

Post-HBO opleiding Bouwfysica

Toepassingen Mollier

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

Inhoudsopgave:

Inhoudsopgave:	2
1 Inleiding:	3
2 Verwarmen van lucht	4
3 Het mengen van twee soorten lucht	5
4 Het koelen van lucht	6
5 Het bevochtigen van lucht	8
6 Opname van warmte en vocht in ruimte. (SHF of VWF)	10
8 De koeltoren	13

Gebruik van het diagram.

1 Inleiding:

In ons vakgebied gebruiken we de in een ruimte toegevoerde lucht om daarmee het gewenste binnenklimaat te bereiken of te handhaven. Het binnenklimaat zal vrijwel altijd verstoort worden door invloeden van buiten af of van binnen uit.

Dit houdt in dat we dus altijd lucht zullen moeten inbrengen welke een conditie heeft die geschikt is om de verstoringen te kunnen opvangen.

Zo zullen en in de winter “transmissie verliezen” op treden waardoor een ruimte zal afkoelen.

Willen we de ruimte temperatuur op een gewenste waarde houden dan zullen we de verliezen die er op treden weer moeten compenseren door met de ingebrachte lucht deze verliezen weer toe te voeren. We zullen in dit geval dus lucht in blazen met een temperatuur die hoger ligt dan de gewenste ruimte temperatuur.

Dit geldt voor alle parameters welke we door middel van “luchtbehandeling” kunnen beïnvloeden. (Verwarmen, koelen, drogen, bevochtigen, reinigen, etc.)

Met behulp van het “Mollierdiagram voor vochtige lucht”, kortweg genoemd het Mollierdiagram, kunnen we op eenvoudige wijze bepalen (en voorspellen) hoe de processen moeten (en zullen) gaan lopen.

We zullen in dit hoofdstuk alle processen en een aantal combinaties daarvan behandelen welke in een Mollierdiagram weergegeven kunnen worden.

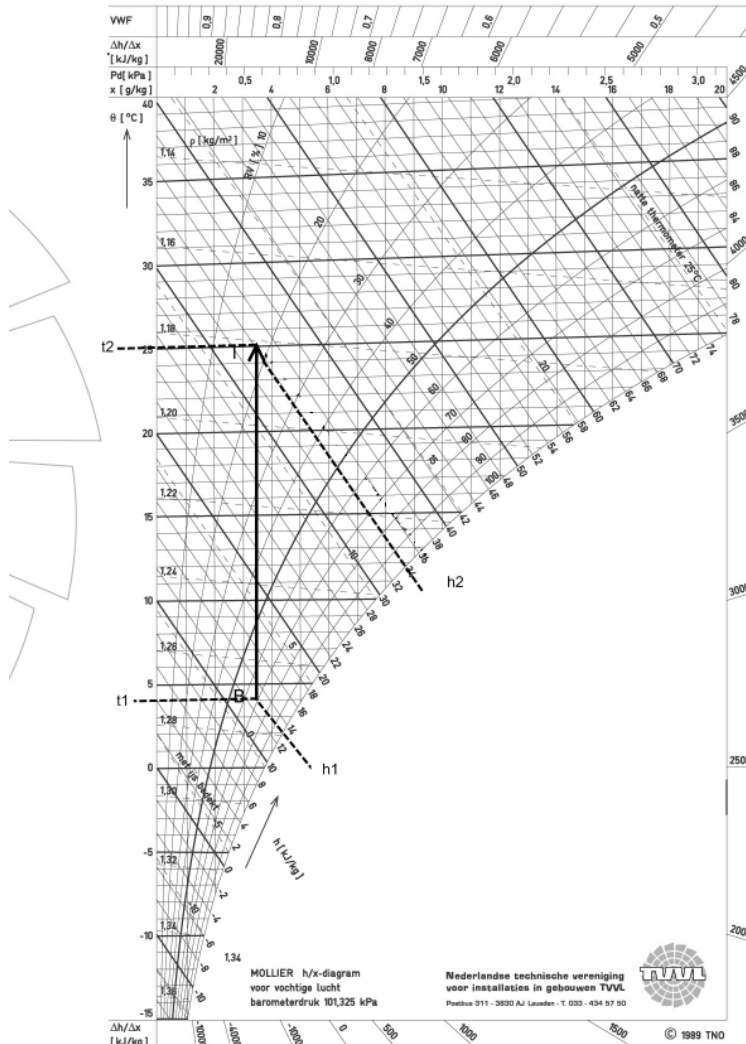
In dit hoofdstuk worden alle processen zoals die in het vorige hoofdstuk reeds genoemd zijn besproken en behandeld met behulp van het Mollierdiagram.

