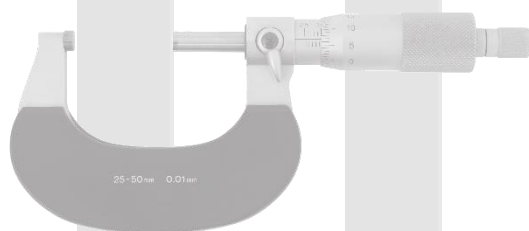


INTRODUKTION TIL MÅ- LING AF LUFTFUGTIGHED

UNDERVISNINGSELEMENT

H1

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK



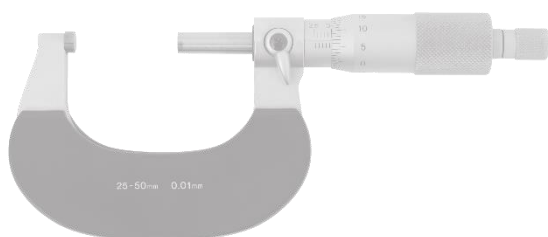
metrologi.dk



INTRODUKTION TIL MÅLING AF LUFTFUGTIGHED

Anders Bonde Kentved, FORCE Technology

1. udgave – oktober 2018, redigeret oktober 2019



Copyright © 2018 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materialet er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisningsmaterialet eller i indholdet på websitet samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	1	4.1 Måleprincipper	9
1.1 Luftfugtighedens verden	1	4.2 En vanskelig disciplin	9
1.2 Forudsætninger	1	4.3 Spejlhygrometret	9
1.3 Læringsudbytte	1	4.3.1 Fordele og ulemper	10
2 Fugtig luft	2	4.4 Impedanshygrometer (resistivt eller kapacitivt) 11	
2.1 Fordampning og kondensation	3	4.4.1 Alt-i-én sensorer	13
2.2 Begrebet "mætning"	3	4.4.2 Fordele og ulemper	13
2.3 Damptryk og mætningsdamptryk	4	4.5 Psykrometret	14
2.4 Dugpunkt	5	4.5.1 Fordele og ulemper	15
2.5 Relativ luftfugtighed	5	5 Terminologi indenfor hygromettermåling	16
2.6 Absolut luftfugtighed	6	5.1 Kalibrering	16
2.7 Hvad blev der af den tørre luft?	6	5.2 Justering	16
2.8 Molbrøk	7	5.3 Fejl, usikkerhed og nøjagtighed	16
2.9 Blandingsforhold	7	6 Referencer og litteraturhenvi	17
3 Fugt og materialer	7	Appendix 1 Ordliste	
4 Måling af luftfugtighed	9		

1 Indledning

1.1 Luftfugtighedens verden

Området omkring luftfugtighed og dennes måling anses generelt for at være lidt mystisk. Ikke sjældent opstår der fejl og uoverensstemmelser i specifikationer og tolkning af måleresultater alene på grund af tvetydige definitioner og manglende forståelse af de mange forskellige måleenheder for luftfugtighed.

Luftfugtigheden har større eller mindre indflydelse på næsten alt, hvad vi omgiver os med, lige fra fødevarer til skærmen på vores smartphone og naturligvis vejret. De mange forskellige påvirkninger afspejles i en lang række opfindsomme måleprincipper, der er blevet til gennem tiderne.

I dette undervisningselement tilstræbes en afmystificering af luftfugtighedens verden. De vigtigste definitioner, måleenheder og principper gennemgås og forklares. Desuden gives en introduktion til de mest almindelige måleprincipper.

I undervisningselement #H2 tages der fat på egentlige beregninger og typiske måleopgaver og -situationer.

1.2 Forudsætninger

Det forudsættes, at læseren kan fysik og matematik på gymnasialt niveau. Kendskab til grundlæggende elektronik vil være en fordel ifm. Kapitel 4. En ordliste med forklaring af særlige fagudtryk anvendt i teksten (markeret med kursiv og grøn font), findes i Appendix 1.

I dette undervisningselement regnes alle gasser for ideelle, idet det giver den letteste indlæring af stoffet for begynderen. Desuden er fejlene der derved begås forsvindende små ved normale atmosfæriske forhold og ift. typiske industrielle krav til nøjagtighed. Læsere der ønsker at gå skridtet videre og se nærmere på eksempelvis ikke-ideelle forhold og de såkaldte "enhancement faktorer", henvises til [1], [2].

1.3 Læringsudbytte

Efter indlæring af dette undervisningselement vil læseren:

- Have viden om hvad fugtig luft er.
- Kende terminologi og måleenheder relevante for hygrometermålinger.
- Kunne give eksempler på luftfugtighedens indvirkning på vores omgivelser.
- Have viden om hvilke instrumenter (hygrometre) som benyttes til måling af luftfugtighed.

2 Fugtig luft

Fugtig luft er sammensat af:

- Tør luft, indeholdende: ~78 % kvælstof (N_2), ~21 % ilt (O_2) og mindre dele af flere andre gasser.
- Vanddamp (H_2O på gasform).

Luften omkring os indeholder altid en vis mængde vanddamp og kan derfor altid siges at være mere eller mindre fugtig. Ordet "vanddamp" giver ofte anledning til misforståelser, da det kan betyde to forskellige ting: Enkelte vandmolekyler eller samlinger af mange vandmolekyler (dråber).

Når man taler om luftfugtighed og dennes måling, betyder vanddamp altid vand på gasform, dvs. helt usynlige frie enkeltmolekyler med en diameter på en brøkdel af en nanometer. Denne vanddamp er meget forskellig fra den synlige vanddamp, man kan observere som tåge, skyer eller det, der kommer ud af en kedel, der koger. Her er der tale om samlinger af utallige vandmolekyler, dvs. dråber. Selv den fineste lille skydråbe indeholder mere end 1000 milliarder vandmolekyler.

