

## Centrale installaties – Lucht – Globale- en Handberekeningen

Kenniskbank Bouwfysica

Auteurs: dr.ir. Peter van den Engel, Martine Verhoeven, ir. Leo de Ruijsscher, ir. John van der Vliet

### 1 Inleiding

Het Mollier-diagram voor vochtige lucht (figuur 1) geeft de samenhang weer tussen de absolute vochtigheid ( $x$ ) en de enthalpie ( $h$ ). Per definitie is de enthalpie (warmte-inhoud) van droge lucht bij  $0^\circ\text{C}$  gelijk aan  $0 \text{ kJ/kg}$ .

De enthalpie van vochtige lucht is:

$$h = c_{pl} \cdot \theta + c_{pw} \cdot x \cdot \theta + x \cdot r \quad \text{kJ/kg}$$

waarin:

- $c_{pl}$  = soortelijke warmte van lucht bij constante druk =  $1,007 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  bij  $20^\circ\text{C}$
- $c_{pw}$  = soortelijke warmte van waterdamp bij constante druk =  $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  bij  $20^\circ\text{C}$
- $r$  = verdampingswarmte van water =  $2454 \text{ kJ/kg}$  bij  $101325 \text{ Pa}$
- $x$  = absolute vochtigheid in  $\text{kg}$  water per  $\text{kg}$  lucht
- $\theta$  = droge luchttemperatuur ("droge bol") in  $^\circ\text{C}$

De absolute vochtigheid is:

$$x = 0,622 \cdot p_d / (B - p_d) \quad \text{kg/kg}$$

waarin:

- $p_d$  = partiele dampspanning van de waterdamp in  $\text{Pa}$
- $B$  = atmosferische druk in  $\text{Pa}$

De absolute vochtigheid ( $x$ ) is in het Mollier-diagram op de horizontale as uitgezet, schaal in  $\text{g/kg}$  bevindt zich aan de bovenzijde. De enthalpie ( $h$ ) is niet op de verticale as uitgezet maar op een as die een hoek met de verticale as maakt. Dit is gedaan om het diagram uit elkaar te trekken en het daardoor beter te kunnen aflezen. De waarde van de enthalpie staat bij de lijn  $RV = 100\%$ .

De relatieve vochtigheid is gedefinieerd als:

$$\_ = p_d / p_s \quad \text{fractie}$$

of in procenten:

$$RV = 100 \cdot p_d / p_s \quad \%$$

waarin:

- $p_d$  = partiele dampspanning van waterdamp in  $\text{Pa}$
- $p_s$  = partiele dampspanning van waterdamp bij volledige verzadiging in  $\text{Pa}$

De gebogen lijnen in het Mollier-diagram zijn de lijnen van gelijke relatieve vochtigheid. De onderste lijn is de verzadigingslijn (RV=100%). De hoeveelheid waterdamp die lucht kan bevatten is afhankelijk van de luchtdruk. Het Mollier-diagram (figuur 1) geldt voor een barometerdruk van 101.325 Pa.

De partiele dampspanning bij verzadiging is:

$$p_s = \exp(23,561 - 4030,18 / (\theta + 235)) \quad \text{Pa}$$

De partiele dampspanning is op de schaal bovenaan het diagram af te lezen.

De soortelijke massa van vochtige lucht bedraagt:

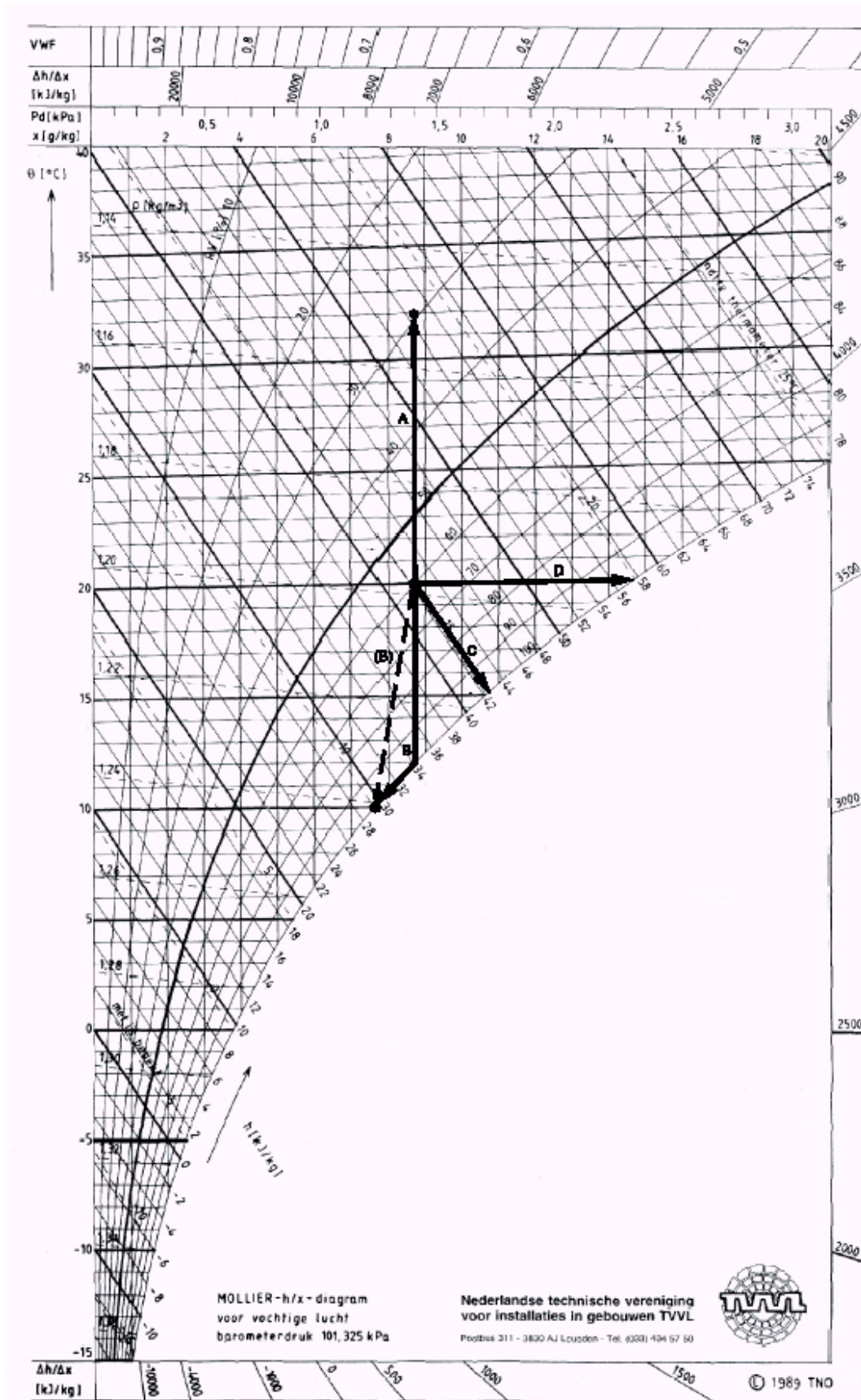
$$\rho = 273 (1,273 \cdot B - 0,48 \cdot p_d) / (100000 \cdot (\theta + 273)) \quad \text{kg/m}^3$$

Het dauwpunt is de temperatuur waarbij condensatie gaat optreden als lucht wordt gekoeld, zonder dat vocht wordt toe- of afgevoerd. De dauwpunttemperatuur wordt berekend met:

$$\theta_{t_{dp}} = 4030,18 / (23,561 - \ln p_d) - 235 \quad ^\circ\text{C}$$

De dauwpunttemperatuur wordt gevonden op het snijpunt van de verticale lijn van de absolute vochtigheid ( $x$ ) (in het diagram in g/kg) en de lijn RV = 100%.

De in het Mollier-diagram (figuur 1) aangegeven "natte thermometer" is de *psychrometrische* natte luchttemperatuur ( $\theta_n$ ). De waarde wordt gevonden door vanuit het beschouwde punt in het diagram (dat de conditie van de lucht karakteriseert) een lijn te trekken evenwijdig aan de gestippelde "natte thermometer"-lijnen. Op het snijpunt van deze lijn met de verzadigingslijn (RV = 100%) is de waarde af te lezen op de schaal van de droge luchttemperatuur (verticale as). Voorbeeld: lucht met een droge luchttemperatuur van 20 °C en RV van 60% heeft een natte luchttemperatuur van bijna 14 °C.



figuur 1 Mollierdigram

## 2 Karakteriseren van de toestand van de lucht (conditie van de lucht)

De toestand van vochtige lucht is met twee grootheden uit het Mollier-diagram te karakteriseren, bijvoorbeeld met een droge luchttemperatuur  $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een relatieve vochtigheid van 60%. De conditie van deze lucht is ook met andere grootheden te karakteriseren:

$$\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ en } x = 8,8 \text{ g/kg}$$

$$\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ en } \theta_n = 15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ en } h = 42,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ en } \theta_{dp} = 12,0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ en } p_d = 1400 \text{ Pa}$$

## 3 Toestandverandering

Wordt lucht die een temperatuur heeft van  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  en relatieve vochtigheid van 60% ( $\theta=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $RV=60\%$ ) verwarmd tot  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan verandert de toestand van de lucht in het Mollier-diagram verticaal langs de lijn  $x=8,8 \text{ g/kg}$  (proceslijn A). Bij  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  is de relatieve vochtigheid bijna 30% ( $\theta=32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $RV=30\%$ ).

Bij het koelen van lucht ( $\theta=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $RV=60\%$ ) tot  $\theta=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  verandert de toestand van de lucht in het Mollier-diagram verticaal langs de lijn  $x=8,8 \text{ g/kg}$  tot het dauwpunt  $\theta_{dp}=12,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  is bereikt. Daarna verloopt de verandering langs de lijn  $RV = 100\%$  tot  $\theta=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  waarbij waterdamp op de koeler condenseert en de absolute vochtigheid  $7,6 \text{ g/kg}$  wordt (proceslijn B). In werkelijkheid zal het proces meer de stippellijn volgen omdat niet alle lucht homogeen gemengd met het koeloppervlak in contact komt.