De in het diagram genoemde punten: B, R, M, I, H en K¹ kunnen in de praktijk eenvoudig en betrouwbaar met de psychrometer bepaald worden:

¹ B = Buitenlucht.
R = Retourlucht welke uit een Ruimte (vertrek) komt.
M = geMenglucht, welke bestaat uit buiten- en retourlucht.
H = gemengde lucht die door een Hheater verwarmd is.
K = gemengde lucht die (theoretisch) uit een Koeler komt.
I = Inblaaslucht.

2 Verwarmen van lucht.

Als we lucht verwarmen dan zullen we energie toevoeren. Dit zal tot gevolg hebben dat we de enthalpie zullen verhogen.



Ook geldt dat door verwarmen we, in absolute zin, geen vocht toevoeren dus de “x” verandert niet.

Het proces zal dus verlopen volgens de lijn $x = \text{constant}$.
(Recht naar boven.)

In het bijgaande diagram zien we een voorbeeld weergegeven. We warmen buitenlucht van 4 °C en een Rv van 70% op tot een inblaastemperatuur van 25 °C.

We zien dat de $x_1 = x_2 = \text{Ca. } 3,5$ gr/kg. De enthalpie stijging is:
 $h_2 - h_1 = 34 - 13 = 21 \text{ kJ/kg}$

De theorie:

De formule voor de enthalpie van onverzadigde vochtige lucht is: $h_{l+x} = c_{pl}t + x(r_o + c_{pw}t)$

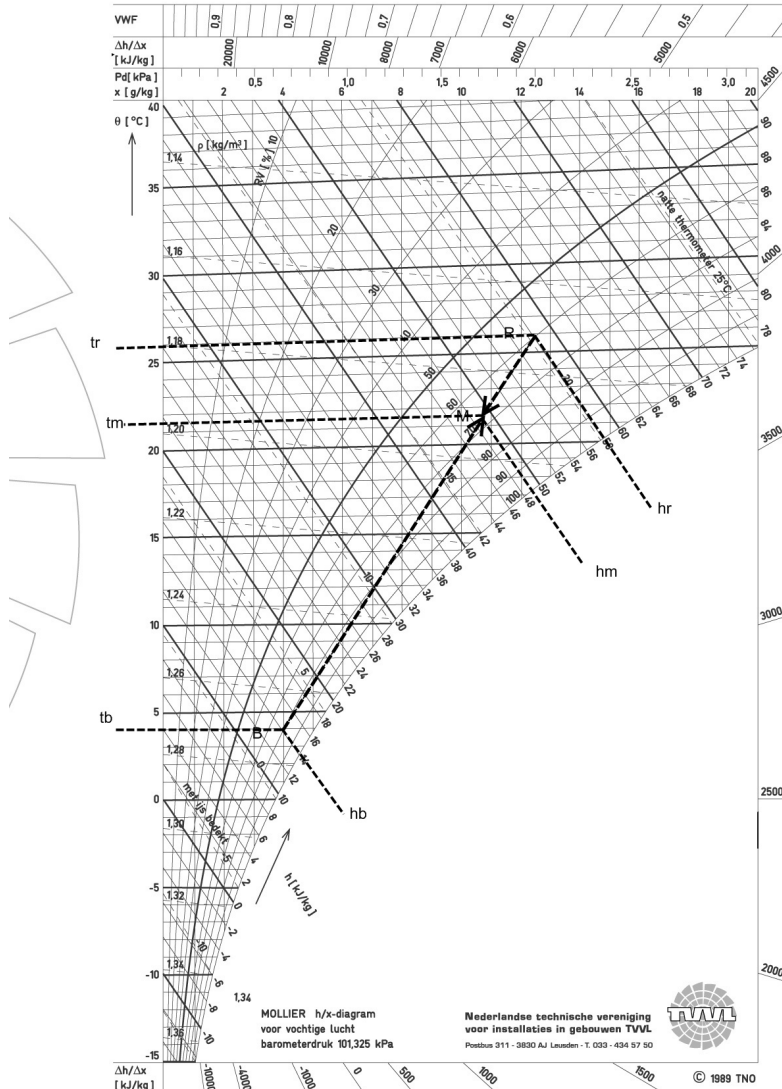
Voor enthalpie verandering geldt dan: $h_2 - h_1 = c_{pl}(t_2 - t_1) + (x_2 - x_1)(r_o + c_{pw}t)$

De x blijft constant dus mogen we stellen dat : $h_2 - h_1 = c_{pl}(t_2 - t_1) = 1 \cdot (25 - 4) = 21 \text{ kJ/kg}$. Dit komt overeen met de aflezing uit het diagram.