På Figur 1 befinder flyet sig i et område med fugtig luft, som er helt usynlig. Men da det gennembryder lydmuren, opstår der trykforskelle i afgrænsede områder omkring det. Der hvor trykket er lavt, afkøles luften momentant ved såkaldt **adiabatisk ekspansion**

og vandmolekylerne samler sig (kondenserer) i fine vanddråber. De mange dråber danner synlige, hvide skyer, der bortset fra formen er lige til dem, vi normalt ser på himlen.

Grunden til, at man siger damp og ikke gas, er, at vand ved normale temperaturer og tryk befinder sig under sit såkaldte kritiske punkt ($374\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $22,1\text{ MPa} = 221\text{ Bar}$). Over det kritiske punkt kan et stof kun eksistere på gasform. Under det kritiske punkt kan det sameksistere i flere faser, eksempelvis: fast/damp, flydende/damp, eller endda fast/flydende/damp som vandet ved dets tripelpunkt ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,16\text{ K}$). Rent definitionsmæssigt har man vedtaget at bruge damp for stoffer på gasform, når de er under deres kritiske punkt, og gas, når de er over, men der er ingen fysisk forskel.

Netop det, at vand konstant skifter fase, alt efter temperatur og tryk under vores atmosfæriske forhold, gør det utrolig svært at styre, hvor vandet kommer hen. Vand kan f.eks. let komme ind i et apparat på dampform, selv igennem de mindste huller og sprækker – endda igennem massiv plastik! Inde i apparatet kan vandet så give utallige problemer, især når det kondenserer og dermed begynder at kunne lede strøm, hvis bare den mindste smule forurening er til stede. På flydende form kan vandet være umuligt at få ud samme vej, som det kom ind, da det nu er samlet i enorme dråber.

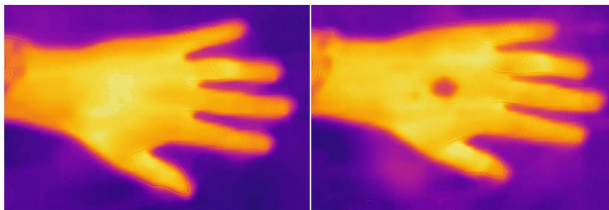


Figur 1: Typiske skydråber har en diameter på 10-20 μm og indeholder mere end 1000 milliarder vandmolekyler.

2.1 Fordampning og kondensation

Som tidligere nævnt består vand, som vi kender det, af en ufattelig mængde vandmolekyler. Molekylerne bevæger sig hele tiden, både i den flydende form og i dampformen. De har dermed en vis bevægelsesenergi (kinetisk energi). Molekylerne bevæger sig ikke med samme hastighed, men følger det, der hedder **Maxwells hastighedsfordeling**. Ved stuetemperatur overstiger størstedelen af molekylerne en hastighed på 1000 km/t! I væsken holdes molekylerne sammen af såkaldte **intermolekylære kræfter**. For at et vandmolekyle kan gå fra væske til damp, dvs. fordampe, må det overvinde de intermolekylære kræfter. Dermed bliver det kun de molekyler med størst kinetisk energi (hastighed), der fordamper. Da det er middelhastigheden af molekylerne, der bestemmer væskens temperatur, og de hurtigste molekyler, der fordamper, betyder fordampning, at væsken afkøles. Sagt på en anden måde, taber væsken termisk energi (ca. 2250 Joule/gram) ved fordampning. Denne energi kaldes også fordampningsvarmen.

De fleste kender den kølende fornemmelse man føler, hvis man puster på et område af huden, der er vådt. Her er der netop (primært) tale om køling pga. fordampning. Dette er illustreret i Figur 2.



Figur 2: Termografisk billede af fordampning fra en våd plet på en håndryg. Den våde plet på håndryggen til højre, bliver blå-lilla i termografi, fordi den er koldere end resten af håndryggen (gul/orange).

Fordampning sker ikke kun fra flydende vand, men foregår på principielt samme måde for is. Det gør det muligt at tørre tøj i frostvejr som vist på Figur 3.



Figur 3: Tørring af tøj i frostvejr.

Fordampningshastigheden for både is og vand er temperaturafhængig. Jo højere temperatur, jo højere fordampningshastighed. Derfor er vores almindelige oplevelse også, at vand fordamper hurtigere end is.

Vanddampen fra luften kan også kondensere på en overflade. Når det sker, frigives fordampningsvarmen, og overfladen varmes op. Det kan man mærke i en sauna, når der hældes vand på ovnen. Det vand, der herved fordamper, kondenserer bagefter igen på huden af dem, der er i saunaen. Der skal ikke så meget vand til, før man føler en voldsom opvarmning.



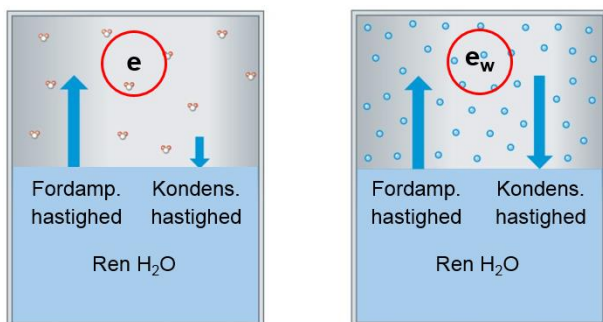
Figur 4: Kondensnedslag på arm inde i sauna.

2.2 Begrebet "mætning"

Hvis vand får lov til at fordampe fra en åben beholder til "det fri", vil alt vandet på et tidspunkt være fordampet helt væk. Hvis man derimod lukker beholderen, som vist i Figur 5, vil der begynde at samle sig vandmolekyler i området over vandoverfladen.

De vandmolekyler, der tilfældigvis har retning mod vandoverfladen, vil, når de er tæt nok på, blive trukket ind af de intermolekylære kræfter og dermed blive optaget i vandfasen igen (dvs. kondensere). Molekylerne accelereres derved op i hastighed, og vandfasen modtager derfor de samme 2250 Joule/gram, som den tabte ved fordampningen (fordampningsvarmen). I modsætning til fordampningen, sker kondensationen dog uafhængigt af molekylernes kinetiske energi (hastighed).

