijn .....	12
4.2.5	De lijnen van constante relatieve vochtigheid .....	12
4.2.6	De lijnen van constante soortelijke massa, .....	12
4.2.11	De randschaal $dh/dx$ .....	13
4.2.12	Randschaal VWF .....	14
4.3	De droge- en natte-boltemperatuur .....	14
4.4	Voelbare warmte en latente warmte. ....	15
4.5	Latente warmte .....	15

## Inleiding

Processen met vochtige lucht spelen een zeer grote rol in de meteorologie, droogtechnieken en de klimaattechniek. Dit laatste onderwerp wordt in dit dictaatdeel behandeld.

De ons omringende lucht heeft een zeker vochtgehalte of waterdamp gehalte. Dit vochtgehalte willen wij aanpassen aan onze behaaglijkheidscriteria. Om luchtbehandelingprocessen te beschrijven wordt gebruik gemaakt van toestandsdiagram voor vochtige lucht oftewel het h,x-diagram. Dit diagram wordt toegeschreven aan de natuurkundige Mollier, zodat het ook wel Mollier-diagram genoemd wordt. Dit kan echter tot verwarring leiden omdat Mollier meerdere diagrammen o.a. voor stoom gemaakt heeft.

### 1. Vochtige lucht

#### Vochtige lucht is een mengsel van drogelucht en waterdamp

Volgens de wet van Dalton geldt voor een gasmengsel met een bepaald volume dat de druk van het mengsel gelijk is aan de som van de partiële drukken, die ieder van de samenstellende gasen op dat volume uitoefenen. Voor een mengsel van droge lucht en waterdamp geldt dus:

$$p = p_{\text{lucht}} + p_{\text{waterdamp}}$$

Hierin is  $p$  de totale druk, b.v. de atmosferische druk.

De droge lucht kan als een ideaal gas beschouwd worden zolang zijn partiële druk niet hoger is dan 10 a 15 bar. De partiële druk van waterdamp wordt door zijn verzadigingsdruk begrensd, zie fig. 2.1

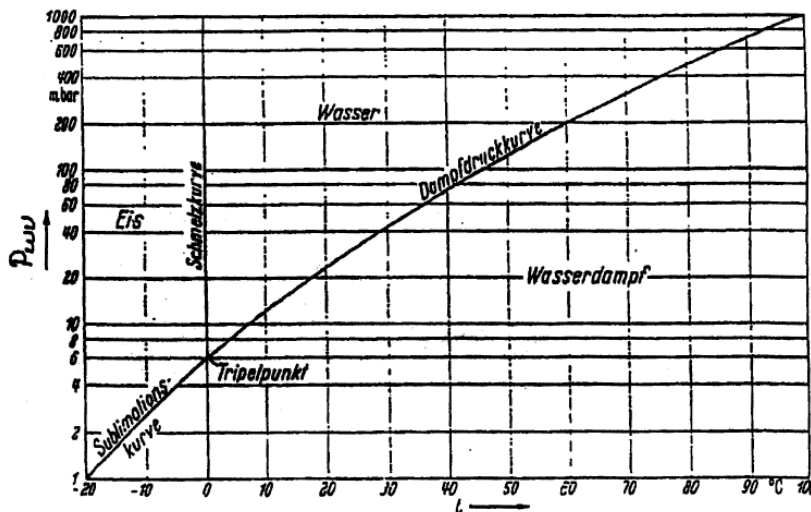


Fig. 2.1  
 $p, T$ -diagram van water

Uit de voorgaande figuur blijkt dat beneden de 50°C de verzadigingsdruk van waterdamp zeer klein is t.o.v. de atmosferische druk. Zodoende kan ook waterdamp als een ideaal gas worden beschouwd.

Het tripelpunt van water bedraagt ca.  $+0,01^{\circ}\text{C}$ . Bij de condensatie van waterdamp onder deze temperatuur vormt zich ijs of ijsnevel. De verzadigingsdruk van water volgt dan de sublimatiecurve.

Men kan bij vochtige lucht drie toestanden onderscheiden:

- Onverzadigde vochtige lucht met  $p_w(T) \leq p_{wv}(T)$ . Deze bevat water in de vorm van oververhitte damp.
- Verzadigde vochtige lucht met vloeibaar condensaat. ( $T > 0,01^{\circ}\text{C}$ ). Deze vorm bevat verzadigde waterdamp met  $p_w = p_{wv}$  en water in de vorm van nevel of vloeibare neerslag
- Verzadigde vochtige lucht met vast condensaat. ( $T < 0,01^{\circ}\text{C}$ ). Deze vorm bevat naast waterdamp ook ijs, meestal in de vorm van rijp of ijsnevel.

## 2.1 Het watergehalte van vochtige lucht

Het watergehalte  $x$  van vochtige lucht is als volgt gedefinieerd:

$$x = \frac{m_w}{m_l}$$

Hierin is  $m_w$  de massa van het water en  $m_l$  de massa van de droge lucht. Het watergehalte  $x$  is dimensieloos. Het watergehalte  $x$  kan waarden aannemen tussen  $x = 0$  (droge lucht) en  $x \rightarrow \infty$  (zuiver water of zuivere waterdamp.) In de praktijk treden meestal kleine waarden van  $x$  op (soms tot  $x = 0,2$ )

De toestand van vochtige lucht is door drie toestandsgrontheden te karakteriseren, namelijk

- Temperatuur ( $T$ )
- Totale druk ( $p$ )
- Watergehalte ( $x$ )

Zolang de partiële druk  $p_w$  van de waterdamp kleiner is dan de verzadigde dampdruk  $p_{wv}$  bij de gegeven temperatuur van de vochtige lucht, het water is dan als oververhitte damp aanwezig, is het mogelijk de partiële drukken van waterdamp en droge lucht volgens de toestandsvergelijking voor ideale gassen te berekenen

$$p_w = m_w R_w \frac{T}{V}$$

$$p_l = m_l R_l \frac{T}{V}$$

$T$  en  $V$  zijn hierin de temperatuur en volume van de vochtige lucht.