Let op; de absolute vochtigheid “x” is wel gelijk gebleven, maar we zien dat de relatieve vochtigheid gedaald is van 70% naar ca. 18%. Dit komt ook overeen met de theorie omdat we daar gezien hebben dat warme lucht meer vocht kan bevatten dan koude lucht. Bij gelijk blijvende x zal de hoeveelheid vocht in relatie tot wat er maximaal in de lucht kan zitten afnemen.

3 Het mengen van twee soorten lucht.

Wanneer twee soorten lucht R en B gemengd worden, moet voor de plaats van het mengpunt M gelden: $BM : MR = m_R : m_B$.



Uit het diagram kan men direct de conditie van de gemengde lucht bepalen. Stel er wordt 80% gerecirculeerd, d.w.z. 80% van de lucht uit de vertrekken (R) wordt weer door de luchtbehandelingunit aangezogen, dan zal de gemengde lucht (M) voor 80% uit retourlucht (R) bestaan. M ligt dus dicht bij R. Er moet dan gelden $MB = 0,8 RB$.

Theorie:

Mengen we y kg lucht met $(1-y)$ kg lucht van een andere conditie dan krijgen we de volgende vergelijkingen voor de enthalpie:

$$h_m = y \cdot h_R + (1 - y) h_B$$

4 Het koelen van lucht

Laten we lucht door een koeler stromen dan zal deze in eerste instantie afgekoeld worden zonder dat de vochtinhoud van de lucht

veranderd. De x zal constant blijven tot dat er een temperatuur bereikt wordt waarbij de RV 100% wordt. (punt t_c, h_c)

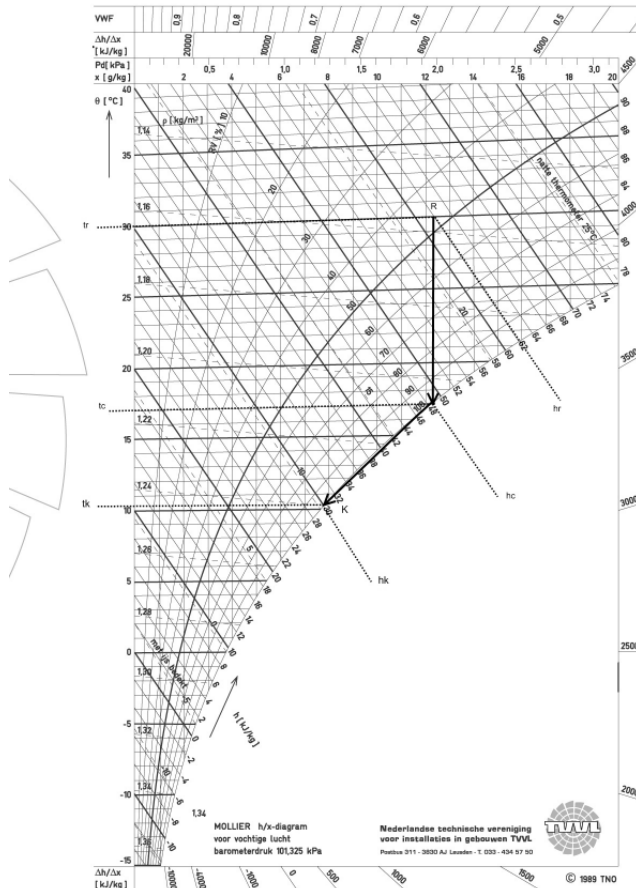
Op dit moment is de lucht verzadigd.

Tot hier lijkt het op het omgekeerde proces van verwarmen.

Wordt er vervolgens verder gekoeld dan zal de lucht verder in temperatuur dalen.

Echter de RV was al 100% en het gevolg is dan de waterdamp erin gaat condenseren, we komen dan in het zgn.

mistgebied, het water blijft in de koeler achter en wordt daar afgetapt. Door de vele pijpjes werkt de koeler redelijk goed als vocht afscheider.



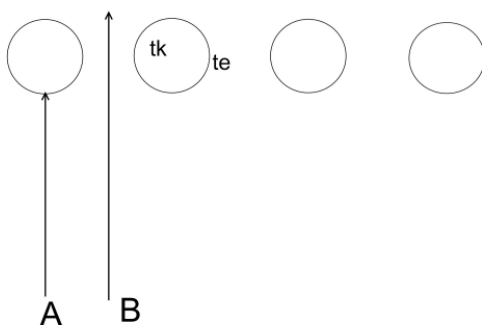
In werkelijkheid komt niet alle lucht in aanraking met het koeloppervlak, maar stroomt een gedeelte "langs" de koelribben. Het koelproces tussen intrede van de koeler en uittrede van de koeler is niet goed te meten, maar voor de eenvoud

tekenen we dit meestal als een rechte lijn. Dit is een aanname welke geen problemen op zal leveren omdat het ons toch gaat over het verschil tussen intrede en uittrede condities.