Efterhånden som der kommer flere og flere vandmolekyler i området over vandoverfladen (Figur 5, til venstre), stiger kondensationshastigheden tilsvarende. På et tidspunkt er kondensationshastigheden lige så stor som fordampningshastigheden, (Figur 5, til højre), og området over vandoverfladen siges at være "mættet" med vanddamp ("mætning").



Figur 5: Fordampning/kondensation af vandmolekyler fra/på en vandoverflade.

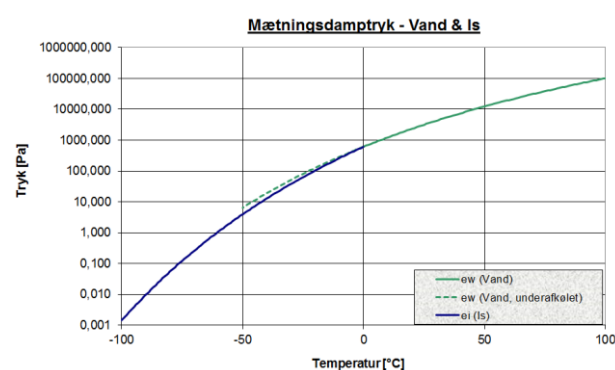
Det er vigtigt at forstå, at kondensationen og fordampningen ikke er stoppet, når der er mætning, de foregår bare lige hurtigt. Vandoverfladen bliver derfor heller ikke hverken varmere eller koldere, og der bliver også ved med at være lige mange molekyler i begge faser. Denne tilstand kaldes for en "dynamisk ligevægt".

2.3 Damptryk og mætningsdamptryk

Vandmolekylerne eller vanddampen over overfladerne i Figur 5 giver anledning til et tryk inde i beholderne. Dette tryk kaldes for "damptrykket". Damptrykket i beholderen til venstre er umættet og betegnes normalt " e ". Damptrykket i beholderen til højre er mættet og betegnes normalt " e_w ". Mætningsdamptrykket er det højeste damptryk, der kan opnås ved en given temperatur.

Damptrykket bruges sjældent direkte i forbindelse med måling af luftfugtighed, men lige så snart man skal omregne imellem måleenheder, fungerer damptrykket som referencepunkt.

Vand har en eksponentielt stigende tendens til hellere at ville være på dampform end flydende (eller fast) form ved højere temperaturer. Dette kan også ses af kurven for mætningsdamptrykket i Figur 6, der har en stigning på ca. 1000 Pa fra $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ men ca. 100000 Pa fra $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. I øvrigt er årsagen til, at vand koger ved ca. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, at atmosfæretrykket netop her er ca. 100000 Pa (**standardatmosfæretrykket** er 101325 Pa).



Figur 6: Mætningsdamptryk for vand og is.

Den blå kurve i Figur 6 viser mætningsdamptrykket over is. Dette betegnes normalt " e_i ". Der ses desuden et overlap imellem den grønne kurve (stiplet) for vand og den blå for is i området $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ til ca. $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$. I dette område kan vand både optræde som underafkølet vand (flydende) og is, afhængigt af omgivelserne (se også afsnit 4.3). Kurverne for mætningsdamptrykket (vand og is) kan beregnes med internationalt vedtagne empiriske formler. De bredest anvendte i Europa er "Sonntags formler", som er nærmere beskrevet i [2]. Formlerne er ret lange, og derfor er der her givet to alternative formler, som er lidt mindre nøjagtige, men til gengæld kortere. Formlerne kaldes "Magnus formler" og kan anvendes til langt de fleste "almindelige" beregninger:

Ligning 1

$$\ln e_w(T) = \ln(611,2) + \frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}$$

Ligning 2

$$\ln e_i(T) = \ln(611,2) + \frac{22,46 \cdot T}{272,62 + T}$$

$e_w(T)$ og $e_i(T)$ måles i Pascal [Pa] og temperaturen T i grader celsius [°C].

Iht. [2] har e_w , beregnet med formel Ligning 1 i området -45 [°C] til 60 [°C], en usikkerhed på mindre end $\pm 0,6$ % ved et konfidensniveau på 95 %. Samme kilde angiver, at e_i , beregnet med formel Ligning 2 i området -65 [°C] til 0,01 [°C], har en usikkerhed på mindre end $\pm 1,0$ % ved et konfidensniveau på 95 %.

2.4 Dugpunkt

Dugpunktet, eller mere korrekt dugpunktstemperaturen, er den temperatur, man skal nedkøle en given fugtig luftmasse til, før der begynder at opstå dug eller kondens. Det er dermed også temperaturen, hvor ved fugtig luft bliver mættet i ligevægt med vand.

På Figur 7 ses to beholdere (1 og 2) med vanddamp. I begge beholdere er der opnået ligevægt, både mht. fordampning/kondensation og temperatur T . I beholder 1 har der været tilstrækkelig meget vand til at give mætning, og der er derfor noget vand tilbage. I beholder 2 er alt vandet fordampet, og der har derfor ikke været nok til at skabe mætning. I beholder 1 er der således det mættede damptryk ved T , dvs. $e_w(T)$ og i beholder 2 et ukendt umættet damptryk e . Forestiller man sig nu, at der føres en overflade ind i begge beholdere, og at man kan styre temperaturen af denne overflade, vil man kunne observere følgende:

- I beholder 1 vil der komme dug på overfladen ved temperaturen T (og derunder). Man siger derfor,

at dugpunktet i beholder 1 er $T = T_{d1}$. Damptrykket er $e_w(T) = e_w(T_{d1})$.

- I beholder 2 vil der først begynde at komme dug på overfladen ved en lavere temperatur end T . Man siger derfor at dugpunktet i beholder 2 er lavere end T , dvs. $T_{d2} < T$. Damptrykket er $e = e_w(T_{d2})$.

Dermed bliver dugpunktstemperaturen et mål for, hvor meget vanddamp der er til stede i beholderen.