Uit de bovenstaande vergelijkingen is het watergehalte  $x$  af te leiden:

$$x = \frac{m_w}{m_l} = \frac{R_l P_w}{R_w P_l} = \frac{M_w P_w}{M_l P_l} = 0,622 \frac{P_w}{P_l}$$

In deze vergelijking zijn de molaire massa's  $M_w = 18,016 \text{ kg/kmol}$  en  $M_l = 28,96 \text{ kg/kmol}$ .

Voor de partiële druk van de droge lucht geldt:

$$p_l = p - p_w$$

Hieruit volgt het watergehalte  $x$ :

$$x = 0,622 \frac{p_w}{p - p_w}$$

De partiële waterdampdruk is volgens de onderstaande vergelijking te berekenen.

$$x = \frac{p_x}{0,622 + x}$$

De samenstelling van de onverzadigde vochtige lucht is dus op alternatieve wijze door het waterdampgehalte  $x$  of de partiële druk  $p_w$  te beschrijven.

Bereikt de partiële druk  $p_w$  van de waterdamp een bij de gegeven temperatuur behorende verzadigingsdruk  $p_{wv}$  dan raakt de lucht verzadigd. Het waterdampgehalte van de verzadigde lucht  $x_v$  verkrijgen we uit de bovenstaande vergelijking door voor  $p_w = p_{wv}$  in te vullen.

$$x_v = 0,622 \frac{p_{wv}}{p - p_{wv}} = x_v(T, p)$$

$x_v$  hangt slechts af van de temperatuur  $T$  en van de totale druk  $p$ . De waarde van de verzadigde waterdampdruk is uitsluitend een functie van de temperatuur. In tabel 2.1 zijn de dampdrukken van verzadigde waterdamp  $p_{wv}$  gegeven als functie van de temperatuur.

Als het watergehalte  $x$  de bij de temperatuur behorende verzadigingswaarde  $x_v$  overschrijdt, dan is slechts de watermassa  $m_1 x_v$  als verzadigde damp aanwezig. De rest, namelijk  $m_1(x - x_v)$ , is als condensaat in de vochtige lucht aanwezig.

Als  $x > x_v$  is, blijft bij constante temperatuur de partiële druk van de waterdamp constant, ook als het watergehalte  $x$  verandert. De partiële druk  $p_w$  is dus niet geschikt om de samenstelling van de verzadigde lucht te beschrijven. Het is slechts een maat voor het wateraandeel in de lucht zolang deze onverzadigd is.

**Tabel 2.1** Verzadigde waterdampdruk  $p_{wv}$  [Pa] als functie van de temperatuur  $T$  [°C]

T	$p_{wv}$	T	$p_{wv}$	T	$p_{wv}$	T	$p_{wv}$	T	$p_{wv}$
0	611	10	1227	20	2337	30	4241	80	47360
2	706	12	1401	22	2642	40	7375	90	70110
4	813	14	1597	24	2982	50	12335	100	101325
6	934	16	1817	26	3360	60	19920		
8	1072	18	2062	28	3778	70	31160		

## 2.2 Absolute en relatieve vochtigheid

Het waterdampgehalte  $x$  van onverzadigde vochtige lucht kan ook door absolute vochtigheid van de lucht worden gekarakteriseerd, dit is met name in de meteorologie gebruikelijk. De absolute vochtigheid is gedefinieerd als de verhouding van de waterdampmassa  $m_w$  en het volume van de vochtige lucht  $V$  (= dichtheid van de waterdamp)

$$\rho_w = \frac{m_w}{V}$$

Het is ook mogelijk de absolute vochtigheid als de dichtheid van de waterdamp in de vochtige lucht te beschouwen. Voor de massa van de waterdamp geldt:

$$m_w = \frac{p_w V}{R_w T}$$

Hiermee is de eenvoudige relatie  $\rho_w = \frac{p_w}{R_w T}$  tussen absolute vochtigheid en de partiële druk van de waterdamp gekregen.

Bij iedere temperatuur is de absolute vochtigheid het grootste, als de vochtige lucht verzadigd is. Met  $p_w = p_{vw}$  volgt:

$$\rho_{vw} = \frac{p_{vw}}{R_w T}$$

Het quotiënt  $\varphi = \frac{\rho_w(T)}{\rho_{vw}(T)} = \frac{p_w(T)}{p_{vw}(T)}$  wordt de relatieve vochtigheid genoemd. Het is dus de