Wel zal er, afhankelijk van de constructie van de koeler variaties op treden in de uiteindelijke eindcondities van de lucht bij uittrede van de koeler.

Koelbatterij.

We zien hiernaast een rij van de pijpen van een koelbatterij getekend. Door de pijpen stroomt een koelmedium met een temperatuur t_k . Hierdoor zal er een zekeren Δt over de pijpwand



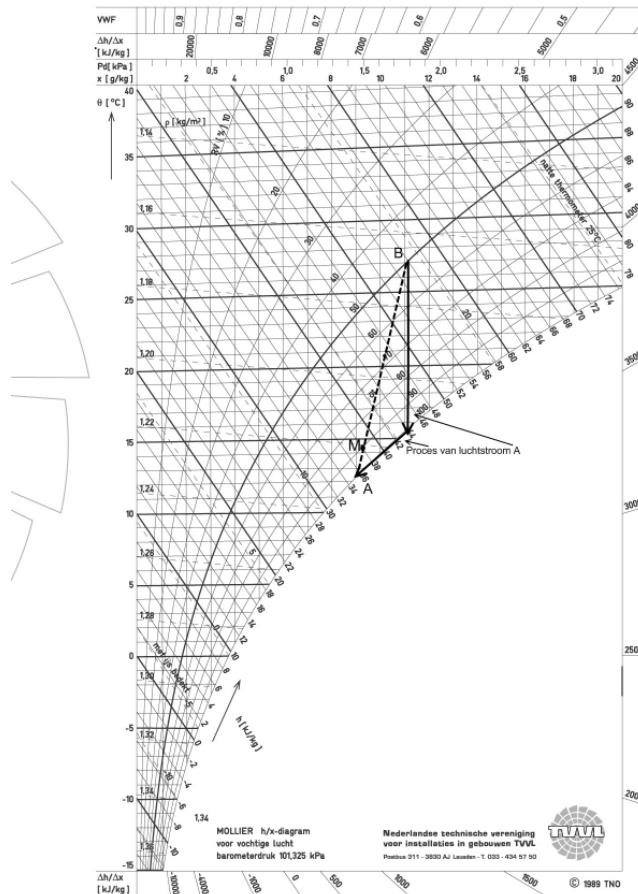
ontstaan om tot een zekere energieoverdracht te komen.

Dit wordt beïnvloed door α waarde aan de binnenkant van de pijp door de thermische weerstand van de pijpwand en door de α waarde aan de buitenkant van de pijpwand.

Al deze zaken hebben tot gevolg dat de temperatuur van de lucht (Stroom A), die de pijp raakt zal dalen. De minimaal bereikbare temperatuur is dan t_e , waarbij $t_e > t_k$.

Afhankelijk van de temperatuur van het koelend medium (t_k) kan luchtstroom A zover afkoelen dat er condensatie op treedt op de pijpen.

Het proces verloopt van de ingangsconditie “B” via de theoretische koellijn eerst recht naar beneden (Droge koeling) tot aan de verzadigingslijn om deze dan vervolgens verder te volgen tot aan de uiteindelijke eindtemperatuur (A).



Doordat de pijpen niet strak tegen elkaar aan staan zal er ook een luchtstroom B zijn, die tussen de pijpen door zal gaan en dus in zijn geheel niet gekoeld zal worden. (Deze luchtstroom houdt de beginconditie “B”.

Na de koeler worden deze beide stromen weer gemengd (Zie “mengen van lucht”) en zal dan een conditie in een mengpunt “M” aannemen.

We zien dan dat, hoewel het lijkt dat de lucht de condensatielijn niet geraakt heeft, toch ontvochtiging op getreden is.

Bij koelers met een enkele rij stroomt er relatief veel lucht langs de pijpen en dit zal tot gevolg hebben dat het mengpunt dicht tegen de beginconditie aan zal komen te liggen.

Heeft men koelers waarvan de pijpen dicht op elkaar staan of meer rijen achter elkaar hebben zal de uiteindelijke mengtemperatuur steeds dicht tegen

de ideale uittrede temperatuur A komen te liggen.

We zien hier de uitdaging van een koeler producent. Hoe meer rijen en hoe dichter de pijpen bij elkaar staan, hoe beter het rendement van de koeler. Aan de andere kant zal ook duidelijk zijn dat dit meer materiaal kost (duurder), maar ook zal de weerstand van de batterij sterk toenemen.