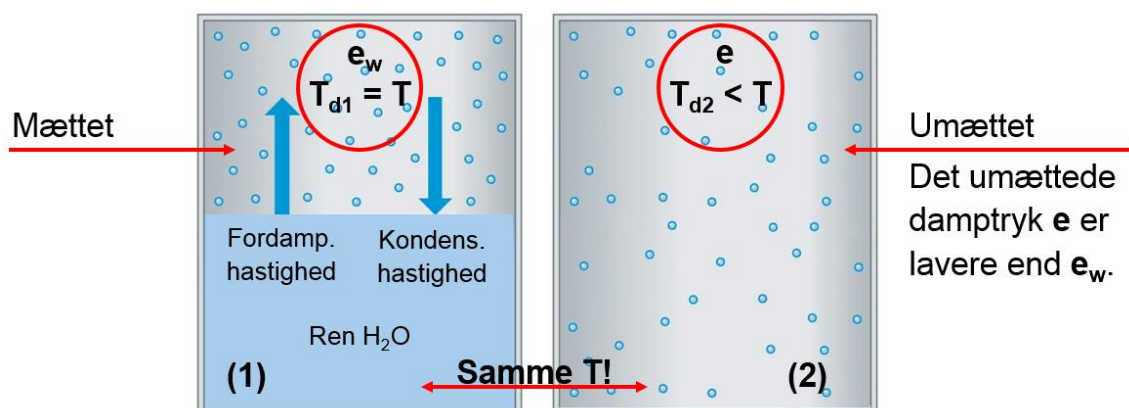
2.5 Relativ luftfugtighed

Den relative luftfugtighed er forholdet imellem den aktuelle mængde vanddamp (umættet), og den maksimale mængde vanddamp (mættet), der ville kunne opnås ved samme temperatur. Relativ luftfugtighed udtrykkes normalt i procent med værdier fra 0 til 100. Den internationalt vedtagne notation er %rh. Den relative luftfugtighed kan både bestemmes ud fra forholdet mellem umættet/mættet damptryk og forholdet mellem umættet/mættet absolut fugtighed. Da dugpunktet (mætningspunktet) er det letteste at måle nøjagtigt, beregnes den relative fugtighed oftest ved brug af dugpunktstemperaturen, omgivelsestemperaturen og en af de internationalt vedtagne empiriske formler for mætningsdamptrykket.

Den relative fugtighed i beholder 2 på Figur 7 kan dermed beregnes som:

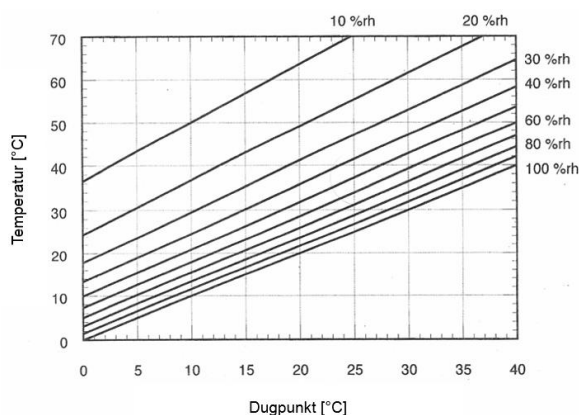
Ligning 3

$$U[\%rh] = \frac{e_w(T_{d2})}{e_w(T_{d1})} \cdot 100$$



Figur 7: Dugpunkt under mættede og umættede forhold

På den følgende figur ses sammenhængen mellem temperatur, dugpunkt og relativ luftfugtighed.



Figur 8: Sammenhængen mellem lufttemperatur, dugpunkt og relativ luftfugtighed.

Læg mærke til, at dugpunktet ved 100 %rh altid er lig med omgivelsestemperaturen. Her er den fugtige luft lige nøjagtig mættet med vanddamp, og der opstår kondens eller "dug".

Den relative luftfugtigheds afhængighed af temperaturen er meget større ved høje relative fugtigheder end ved lave. Det kan ses af Figur 8, ved at %rh linjerne med høje %rh værdier ligger tættere end dem med lave værdier. Eksempelvis giver en 1 °C ændring af temperaturen ved 25 °C og 20 %rh en ændring i relativ fugtighed på 1,2 %rh. Ved 25 °C og 90 %rh er ændringen 5,2 %rh.

2.6 Absolut luftfugtighed

Den absolutte luftfugtighed angiver massen af vanddamp pr. volumen (dvs. massefylde) og måles typisk i g/m³.

Den absolutte luftfugtighed kan i princippet måles ved absorption af vanddampen i et passende materiale og vejning. "Instrumentet" eller nærmere faciliteten hertil kaldes et gravimetrisk hygrometer og findes kun fire steder i verden (England, EU, USA og Japan). I langt de fleste tilfælde bestemmes den absolutte luftfugtighed derfor ved først at måle enten dugpunktet eller den relative luftfugtighed og temperaturen.

Herefter findes damptrykket "e" (husk at: $e = e_w(T_d)$) og den absolutte fugtighed af:

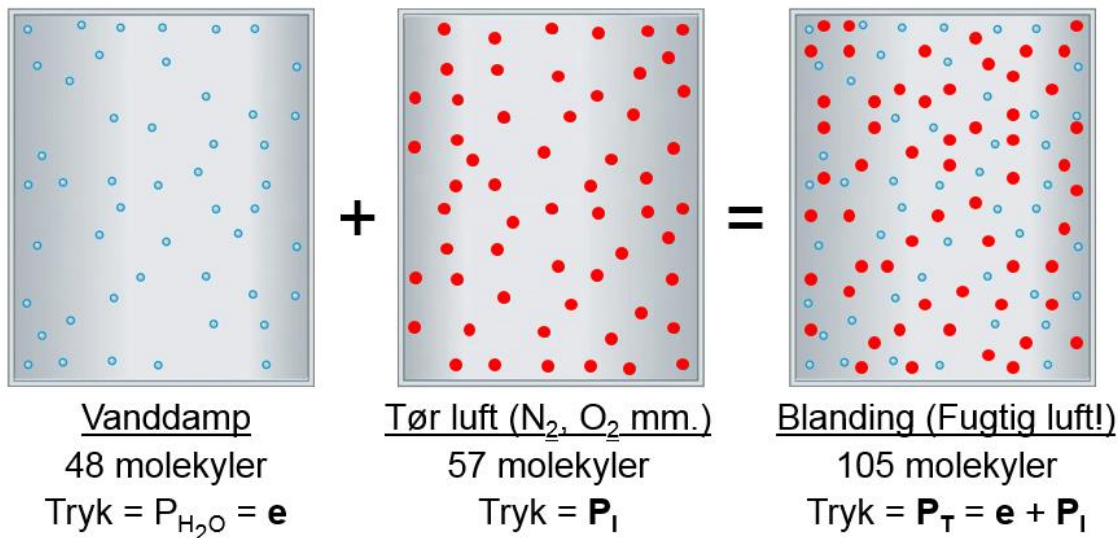
Ligning 4

$$d \left[\frac{g}{m^3} \right] = \frac{m_v}{V} = \frac{e \cdot M_v}{R \cdot T}$$

Hvor: m_v = massen af vanddampen [g], V = volumenet [m³], M_v = molmassen for vand = 18,0153 [g/mol], R = idealgaskonstanten = 8,3145 [J / (mol · K)]. Temperaturen T skal her indsættes i Kelvin [K]!

2.7 Hvad blev der af den tørre luft?

Den opmærksomme læser vil have lagt mærke til, at vi indtil nu har holdt os til at beskrive den rene vanddamp, selvom den luft vi jo kender, altid er en blanding af både vanddamp og tør luft, dvs: ~78 % kvælstof (N₂), ~21 % ilt (O₂) og mindre dele af flere andre gasser. Årsagen er, at man let mister overblikket, når man ser på blandingen som helhed. Men mht. fænomenerne beskrevet i de foregående afsnit, giver tilstedeværelsen af den tørre luft ingen forskel. Ifølge **Daltons lov** er det totale tryk af en blanding af (ideelle) gasser lig med summen af partialtrykkene (deltrykkene) af de gasser, der er i blandingen, hvis de hver især optog det samme volumen ved den samme temperatur. Sagt på en lidt anden måde opfører blandingen af vanddampen og den tørre luft sig på mange måder som om, de to dele var til stede hver for sig. Det betyder dog ikke, at de ikke "mærker" hinandens tilstedeværelse. Alle blandings molekyler kolliderer med hinanden milliarder af gange i sekundet, hvilket også muliggør varmeoverførsel i luften. Men da alle kollisionerne er fuldstændig elastiske, taber molekylerne ikke energi. Resultatet er, at vanddampen og den tørre luft ikke påvirker hinanden. Dermed bliver dugpunktet, den relative fugtighed og den absolutte fugtighed de samme, uanset om der er tør luft til stede eller ej.



Figur 9: Blandingen af vanddamp og tør luft til fugtig luft.

2.8 Molbrøk

I modsætning til de måleenheder, vi har behandlet indtil nu, er molbrøken en direkte sammenligning af vanddampen og den tørre luft, dvs. de dele, der tilsammen udgør den fugtige luft. Ser man på Figur 9, er molbrøken for vanddamp i blandingen, x_v , således:

Ligning 5

$$x_v = \frac{48}{105}$$

og molbrøken for den tørre luft i blandingen, x_l :

Ligning 6

$$x_l = \frac{57}{105}$$

En vigtig egenskab ved molbrøken er, at summen af alle blandingens indgående molbrøker altid er lig med 1. Fra vores eksempel ses:

Ligning 7

$$x_v + x_l = \frac{48}{105} + \frac{57}{105} = 1$$

2.9 Blandingsforhold

Blandingsforholdet efter vægt er forholdet mellem vanddampens masse og massen af den tørre luft:

Ligning 8

$$r_m = \frac{m_v}{m_l} = \frac{M_v}{M_l} \cdot \frac{x_v}{x_l}$$

M_l er molmassen for tør luft = 28,9645 [g/mol]. Blandingsforholdet efter volumen kan findes af:

Ligning 9

$$r_v = r_m \cdot \frac{M_l}{M_v} = r_m \cdot 0,62198$$

Ved lave koncentrationer bruges ofte "ppm_w" (parts per million efter vægt) og "ppm_v" (parts per million efter volumen). Begge dele fremkommer ved at gange blandingsforholdet (r_m eller r_v) med 10^6 .

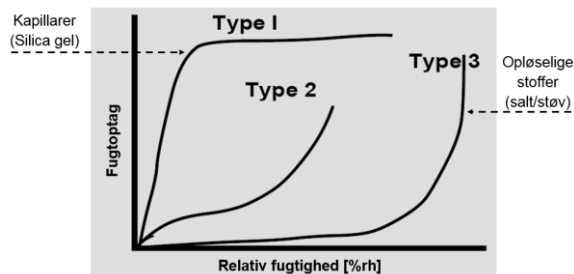
3 Fugt og materialer

Ygros er græsk og betyder fugtigt eller vådt. Et materiale, som har tendens til at optage fugt, kaldes hygroskopisk. Nogle eksempler på hygroskopiske materialer er givet nedenfor:

- Træ
- Salte
- Cement
- Fødevarer
- Polymermaterialer (plastic/gummi)

Faktisk er alle materialer, undtagen glas og metaller, hygroskopiske til en vis grad.

Hygroskopiske materialer opdeles ofte i 3 grundlæggende typer, alt efter forløbet af deres fugtoptag som funktion af den omgivende relative fugtighed.



Figur 10: Fugtoptag i forskellige typer hygroskopiske materialer.

- Type 1 ses typisk for porøse materialer med meget små porer (kapillarer). Eksempler er "Silica gel" og **keramer** som "Molecular sieve" med porerestørrelser på få nanometre. Disse materialer bruges ofte som tørremidler, da de optager meget fugt allerede ved lav relativ fugtighed.
- Type 2 omfatter de fleste faste materialer, som ikke har små porer, og som ikke er direkte opløselige i vand. Eksempler er **polymerer**, træ og mange fødevarer.
- Type 3 ses for stoffer og materialer som er opløselige i vand, f.eks. salte.