Het bevochtigen van lucht door het vernevelen van water verloopt bij benadering langs de lijnen met gelijke natte luchttemperatuur ( $\theta_n$ ) (proceslijn C). Het bevochtigen van lucht met droge verzadigde stoom verloopt bij benadering langs de lijnen van gelijke droge luchttemperatuur ( $\theta$ ) (proceslijn D).

Bij gelijktijdig toe- of afvoer van warmte en vocht kan voor het bepalen van de nieuwe toestand de  $\Delta h/\Delta x$ -schaal worden gebruikt.

De VWF-schaal, bovenaan het diagram, geeft de verhouding weer tussen de hoeveelheid voelbare en totale (voelbaar + latent) warmte die bij koeling wordt afgevoerd. De VWF is te bepalen door in het Mollier-diagram een lijn te trekken tussen het begin- en eindpunt van het koelproces en, evenwijdig hieraan, een lijn vanuit het nulpunt naar de VWF-schaal. De betekenis van deze factor is dat de koelmachine  $1/VWF$  maal de berekende koellast aan warmte moet afvoeren.

## 4 Mengen van lucht

Bij het mengen van gelijke hoeveelheden lucht met verschillende temperatuur en vochtigheid is de conditie van het mengsel te bepalen door in het Mollier-diagram (figuur 1) de karakteristieke punten met een rechte lijn te verbinden. Het midden van die lijn karakteriseert de toestand van het mengsel. Bij het mengen van ongelijke hoeveelheden lucht is de conditie van het mengsel te bepalen door de verbindingslijn verhoudingsgewijs te verdelen.

## 5 Meten van luchtcondities

De **droge luchttemperatuur** ( $\theta$ ) is te meten met een droge voor straling afgeschermd thermomometer.

De psychrometrische **natte luchttemperatuur** ( $\theta_n$ ) wordt gemeten met een voor straling afgeschermd thermomometer met een vochtig kousje om het gevoelige gedeelte. Tijdens de meting moet de lucht met een snelheid van ten minste 3 m/s langs het kousje stromen. Het apparaat waarmee deze meting kan worden uitgevoerd heet "psychrometer". Hierin is een kleine ventilator ingebouwd die voor de lucht-stroming zorgt.

De **dauwpunttemperatuur** ( $\theta_{dp}$ ) is te meten met een apparaat waarin een metalen spiegeltje elektrisch wordt gekoeld. De temperatuur van het spiegeltje wordt elektronisch gemeten. Als het spiegeltje beslaat wordt dit door een optisch instrument in het apparaat waargenomen en de bijbehorende spiegeltemperatuur uitgelezen.

Omdat de psychrometer een kostbaar en kwetsbaar instrument is wordt de luchtvochtigheid vaak met een haar-hygometer bepaald. Het is een instrument waarin enkele paardenharen met een metalen veertje en een hefboompje onder spanning worden gehouden. Bij een hoge luchtvochtigheid worden de haren langer, waardoor het hefboompje beweegt. Aan het hefboompje zit een wijzer die langs een schaal beweegt met daarop de **relatieve vochtigheid**. Het is geen nauwkeurig instrument.

De overige grootheden, zoals **enthalpie** ( $h$ ), **absolute vochtigheid** ( $x$ ), **natte luchttemperatuur** ( $\theta_n$ ) en **dampspanning** ( $p_d$ ) worden niet gemeten maar berekend of uit het Mollier-diagram afgeleid.

## 6 Meten van andere klimaatgrootheden

De stralingstemperatuur ( $\theta_r$ ) is nauwkeurig te meten met een warmtestralingsmeter. Iets minder nauwkeurig - maar doorgaans nauwkeurig genoeg - is de **gemiddelde stralingstemperatuur** af te leiden uit de globetemperatuur ( $\theta_g$ ), de luchttemperatuur ( $\theta$ ) en de luchtsnelheid ( $v$ ). Voor de luchtsnelheden zoals die normaal in verblijfsruimten voorkomen geldt bij benadering:

$$\theta_r = [(\theta_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 \times |\theta_g - \theta|^{1/4} \times (\theta_g - \theta)]^{1/4} - 273 \quad ^\circ\text{C}$$

De **globetemperatuur** of zwartebol-temperatuur, wordt gemeten met een thermometer in het hart van een holle metalen globe. De standaardglobe heeft een diameter van 0,15 m en is voorzien van een laag mat-zwarte verf die een absorptiecoëfficiënt voor straling heeft van ten minste 0,95.

De **luchtsnelheid** is het beste met een hittedraad-anemometer te meten. Met dit instrument kunnen vrij nauwkeurig zowel hoge (>10 m/s) als lage (0,05 m/s) snelheden worden gemeten.

Er zijn apparaten waarmee alle hier besproken grootheden gelijktijdig zijn te meten. Verder zijn er instrumenten waarin een microprocessor ervoor zorgt dat uit de meetgegevens en een

aantal in te voeren mensgebonden gegevens, zoals activiteit en kleding, de comfortindices zoals PMV en PPD worden berekend.