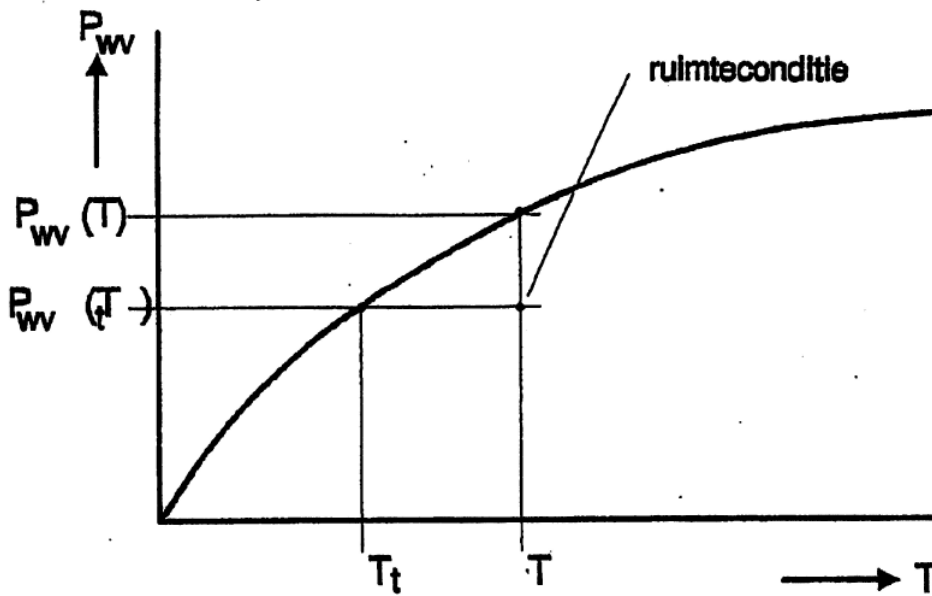
verhouding van de massa van het vocht in de lucht gedeeld door de massa van het vocht dat bij de gegeven temperatuur maximaal in de lucht aanwezig kan zijn. Voor onverzadigde lucht is  $\varphi < 1$ , voor juist verzadigde lucht geldt  $\varphi = 1$ . In het geval dat  $x > x_v$  verliest de relatieve vochtigheid zijn zin als maatstaf voor het watergehalte van vochtige lucht, doordat dan ook de partiële druk van de waterdamp  $p_v$  niet meer geschikt is om de samenstelling van de vochtige lucht te beschrijven.

Wordt onverzadigde lucht afgekoeld, dan blijven het waterdampgehalte  $x$  en de partiële druk  $p_v$  constant, totdat het douwpunt bereikt is. In deze toestand raakt de lucht verzadigd en de partiële druk  $p_w$  van de waterdamp wordt gelijk aan de bij die temperatuur  $T$  behorende verzadigingsdruk  $p_{vw}(T)$ .

Er was reeds een uitdrukking gedefinieerd voor de relatieve vochtigheid, deze luidt als volgt:

$$\varphi = \frac{p_w(T)}{p_{vw}(T)}$$

Deze uitdrukking wordt aan de hand van de volgende figuur toegelicht.



**Fig. 2.2 Weergave van de relatieve vochtigheid**

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat de dampdruk  $p_w$  bij temperatuur  $T$  gelijk is aan de verzadigingsdruk bij de douwpuntstemperatuur  $T_t$ . We kunnen de vergelijking voor  $\phi$  dan ook anders schrijven.

$$\phi = \frac{p_{vw}(T_t)}{p_{vw}(T)}$$

De kracht van de bovenstaande vergelijking is dat bij bepaalde condities ( $p, T$ ) het mogelijk is de douwpuntstemperatuur te meten. Met behulp van figuur 2.1 zijn dan  $p_{vw}(T)$  en  $p_{vw}(T_t)$  te bepalen en vervolgens is  $\phi$  te berekenen.

## 2. De specifieke enthalpie van vochtige lucht.

De enthalpie van vochtige lucht is samengesteld uit de enthalpieën van de componenten

$$H = m_l h_l + m_w h_w \quad [kJ]$$

Hierin zijn  $h_l$  de specifieke enthalpie van de droge lucht en  $h_w$  de specifieke enthalpie van het water. We betrekken de enthalpie van de vochtige lucht op de massa van de droge lucht dan kunnen we de specifiek enthalpie als volgt weergeven:

$$h_{l+x} = \frac{H}{m_l} = h_l + x h_w \quad [kJ / kg]$$

De enthalpieën van droge lucht van  $0^\circ\text{C}$  en van water van  $0^\circ\text{C}$  worden op "0" gesteld. De specifieke enthalpie van droge lucht is volgens een eenvoudige betrekking te berekenen, zolang

de specifieke warmtecapaciteit van de droge lucht niet of nauwelijks van de temperatuur af hangt. Dit is tot ca. 100°C het geval.

$$h_l = c_{pl}t = 1,006 * t \approx t \quad [kJ / kg]$$

Let op, in bovenstaande vergelijking is de temperatuur  $t$  in °C omdat bij 0°C de enthalpie gelijk is aan 0.

De berekening van  $h_w$  is minder eenvoudig. We moeten de drie gevallen onderscheiden die reeds in hoofdstuk 2 omschreven zijn. Deze gevallen zijn:

1. *Onverzadigde vochtige lucht:*

Het water is dampvormig: ( $x \leq x_v$ )

We beschouwen de oververhitte waterdamp als ideaal gas. Dit impliceert dat de enthalpie slechts van de temperatuur afhankelijk is en niet van de druk. Om waterdamp van  $t$  °C te verkrijgen moet warmte worden toegevoerd om:

- Water van 0°C te verdampen. De warmte die hier voor nodig is, is de verdampingswarmte. Deze bedraagt bij 0°C 2491 kJ/kg. (In andere literatuur 2500 kJ/kg.
- Waterdamp van 0°C te verwarmen tot  $t$  °C. De warmte die hier voor nodig is, is gelijk aan  $c_{pw}t$ .

Beschouwen we de specifieke warmtecapaciteit  $c_{pw}$  als constant, met  $c_{pw} = 1,88$  kJ/(kg.K), dan volgt hiermee voor de specifieke enthalpie van waterdamp:

$$h_w = r_o + c_{pw}t = 2491 + 1,88t$$

Uiteindelijk wordt de enthalpie van de onverzadigde vochtige lucht:

$$h_{l+x} = c_{pw}t + x(r_o + c_{pw}t)$$

2. *Verzadigde lucht met vloeibaar condensaat:*

$x > x_v, t > 0^\circ\text{C}$ .

De vochtige lucht bestaat uit droge lucht met een massa  $x_v m_l$  verzadigde waterdamp en een massa vloeibaar water gelijk aan  $(x - x_v) m_l$ . Voor de enthalpie geldt:

$$h_{l+x} = c_{pw}t + x_v(r_o + c_{pw}t) - (x - x_v)c_w t$$

Hierin is  $c_{ijs} = 2,05$  kJ/(kg.K) de warmtecapaciteit van het ijs.