Fugtoptag kaldes også for "sorption". Det dækker over den samlede mængde af:

- Adsorption, fugtoptaget på overfladen af materialet.
- Absorption, fugtoptaget i selve materialet.

Fugtoptaget ændrer det hygroskopiske materiales egenskaber, f.eks.:

- Størrelse
- Masse
- Hårdhed
- **Friktionskoefficient**
- Varmeledningsevne
- Elasticitet
- Brydningsindeks
- **Relativ permittivitet** (dielektricitetskonstant)

Som eksempel viser Figur 11 fugtoptaget i en såkaldt superabsorberende polymer, formet som en dinosaur (et almindeligt stykke legetøj). På fotoet til venstre er dinosaurussen tør og neddyppes herefter i vand, hvilket svarer til at placere den i luft med en relativ fugtighed på 100 %. På fotoet til højre har den ligget neddyppet i vandet i 2 uger.



Figur 11: Fugtoptag i superabsorberende polymer.

Eksemplet er ekstremt, men viser tydeligt ændringen af flere materialeegenskaber på grund af fugtoptaget. For bare at nævne nogle stykker er størrelsen og massen blevet mere end fordoblet (dvs. forøget med over 100 %). Overfladen er blødere og glattere, selv efter grundig aftørring (men føles ikke våd). Det er vigtigt at forstå, at vandet ikke er optaget som i en svamp, nemlig i små hulrum og porer, men i selve polymerens molekylestruktur. Man kan derfor heller ikke umiddelbart vride vandet ud af den eller på anden måde forcere tørring ad mekanisk vej. Hvis man vil tørre den igen, skal den placeres et sted med lav relativ fugtighed, og man må derefter vente minimum 2 uger. Alle polymerer opfører sig i princippet som dinosaur, men de fleste i (meget) reduceret omfang. Eksempler på fugtoptag (ved mætning) i nogle polymerer er vist nedenfor [3]:

- N6, Polyamid ("Nylon") = 2,00 %.
- PVC, Polyvinylchlorid = 0,40 %.
- PI, Polyimid (Kapton®) = 0,40 %.
- PTFE, Polytetrafluoroetylen = 0,01 %.

Fugtoptag i materialer tager normalt lang tid, meget afhængigt af materialets dimensioner (tykkelse). Uger og måneder er almindeligt, før der opnås mætning i forhold til omgivelserne, og år er ikke ualmindeligt for eksempelvis metertykke cementblokke. En tommelfingerregel [4] siger, at materialetykkelsen ikke bør overstige 1 mm, når man tester vandoptaget i polymerer, ellers kommer testen let til at overstige 1 uge.

4 Måling af luftfugtighed

Måling af luftfugtighed kaldes hygrometri, og til dette anvendes et hygrometer. I det følgende vil vi se nærmere på, hvordan forskellige hygrometre virker.

4.1 Måleprincipper

De tre mest almindelige hygrometre er baseret på følgende måleprincipper:

- Kondensation af vand på en blank metaloverflade der afkøles til dugpunktet – Spejlhygrometer (måler dugpunktstemperatur, **T_d**).
- Vandoptag i/på et hygroskopisk materiale – Impedanshygrometer (måler relativ fugtighed, **%rh**).
- Afkøling ved fordampning af vand fra en våd væge – Psykrometer (måler afkøling i forhold til omgivelsestemperaturen, **T - T_w**).

Udover ovenstående måleprincipper findes også:

- Vejning af den fugtige lufts bestanddele (vanddamp og tør luft) – Gravimetrisk hygrometer (måler blandingsforhold, **r**).
- Måling af strømforbrug i **elektrolytisk** proces – Elektrolytisk hygrometer (måler absolut fugtighed, **d** og blandingsforhold, **r**).
- **Spektroskopisk**, absorption af lys – Spektrometer (måler absolut fugtighed, **d** og blandingsforhold, **r**).
- Dimensionsændring af materialer – "Hår" hygrometre (måling af **%rh**).
- Og mange flere....

4.2 En vanskelig disciplin

Måling af luftfugtighed er ikke så ligetil, som mange tror, og det viser sig ofte, at selv de bedste hygrometre i praksis ikke måler nøjagtigt nok til en given opgave. Her adskiller fugtverdenen sig meget fra eksempelvis temperaturverdenen, især når det gælder høje relative fugtigheder. Vil man f.eks. kontrollere en testkondition på $40 \pm 2^\circ\text{C}$ og $93 \pm 2\% \text{rh}$ i et klimakammer, vil man i dag med et instrument til ca. 500 – 1000 kroner kunne klare temperaturmålingen med en nøjagtighed på ca. $\pm 0,2^\circ\text{C}$, dvs. 10 gange bedre end kravet til testkonditionen. For fugten derimod er den

bedste nøjagtighed hos de nationale metrologiinstitutioner i verden, med udstyr til flere millioner kroner og videnskabeligt personale, ca. $\pm 0,5\% \text{rh}$ eller kun omkring 4 gange bedre end kravet til testkonditionen. Det kan umiddelbart være svært at genfinde ovenstående problematik, når man kigger i datablade for forskellige hygrometre. Her opgives der ofte målenøjagtigheder i størrelsesordenen $\pm 1-2\% \text{rh}$, altså ikke langt fra det bedst opnåelige. Kigger man lidt nærmere, vil man dog normalt finde ud af, at den fine målenøjagtighed kun gælder for et mindre måleområde, typisk omkring stuetemperatur og 10 – 90 %rh.