Koelerfabrikanten hebben uitgebreide literatuur voor het bepalen van het type en de afmetingen van de koeler. Zodat men de ligging van punt M kan bepalen.

5 Het bevochtigen van lucht.

Vaak horen we mensen in gebouwen klagen over te droge lucht. Voor een deel klopt dit ook. Beschouwen we bv. een winterconditie. Buiten vriest het 10 graden en de luchtvochtigheid is ca.90%. Deze lucht wordt door middel van ventilatie in gebracht in onze woningen of ons gebouw. Daar wordt de lucht opgewarmd tot bv. 22°

We zien dan de beginconditie van de lucht:

$$t = -10^{\circ}\text{C}.$$

$$RV = 90\%$$

$$x = 1,4 \text{ gr/kg}$$

Bij verwarmen van lucht wordt er geen vocht toe of afgevoerd maar alleen de temperatuur verhoogd. Dus geldt:

$$t = 22^{\circ}\text{C}$$

$$x = 1,4 \text{ gr/kg}$$

Uit het Mollierdiagram lezen we dan af dat de $RV = 8\%$.

Dit wordt dan als zeer droog ervaren. (Onder de 20% gaat men er van uit dat er sterke kans is op vorming van statische elektriciteit.)

Dit is dan ook de reden dat we in de winterperiode vaak zullen moeten bevochtigen.

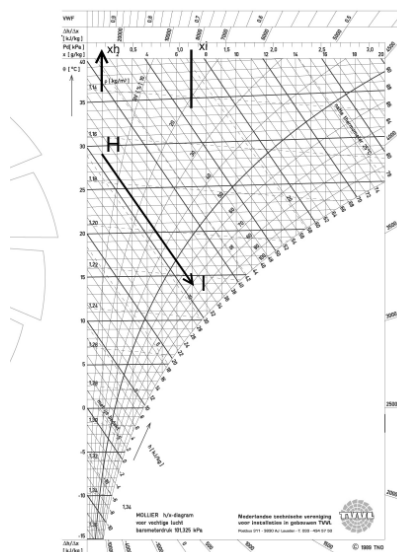
We kunnen de de wijze van bevochtigen onderverdelen in 2 verschillende vormen nl:

- Bevochtiging met interne verdamping
- Bevochtiging met externe verdamping.

Het essentiële verschil is dat bij interne verdamping de energie welke nodig is om het in de lucht ingebrachte water te verdampen uit de lucht afkomstig is. We zien hier dan ook dat de lucht temperatuur zal dalen en er veelal weinig variatie zal zijn in de totale energie inhoud (enthalpie)

Bij externe verdamping wordt het water aan de lucht toegevoerd in de vorm van damp. Deze damp is dan daarvoor extern geproduceerd. De daarvoor benodigde verdampingswarmte wordt dan toegevoerd aan de lucht.

Waterbevochtiging:



Stel dat we de lucht bevochtigen door water van 0°C in de luchtstroom t_i te vernevelen. De enthalpie van dit water $h = 0$ kJ/kg. Er wordt dan geen warmte aan de lucht toegevoerd, alleen maar vocht, zodat de enthalpie van de lucht ook niet veranderd. Vanuit H gaan we via de lijn $h = \text{constant}$ naar I. De hoeveelheid ingespoten water is dan $(x_I - x_H)$ kg/kg droge lucht.

We zien hier dat de lucht afgekoeld is.

De aan het water toegevoerde energie $(x_I - x_H) \cdot 2500$ kJ/kg is gelijk aan de aan de lucht onttrokken energie.

$$(t_h - t_i) \cdot 1$$

Vullen we nu als voorbeeld de getallen in uit het bijgaande Mollierdiagram dan zien we:

$$(0,007 - 0,001) \cdot 2500 = 15 \text{ kJ/kg maar ook geldt } (29-14) \cdot 1 = 15 \text{ kJ/kg}$$

Stoom bevochtiging:

Stel nu dat we de lucht gaan bevochtigen door y kg verzadigde stoom van 3 bar, $h_{st} = 2724.7$ kJ/kg in 1 kg luchtstroom in te blazen.