3. *Verzadigde vochtige lucht met vast condensaat:*

$x > x_v, t < 0^\circ\text{C}$ .

De temperatuur is onder 0°C en de lucht bevat IJS. De specifieke enthalpie van ijs bij een temperatuur bij een  $t < 0^\circ\text{C}$  is de som van:

- De bij stolling afgevoerde stollingswarmte  $r_y = 333$  kJ/kg
- De warmte die afgevoerd moet worden om ijs van 0°C af te koelen tot  $t < 0^\circ\text{C}$ . Omdat het waterdampgehalte  $x_v$  is, is het ijsgehalte  $(x - x_v)$

In dit geval geldt voor de enthalpie van de verzadigde vochtige lucht:

$$h_{l+x} = c_{pw}t + x_v(r_o + c_{pw}t) - (x - x_v)(r_{ijs} - c_{ijs}t)$$

Hierin is  $c_{ijs} = 2,05$  kJ/(kg.K) de warmtecapaciteit van ijs.



## 4 Het h,x diagram van vochtige lucht.

### 4.1 Inleiding.

Om onder alle omstandigheden een voor een mens gunstig leef-werkklimaat te scheppen is het door de klimaatsveranderingen noodzakelijk luchtbehandeling toe te passen.

Deze behandeling varieert van een simpele kachel met of zonder thermostaat en ramen welke geopend kunnen worden tot hermetisch gesloten gebouwen met een computergestuurde klimaatbehandelingsinstallatie.

De temperatuur van het menselijk lichaam is ca. 37°C en het lichaam tracht deze temperatuur te handhaven door regeling van de warmteafvoer. Deze warmteafvoer vindt plaats door straling, convectie, geleiding en verdamping van vocht op de huid. De hoeveelheid warmte die een mens afstaat is ca. 120 Watt (in de vorm van warmteafgifte door bijv. straling daarnaast ook vocht bij uitademen en zweet) bij een omgevingstemperatuur van 20°C en is verder afhankelijk van de arbeidsprestatie.

Bij een temperatuur van 22°C en een luchtvochtigheid van 100% zeggen we dat het benauwd is. Deze situatie doet zich voor wanneer 25 mensen in een slecht geventileerde ruimte van 7 x 4m zitten. De oorzaak is dat het zweet op de huid niet verdampen kan omdat de lucht al verzadigd is met vocht. Evenzo voelt een mens zich niet prettig bij een temperatuur van 22°C en een luchtvochtigheid van 0%. Het zweet op de huid verdampt zo snel dat dit een kil gevoel geeft. Door proefnemingen is men erin geslaagd de gegevens van die luchtconditie te vinden (zie 1.3) waarbij een mens zich prettig voelt, zowel in rusttoestand als bij een zware arbeidsprestatie.

Tevens wordt luchtbehandeling toegepast voor industriële toepassingen.

Bijvoorbeeld een vochtig product, bijv. waspoeder kan gedroogd worden met hete lucht. Enkele mogelijke redenen kunnen zijn :

- \* gewichtsbesparing tijdens transport (kunstmest);
- \* strooibaar maken van een product (zeepoeder, zout);
- \* het bevorderen van de houdbaarheid (voedingsmiddelen).

Een ander voorbeeld is de koeltoren. Toegepast daar waar geen koelwater aanwezig is, of thermische vervuiling van het oppervlakte water voorkomen dient te worden, de koelwater voorziening weg kan vallen (te lage waterstand van een rivier) of de aanleg van een koelwaterleidingsysteem duur wordt. De lucht stroomt in tegenstroom met het water en neemt vocht op uit het koelwater. De verdampingswarmte wordt onttrokken uit het koelwater.

## 4.2 Het diagram voor vochtige lucht.

Er zijn diverse diagrammen ontworpen en in gebruik welke het verband tussen p, t, x en h beschrijven. De belangrijkste twee zijn:

- Het diagram van Willes H. Carrier (1911), wat in de U.S.A. gebruikt wordt (en steeds meer in Europa), die een t,x-diagram maakte.
- Het diagram van Richard Mollier (1923), wat voor klimaat behandeling op het vaste land in West-Europa wordt toegepast, die een h,x-diagram ontwierp.

Men spreekt van het "Mollier diagram voor vochtige lucht".

### 4.2.1 Inleiding

Men kan bewijzen dat in een gesloten systeem waarin zich een bepaalde hoeveelheid gas met onveranderlijke chemische samenstelling bevindt, dat dit systeem 2 graden van vrijheid heeft. Voorbeeld: het p,V-diagram en het T,s-diagram.

Het h,x-diagram geeft het verband aan tussen een mengsel van droge lucht en een veranderlijke hoeveelheid waterdamp, de zgn. vochtige lucht. Er is nu een derde vrijheidsgraad bijgekomen. Bijvoorbeeld: druk, temperatuur en het vochtgehalte. Wil men dit in een diagram zetten, dan zal dit een driedimensionaal "diagram" moeten zijn. Om dit probleem te

voorkomen kiest men één van de grootheden, de druk, constant. Het Mollier-diagram geldt daarom voor een druk van 1013 mbar  $\approx$  750 mmHg.

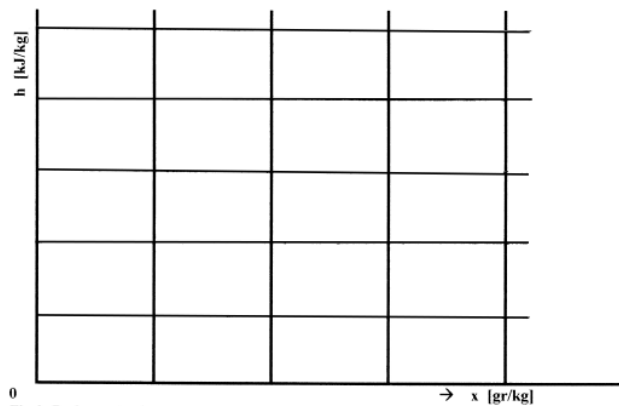


Fig 2 De h-x coördinaten.