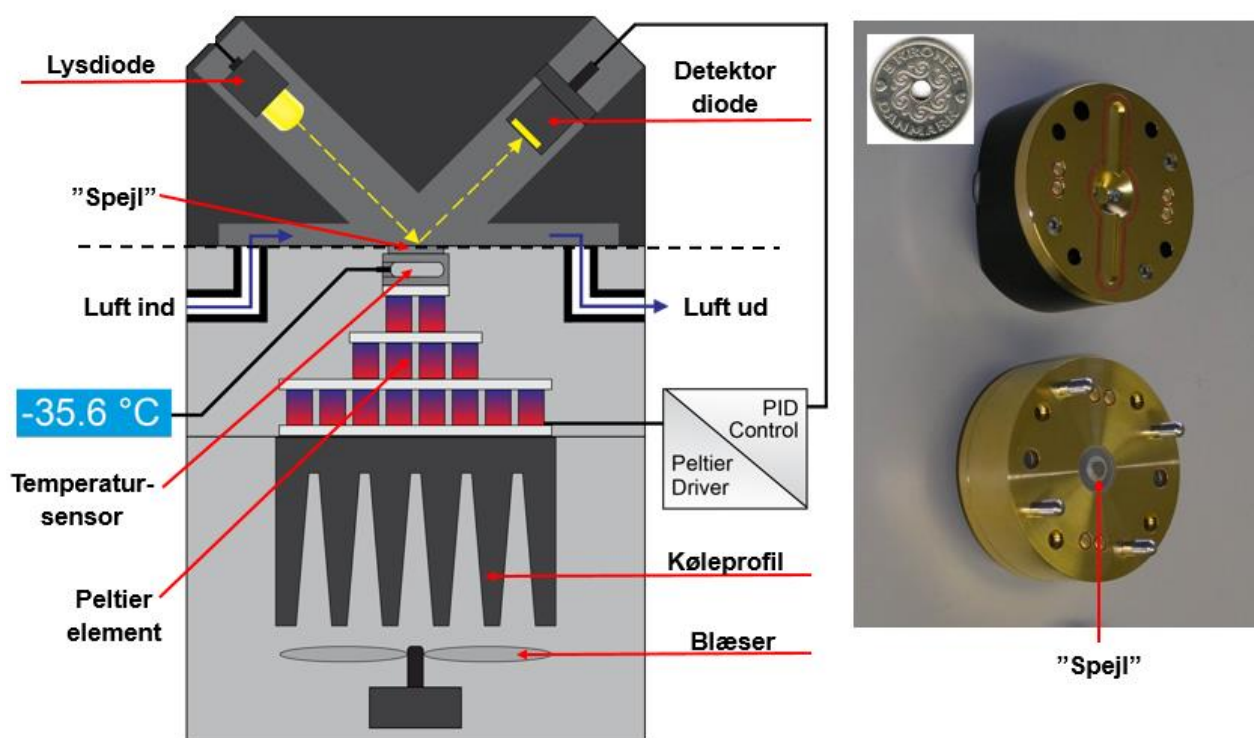
4.3 Spejlhygrometret



Figur 12: Spejlhygrometer der typisk anvendes som referencemåleinstrument. Gengivet med tilladelse fra MBW Calibration Ltd.

Spejlhygrometret kaldes også et dugpunktshygrometer. Det måler nemlig dugpunktstemperaturen, **T_d**.

I et spejlhygrometer suges en mindre mængde (typisk 0,3 til 0,7 l/min.) af den luft, der skal måles på, forbi en lille blankpoleret metaloverflade (et "spejl"). Temperaturen af spejlet styres af et såkaldt "**Peltierelement**" der er monteret på undersiden af spejlet og er i stand til både at køle og varme. Peltierelementet styres igen af et optisk system, der måler, om der er kondens eller ej på spejloverfladen. Samtidig måles spejlets temperatur af en præcisionstemperatursensor (typisk af Pt100 typen). På Figur 13 ses både en principskitse af målecellen i et spejlhygrometer og et eksempel på en rigtig målecelle.

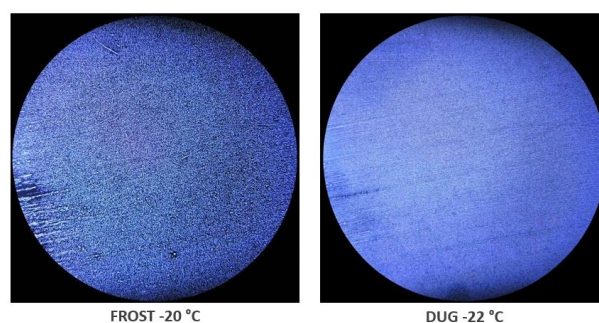


Figur 13: tv.: Principskitse af målecellen i et spejlhygrometer, th.: Rigtig målecelle fra et spejlhygrometer (øvre og nedre del, svarende til hver sin side af den stiplede linje på principskitsen). Gengivet med tilladelse fra MBW Calibration Ltd.

Det optiske system skal være hurtigt og nøjagtigt nok til at holde spejlets temperatur lige på det rette punkt, hvor der er ligevægt mellem dannelsen og fordampningen af dug. Denne dynamiske ligevægt er også omtalt i afsnit 2.2.

De bedste spejlhygrometre kan måle dugpunkter/frostpunkter i området -95 til +95 °C med en målesikkerhed på omkring $\pm 0,1$ til $0,2$ °C. Dette kræver dog en erfaren bruger, der kan undgå de forskellige mulige faldgruber. Det er især området under 0 °C ned til ca. -40 °C, der kan være svært at håndtere. Her kan kondensatet på hygrometrets spejl være både underafkølet vand eller is (se Figur 6). Ligevægten kan således enten været et "dugpunkt" eller et "frostpunkt", og deres temperatur er forskellige ved samme luftfugtighed. Nogle spejlhygrometre har en indbygget funktionalitet, hvor spejlet ved måling af et dugpunkt under 0 °C fryses ned under ca. -40 °C. Herefter måles automatisk videre med frost på spejlet, dvs. den stabile fase. For andre spejlhygrometre uden denne funktion, må man sikre sig ad optisk vej, om spejlet er dækket af iskrystaller eller vanddråber. Det foregår normalt med et indbygget endoskop som peger mod spejloverfladen. Figur 14 viser en

spejloverflade set igennem et endoskop. Som det ses ligner de to faser hinanden meget, og det kræver en vis erfaring at skelne imellem dem. Begge overflader er dannet ved samme luftfugtighed (med et damptryk på ca. 104 Pa). Temperaturforskellen imellem frostpunktet og dugpunktet er dog hele 2 °C, som kan betyde en hel uacceptabel fejl i mange målesituationer.