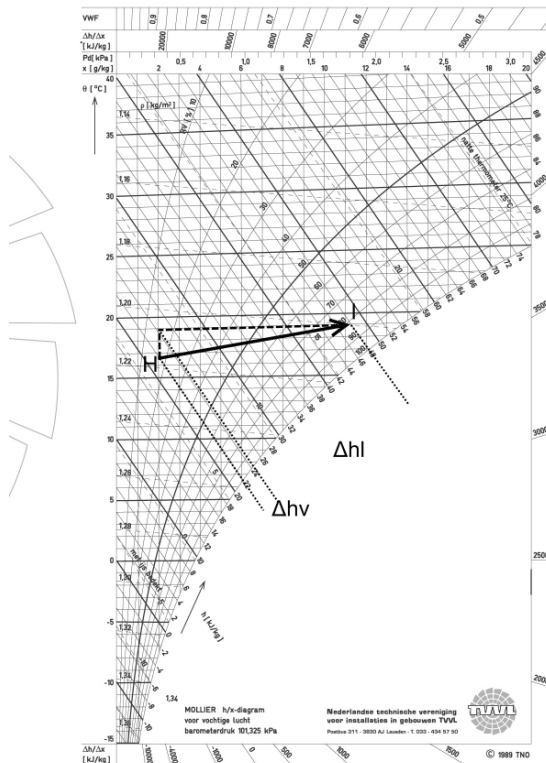
Dan stijgt het vochtgehalte van:

x_H tot $(x_H + y)$ [kg/kg]

en de enthalpie van de lucht van:

h_H tot $(h_H + y \cdot h_{st})$ [kJ/kg]

Gevoelsmatig kunnen we al verwachten dat de lucht zal opwarmen, want we brengen verzadigde stoom in van 3 bar, die een temperatuur heeft van $133,5^\circ\text{C}$.



Ingevuld aan de hand van het bijgaande voorbeeld in het diagram:

$\Delta x = 11,5 - 2 = 9 \text{ gr/kg}$ bij een $h_{st} = 2724.7$ geeft dit een toegevoerde energie van $25,9 \text{ kJ/kg}$.

Lezen we uit het diagram de waarde $h_I - h_H = 48 - 22 = 26 \text{ kJ/kg}$

We zien dat dit ook overeenstemt (Kleine afleesfout is mogelijk)

We zien hier nu ook tevens weer het begrip voelbare en latente warmte terug komen.

We constateren dat de temperatuur van de lucht

stijgt van $16,5$ naar 19°C . Dit wordt veroorzaakt door dat de stoom warmer is dan de lucht. Dit heeft een enthalpie stijging tot gevolg van $24,5 - 22 = 2,5 \text{ kJ/kg}$. Dit is *voelbare* warmte.

De rest van de totaal toegevoerde energie is *latente* warmte, dus warmte welke wel in de lucht (latent) aanwezig is, maar niet tot zichtbare temperatuursverhoging leidt.

Bij stoombevochtiging kunnen we ook van de randschaal gebruik maken.

Als nu de stijging van het vochtgehalte dx is, en die van de enthalpie dh , dan geeft de **cirkelschaal** het quotiënt dh/dx . 1

We trekken nu een lijn vanuit het punt 0°C , $0\%RV$ naar het punt 2714.7 op de randschaal.

Parallel daaraan trekken we vanuit H (x_H) een lijn tot I' dit is het punt waarop deze lijn het punt ($x_I = x_H + y$) kruist.

6 Opname van warmte en vocht in ruimte. (SHF of VWF)

Zoals in de inleiding al aangegeven zullen we lucht in een ruimte inblazen die een conditie heeft welke zodanig afwijkt van de gewenste ruimte condities dat we de verstoringen op deze ruimteconditie kan compenseren.

We zullen dus bepalen welke verstoring er op treed en dan vervolgens uitrekenen welke luchtconditie we dan moeten inblazen om dit te compenseren.

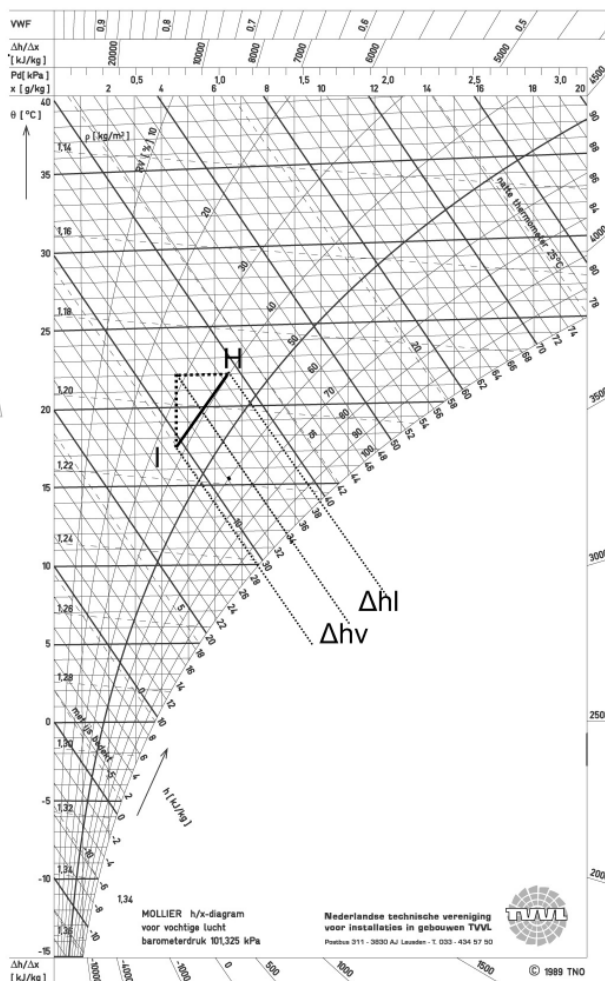
Als voorbeeld nemen we een bouwkeet.