### 4.2.2 Het Mollier-diagram

Als coördinaat assen heeft Mollier gekozen voor het watergehalte per kg droge lucht (x kg/kg) en de enthalpie van het damp-luchtmengsel per kg droge lucht (h kJ/kg). Als nulpunt voor het diagram wordt de enthalpie van 1 kg droge lucht van 0°C (droge lucht dwz. met "0" gram waterdamp) gekozen.

De enthalpie wordt bepaald met de formule:.

$$h = c_{l,t}t + x(r_o + c_{d,t}t) \quad [\text{kJ/kg}]$$

Voor alle waarden van x en t kan men nu de enthalpie berekenen. De formule kan ook geschreven worden als:

$$h_{l+x} = c_{pw}t + x(r_o + c_{pw}t) \quad \text{of:}$$

$$h = 2500 \cdot x + 1t + 1,9 \cdot t \cdot x$$

Note: Bij de behandeling van de specifieke

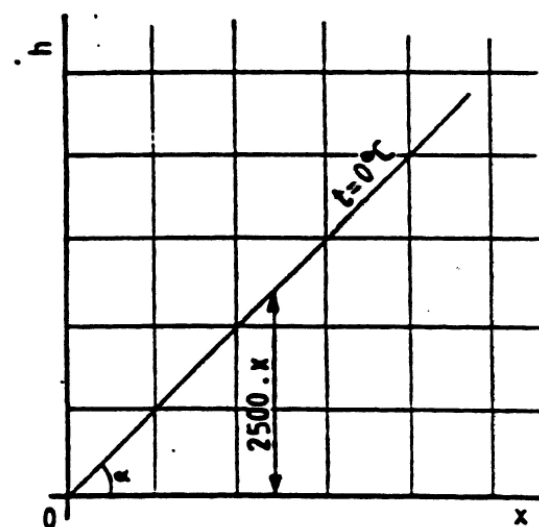


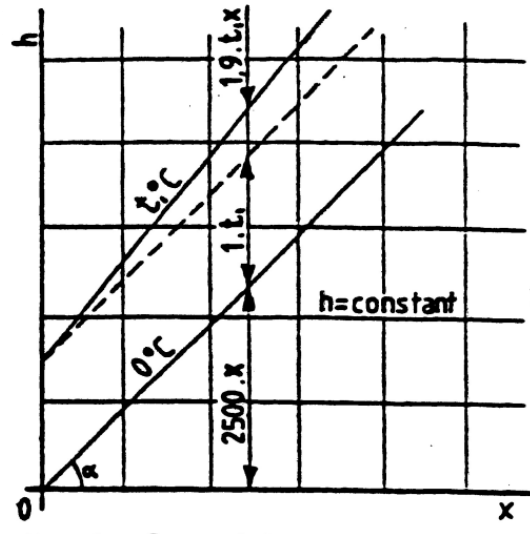
Fig. 3 De enthalpie voor t=0, maar ook de lijn t=0°C

enthalpie (hoofdstuk 3) is hier voor  $c_{pw}$  het getal 1,88 gebruikt en voor de  $r_0$  het getal 2491. Deze waarden zijn nauwkeuriger. Wij zullen in het vervolg de afgeronde waarden zoals in de voorgaande formule gebruikt verder toepassen.

Voor  $t = 0^\circ\text{C}$  kan voor elke waarde van  $x$  de enthalpie ( $h = 2500 \cdot x$ ) in het diagram uitgezet worden. Al deze punten liggen op een rechte lijn. Deze lijn van punten geeft óók de temperatuur  $t = 0^\circ\text{C}$  weer. Voor hoek  $\alpha$  geldt:  $\tan \alpha = dh/dx = 2500 \cdot x/x = 2500$ .  $\tan \alpha = \frac{dh}{dx} = \frac{2500 \cdot x}{x} = 2500$

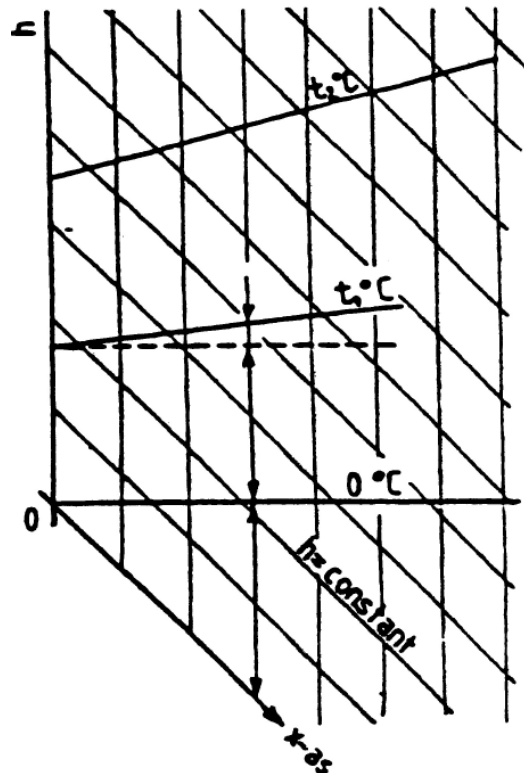
#### 4.2.3 De lijnen van constante temperatuur

Voor  $t = t_1^\circ\text{C}$  kan voor elke waarde van  $x$  de enthalpie ( $h = 2500 \cdot x + 1t + 1,9 \cdot t \cdot x$ ) in het diagram uitgezet worden. Ook al deze punten liggen op een rechte lijn. Deze lijn van punten geeft óók de temperatuur  $t_1^\circ\text{C}$  weer. Wat opvalt in het diagram is dat tengevolge van de term  $h = 2500 \cdot x + 1t + 1,9 \cdot t \cdot x$ , de lijnen van constante temperatuur niet evenwijdig lopen. Hoe te hoger de temperatuur des te steiler lopen de temperatuur lijnen.