- * De warmte welke door de wanden en ramen naar binnen komt: 3000 W
- * De warmte welke door apparatuur in de keet afgegeven wordt noemen we 1500 W.
- * De warmte die de aanwezige personen afgeven ± 120 W/pers. noemen we 4_{pers}

De som van deze warmte hoeveelheden ($1000 + 500 + 4 \cdot 120 = 4980$ W = J/s) zorgt ervoor dat de temperatuur in het vertrek "voelbaar" stijgt.

We noemen deze hoeveelheid warmte dan ook "de voelbare warmte"

- * De hoeveelheid vocht die de keet binnen komt, door apparatuur of personen ontwikkeld, geeft geen voelbare temperatuurstijging (het vochtgehalte in de lucht neemt toe terwijl de temperatuur constant blijft) en noemen we de "latente warmte" b.v. 2gr/s



Willen we deze verstoring (2 gr vocht² per seconde en 5 kJ/s) afvoeren dan zullen we moeten zorgen dat de lucht dit kan opnemen en na deze opname precies de gewenste ruimte temperatuur heeft.

In dit voorbeeld moet dus de lucht 2 gram droger zijn en 5 kJ minder voelbare energie bevatten.

Stel nu dat we dit met 1 kg lucht per seconde willen doen, dan moet er dus ook 2 gr/kg vocht en 5 kJ/kg voelbaar worden afgevoerd.

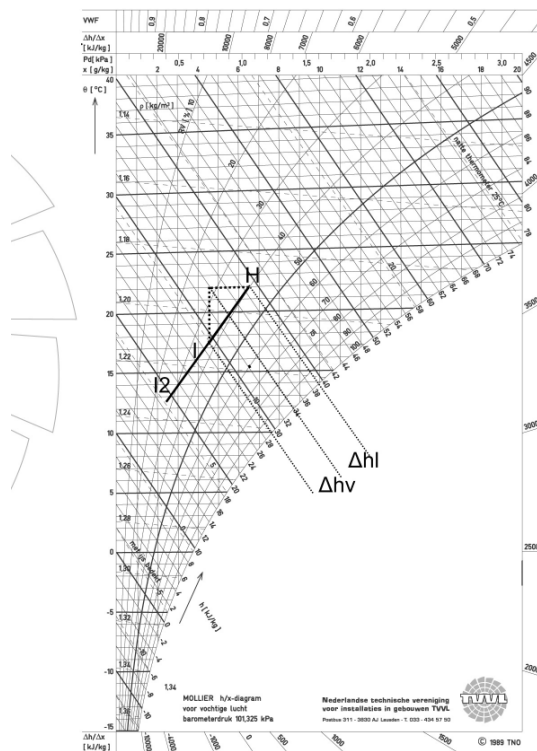
Als we onze gewenste ruimteconditie stellen op b.v. 22°C en een $R_v = 40\%$ dan geeft dit in het diagram uitgezet het volgende beeld:

We zullen dan de lucht in moeten blazen met een conditie "I".

Zie ook hier weer de Δh_v en Δh_l

² 2 gr vocht per seconde houdt in dat er $0,002 \cdot 2500 = 5$ kJ/s aan energie afgevoerd moet worden.

Stel dat we nu niet met 1 kg/sec in willen blazen maar met 0,5 kg/s.



Aangezien we nog steeds de zelfde hoeveelheid voelbare warmte (5kJ) en latente warmte (2 gr) per seconde af willen voeren zal dat nu terug gerekend naar de kg, waarvan het mollier diagram altijd uit gaat, betekenen dat er nu 10 kJ/kg lucht en 2 gr/kg lucht zal moeten worden afgevoerd.