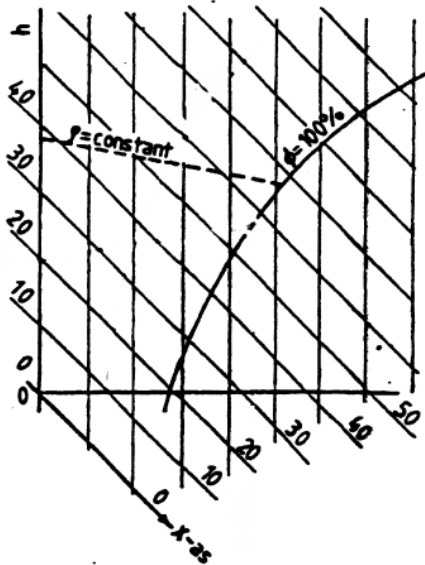


Voordat verder gegaan wordt met het ontwerpen van het diagram, wordt de vraag gesteld hoe gebruiksvriendelijk wordt het diagram. Het diagram moet geschikt zijn om processen in af te zetten. Deze processen beginnen en eindigen in een bepaald punt, hoe wordt dat punt bepaald en welke lijnen worden gebruikt om dit punt in het diagram te zetten.

Om de conditie van vochtige lucht, d.i. de plaats in het diagram te bepalen, worden de lijnen van constante temperatuur gebruikt. Deze lijnen lopen nu schuin terwijl het een stuk gemakkelijker wordt indien deze horizontaal zouden lopen. Mollier bedacht een oplossing, hij verdraaide de  $x$ -as over een hoek  $\alpha$  ( $\frac{dh}{dx} = 2500$ ) waardoor de lijn van  $t = 0^\circ\text{C}$  horizontaal gaat lopen, terwijl voor  $t > 0$  de lijnen van constante temperatuur "bijna" horizontaal lopen.



#### 4.2.4 De verzadigingslijn



De volgende stap is het bepalen van de lijn welke aangeeft wanneer een lucht-waterdampmengsel verzadigd is.

Met behulp van de formule:

$$x_v = 0,622 \frac{p_{vw}}{p - p_{vw}}$$

kan voor iedere temperatuur van een mengsel de daarbij behorende maximale hoeveelheid waterdamp bepaald worden.

#### 4.2.5 De lijnen van constante relatieve vochtigheid

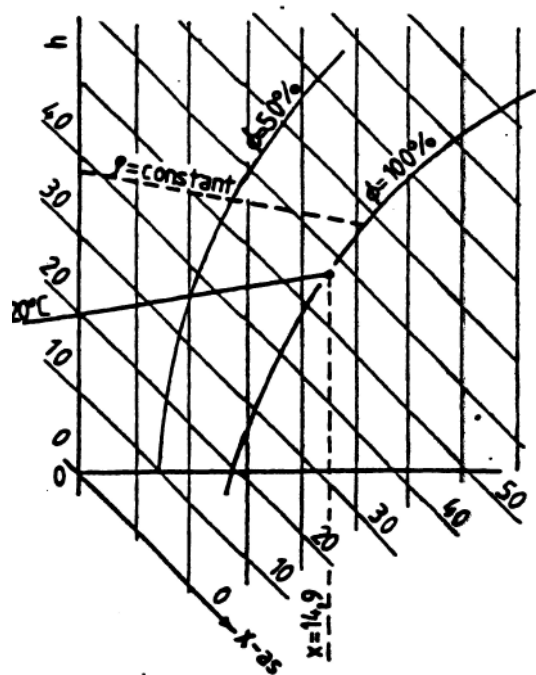
De lijnen waarvoor geldt  $\Phi = \text{constant}$  kunnen nu ook bepaald worden.

Voor elke waarde van  $x$ , kan bij een gegeven  $x_{v(t)}$  en een bepaalde temperatuur, de relatieve vochtigheid bepaald worden.

**Voorbeeld:** Bij 20°C vonden we  $x_v = 0,0149$

Bij  $x = 0,0074 (= 0,5 x_v)$  vinden we:

Conclusie: de lijn van  $\Phi = 0,50$  deelt de temperatuurlijnen bijna midden door.



#### 4.2.6 De lijnen van constante soortelijke massa,

**4.2.7 Aflezen van de x-waarde,** Om de grootte van  $x$  aan te geven wordt, in plaats van de  $x$ -as een horizontale lijn gebruikt waarop de  $x$ -waarden staan.

#### 4.2.8 Aflezen van de verzadigde dampspanning

In veel diagrammen is op de lijn van de x-waarden ook de dampspanning van water weergegeven. Daar waar de verzadigingslijn ( $\Phi = 100\%$ ) de lijn van constante temperatuur snijdt, vinden we de waarde van  $x_{\max}$ , hierbij hoort een verzadigde dampspanning. Zie het voorbeeld hiervoor.

#### 4.2.9 Aflezen van de enthalpie

Om de grootte van de enthalpie aan te geven, wordt een lijn gebruikt, buiten het "gebruiksgebied" van het diagram, welke loodrecht staat op de nu schuine lijnen van constante enthalpie.

#### 4.2.10 Aflezen van de temperatuur

Op de verticale as staat nog steeds de enthalpie, echter voor x is "0" geldt:  $h=0+1.t+0$

De getalgröte van h is gelijk aan die van t, dus  $|h|=|t|$ .

De verticale-as kan dan ook als temperatuur-as gebruikt worden.

#### 4.2.11 De randschaal dh/dx

In de meeste diagrammen die in omloop zijn is een zgn. randschaal aangebracht. Op de randschaal staat het quotiënt  $dh/dx$ . In het bijgaande voorbeeld zien we dat voor de x-as geldt  $dh/dx = 0$  (evenwijdig aan de  $h = \text{constant}$  lijnen) en voor de lijn  $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $dh/dx = 2500$ . Ten gevolge van de rotatie over hoek  $\alpha$  staat de lijn van  $t = 0^\circ\text{C}$  nu horizontaal en zet men bij de

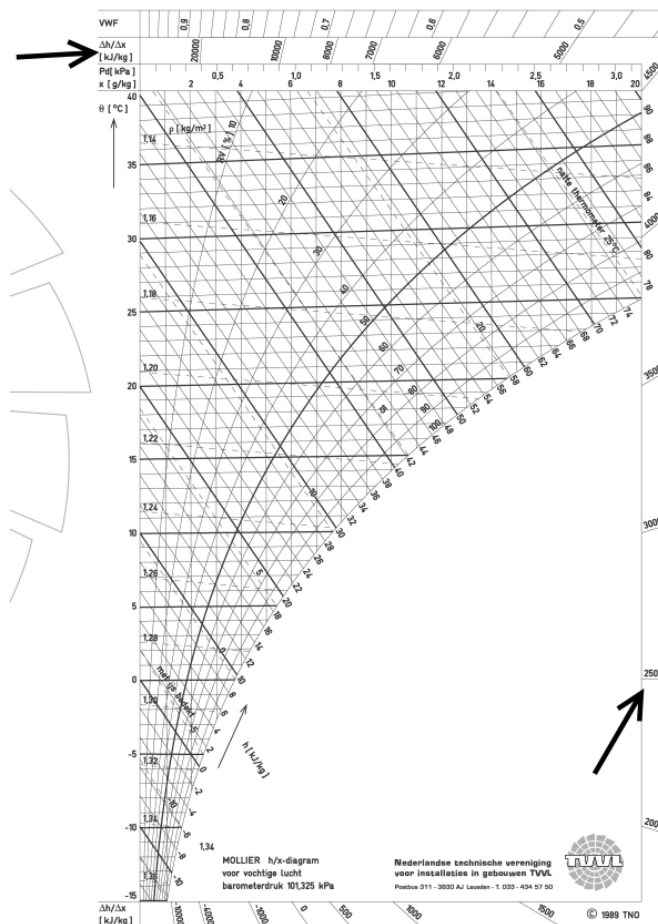
rechtterrand een horizontaal streepje met daarbij 2500.

Wat is nu de betekenis van de randschaal? Wanneer, bijvoorbeeld, in droge lucht van  $0^\circ\text{C}$  ( $h = 0$ )  $0,005\text{ kg}$  stoom met een enthalpie van  $3000\text{ kJ/kg}$  ingeblazen wordt, dan is de eind conditie van de lucht nu  $h = 3000 * 0,004 = 12\text{ kJ/kg}$  en  $x = 0,004 \Rightarrow 4\text{ gr/kg}$ .

Wanneer door de begin- en eindtoestand een rechte lijn getrokken wordt tot aan de rechterkantlijn, dan komt daar 3000 te staan.

Conclusie: wanneer in een willekeurig lucht- waterdampmengsel stoom met een enthalpie  $h=3200\text{ kJ/kg}$  wordt ingeblazen, dan verloopt het proces, de richting, volgens een lijn evenwijdig met de lijn door het 0-punt en 3200 op de randschaal.

Belangrijk is om te weten dat de lijn tussen het punt  $T=0$  en  $x=0$  en de waarde op de randschaal (in



bovenstaande voorbeeld 3200) alleen de “**richting**” aangeeft. Willen we vanuit een andere luchtconditie uit gaan dan zullen we in het diagram de lijn parallel aan zich zelf moeten verschuiven tot dat het gewenste punt wordt bereikt.

#### 4.2.12 Randschaal VWF

Een randschaal die niet op alle in omloop zijnde mollier diagrammen voor komt is de schaal met de “voelbare warmte factor”. Deze randschaal is een uitstekend hulpmiddel bij het bepalen van de gewenste inblaas condities van de lucht in een ruimte.

De VWF is de verhouding tussen de voelbare warmte (energie) en de totale warmte (energie) welke door een hoeveelheid lucht opgenomen moet worden.

In de volgende hoofdstukken (*gebruik van het diagram*) zal hier verder op ingegaan worden.

#### 4.3 De droge- en natte-boltemperatuur

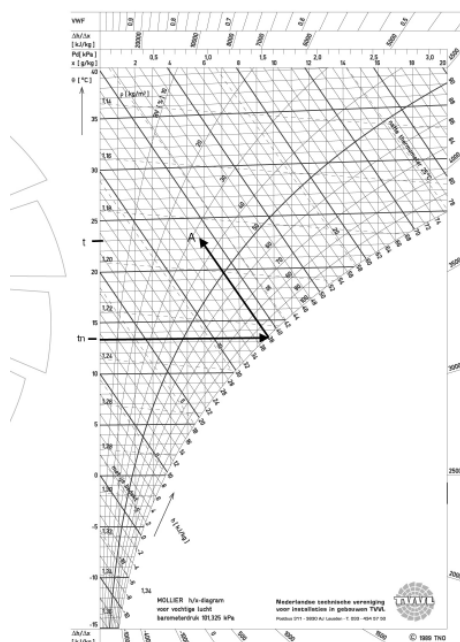
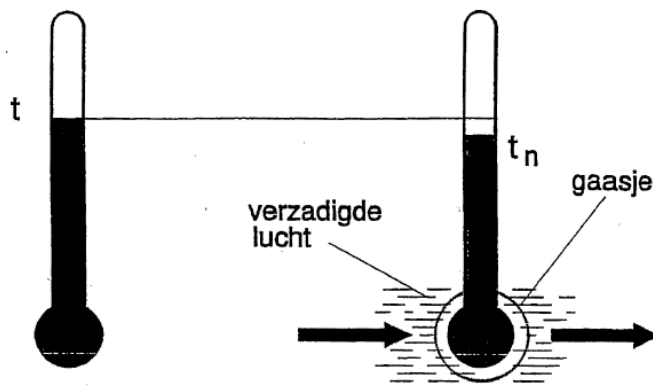
In de voorgaande tekst is het probleem aangehaald hoe bepaald wordt wat de toestand van de lucht is, d.w.z. welke temperatuur en hoe vochtig is de lucht.