We komen dan tot een inblaas conditie "I2".

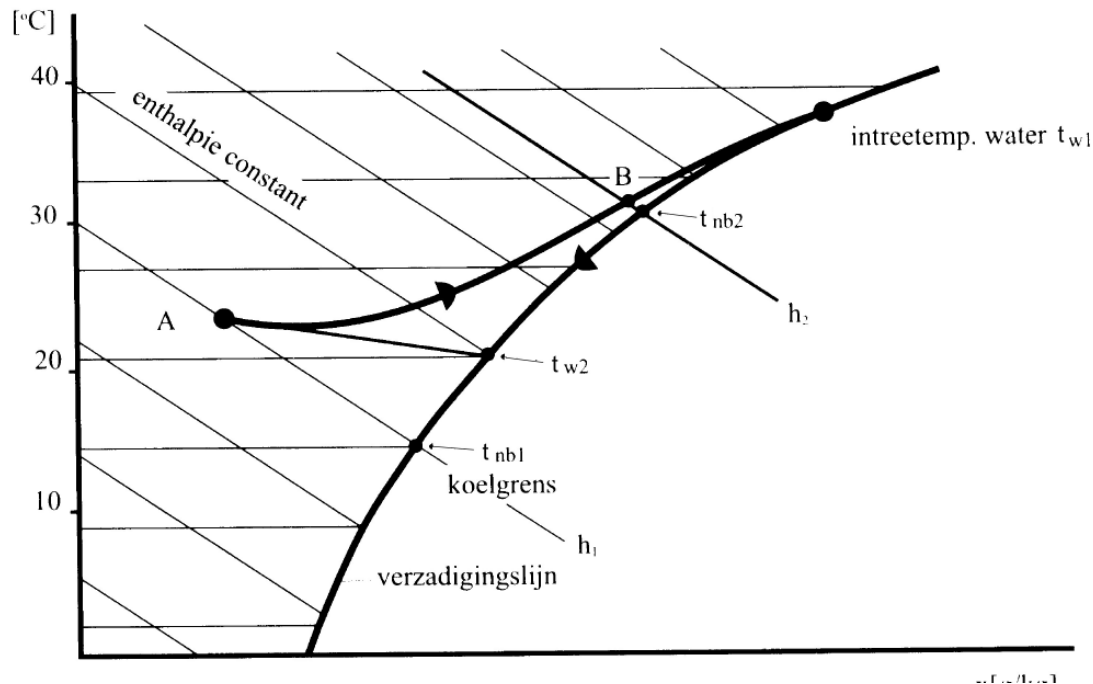
We zien dat deze conditie ligt op het verlengde van de lijn I-H. De verhouding tussen de latente warmte en de voelbare warmte verandert niet, dus de tangens van de hoek die de lijn I-H maakt blijft steeds gelijk.

Van deze eigenschap maken we gebruik door de "Sensible Heat Factor" afgekort SHF te definiëren. In het Nederlands wordt dit de "Voelbare Warmte Factor" VWF genoemd.

$$VWF = SHF = \frac{Q_{voelbaar}}{Q_{Totaal}}$$

Wanneer de SHF berekend is kan men de "belastingslijn" eenvoudig tekenen. Door het punt $x=0\text{gr/kg}$ en $t=0^\circ\text{C}$ trekt men een lijn evenwijdig aan de lijn door een gemerkt punt en de VWF-randschaal. Deze lijn wordt parallel verschoven tot dat deze de gewenste ruimte conditie kruist. Alle punten op deze lijn voldoen nu aan de eis dat ze de juiste verhouding tussen vocht en temperatuur kunnen afvoeren.

De buitenlucht A komt onder de koeltoren binnen. Deze lucht is (meestal) niet verzadigd met waterdamp en zal doordat het intensief met het water in contact komt vocht opnemen. Een gedeelte van het koelwater wordt omgezet in damp en de verdampingswarmte wordt onttrokken aan het koelwater zelf waardoor de koelwatertemperatuur daalt en enkele procenten koelwater verdwijnt.



Wanneer de buitenluchttemperatuur hoger is dan de koelwater uitlaattemperatuur, zal t.g.v. het tegenstroomprincipe deze eerst dalen en daarna in temperatuur stijgen maar wel steeds vochtiger worden. Doordat er geen pijpwand tussen de stoffen aanwezig is die de warmte overdracht belemmerd is het mogelijk dat de uitlaatluchttemperatuur bijna gelijk is aan de inlaat koelwatertemperatuur. De lucht verlaat de koeltoren (bijna) verzadigd met waterdamp en met een temperatuur "gelijk" aan de inlaat koelwatertemperatuur.