Steeds wanneer hiervoor de temperatuur “t” ter sprake kwam, werd bedoeld de temperatuur die met een normale thermometer gemeten wordt, dit wordt ook wel de droge-boltemperatuur genoemd.

Om te begrijpen wat de natte-boltemperatuur voorstelt wordt eerst het volgende systeem besproken.

Aan het systeem wordt toegevoerd 1 kg droge lucht met een droge-boltemperatuur van  $t$  °C, vochtgehalte  $x_1$  Hieruit volgt de

enthalpie  $h_1$ . Deze lucht strijkt langs het kousje dat om de natte-boltermometer zit. Indien de lucht is niet verzadigd met waterdamp en zal de lucht vocht uit het kousje opnemen. In het kousje verdampt water. De hiervoor benodigde verdampingswarmte zal worden onttrokken aan het water in het kousje. Als gevolg hiervan zal de temperatuur dalen en zich na verloop van tijd een evenwichtstoestand instellen. De temperatuur die de thermometer met het kousje aanwijst noemt men de natte-boltemperatuur. De lucht die langs/door het kousje stroomt verlaat het systeem met een temperatuur  $t_n$ , waarbij  $x = x_v$  en  $h = h_2$ .



Aan het kousje wordt toegevoerd water met een temperatuur  $t_n$  en de massa is  $(x_v - x)$ .

De warmtebalans voor het systeem ziet er dan als volgt uit:

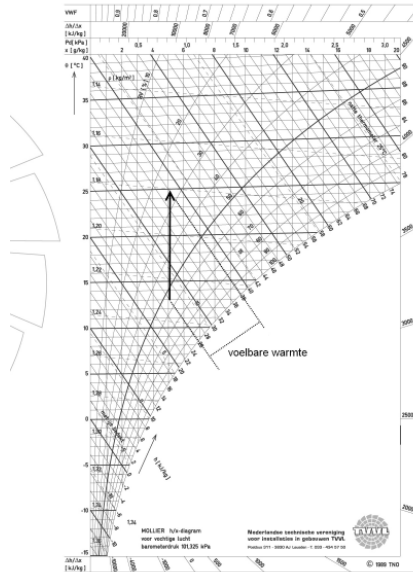
$$(x_v - x)(c_w \cdot t_n + r_0) = c_l(t - t_n)$$

Wanneer de term  $(x_v - x)c_w \cdot t_n$  verwaarloosd wordt, geldt dat:  $h_1 = h_2$ .

Voor het proces dat zich "over" de natte-bolthermometer heeft afgespeeld geldt dat de enthalpie constant blijft. Dit is een adiabatisch proces.

**Dit houdt in, dat daar waar  $t_n$  de verzadigingslijn snijdt, men via de lijn  $h = c$  naar de lijn van de droge boltemperatuur  $t$  gaat. Dit snijpunt bepaald de conditie van de lucht voor de natte bol. Zie punt A in diagram.**

#### 4.4 Voelbare warmte en latente warmte.



Als we in dit geval spreken over de “warmte” dan is dit theoretisch niet correct want we bedoelen de energie inhoud van de lucht.

Als we een hoeveelheid energie ( $\Delta h$ ) toevoeren of afvoeren aan een kg lucht dan zal een temperatuursstijging of daling daarvan het gevolg zijn.

Uit de voorgaande definities kunnen we dan opmaken dat de dan ontstane  $\Delta t$  gelijk is aan de  $\Delta h$  die toe of afgevoerd is. ( $c_1 = 1$ )

De hoeveelheid warmte (energie) die toe of afgevoerd is, heeft direct gevolgen voor de temperatuur (Kunnen we voelen). Dit noemen we dan ook de voelbare warmte.

$$\Delta h = c_l(t_2 - t_1) + c_w(x_2 - x_1)(t_2 - t_1) + (x_2 - x_1) \cdot r_0$$

Gaan we er van uit dat er geen vocht wordt toe of afgevoerd, dan wordt de term  $x_1 - x_2 = 0$

De enthalpie verandering wordt dan:

$$\Delta h = c_l(t_2 - t_1) = \text{voelbare warmte.}$$

#### 4.5 Latente warmte

Voeren we aan een kg lucht een hoeveelheid  $(x_1 - x_2)$  vocht toe, zonder dat daarbij de temperatuur zal veranderen ( $t_2 = t_1$ ) dan kunnen we stellen dat in de formule:

$$\Delta h = c_l(t_2 - t_1) + c_w(x_2 - x_1)(t_2 - t_1) + (x_2 - x_1) \cdot r_0$$

de eerste twee delen “0” worden en voor de  $\Delta h$  gesteld kan worden dat:

$$\Delta h = (x_2 - x_1) \cdot r_0$$

Aangezien dit niet leidt tot een temperatuursverhoging noemen we dit “**latente warmte**”