Figur 14: Overflade af spejl ved hhv. frostlag og duglag (underafkølet vand). Gengivet med tilladelse fra MBW Calibration Ltd.

4.3.1 Fordele og ulemper

Spejlhygrometret er nok det bedste kommercielle fugtmåleinstrument, der fås, både hvad angår præcision og langtidsstabilitet. Hvis man passer godt på

det, kan man opnå en drift på mindre end $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($10\text{ m}^{\circ}\text{C}$) pr. år. Af samme årsag anvendes spejlhygrometret ofte som referenceinstrument på bl.a. metrologi- og meteorologiske institutter. Men man bør primært opfatte spejlhygrometret som et laboratorieinstrument. Følgende punkter gør det uegnet til "almindelige/industrielle" målinger:

- For at opnå tilfredsstillende resultater skal luften, der måles på, være ren (fri for f.eks.: sod, støv, dråber og andre partikler). Selvom luften er rimelig ren, skal spejlet renses jævnligt (med vatpinde). Typisk hver tredje dag og i hvert fald inden en ny måleserie påbegyndes.
- Spejlhygrometret egner sig generelt ikke til måling i korrosive gasser, da der er flere kritiske punkter på måleluftens vej igennem instrumentet (eksempler er: spejl, pumpe, flowmeter, trykmåler mm.).
- Hvis man måler dugpunkter, som er over omgivelsetemperaturen, skal hele måleluftens vej igennem instrumentet være opvarmet til over denne temperatur, ellers opstår der kondens i instrumentet. Typisk anvendes en overtemperatur på $10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Responstiden er forholdsvis lav (få minutter) ved dugpunktsmålinger over $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Helt anderledes ser det ud for frostpunkter, hvor måletiden ved $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ er omkring 15 minutter og flere timer ved $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Til sidst skal det nævnes, at det kræver et ekstra termometer, hvis man vil måle relativ luftfugtighed (%rh) med et spejlhygrometer. Hertil skal man nemlig bruge både dugpunktstemperaturen, T_d , og lufttemperaturen, T . Derfor leveres mange spejlhygrometre med et ekstra "frit" termometer.

4.4 Impedanshygrometer (resistivt eller kapacitivt)

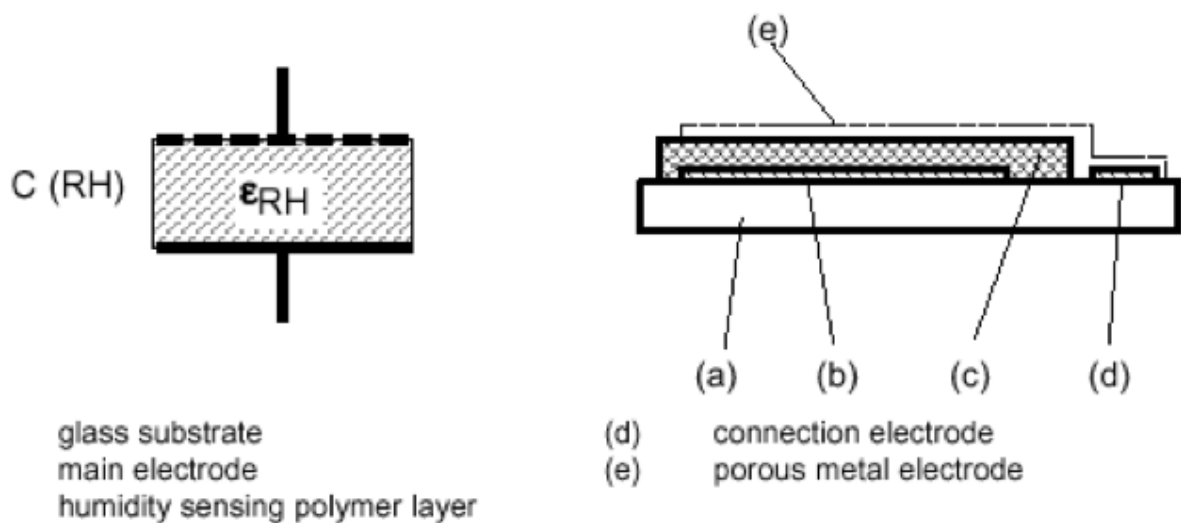


Figur 15: Eksempler på håndholdte impedanshygrometre med visning af relativ luftfugtighed temperatur.

Impedanshygrometre kan være enten **resistive** eller **kapacitive**.

Hygrometre med resistive fugtsensorer kan normalt ikke tåle kondens, og selvom der hele tiden udvikles bedre typer, er udvalget at gode hygrometre med resistive sensorer yderst lille. Fokus i dette undervisningselement er derfor på hygrometre med kapacitive sensorer.

En kapacitiv fugtsensor består af et hygroskopisk materiale (**dielektrikum**) placeret imellem to elektroder, hvilket danner en kondensator. Dielektrikummet er normalt, som illustreret i Figur 16, en polymer (f.eks. polyimid = Kapton®) eller en **metaloxid** (eks. aluminiumoxid, Al_2O_3). For at skabe mekanisk stabilitet benyttes et substrat (understøttende materiale), typisk glas, keramik eller silicium. Ovenpå substratet ligger først den ene elektrode, derefter dielektrikummet og øverst den anden elektrode. Den øverste elektrode er lavet perforeret, så den fugtige luft kan slippe igennem den og ned til dielektrikummet. Metaloxid benyttes primært som dielektrikum ved måling af meget lave fugtigheder, hvorimod polymer anvendes i hele området $0\text{--}100\text{ \%rh}$.



Figur 16: Typisk opbygning af kapacitiv polymersensor.

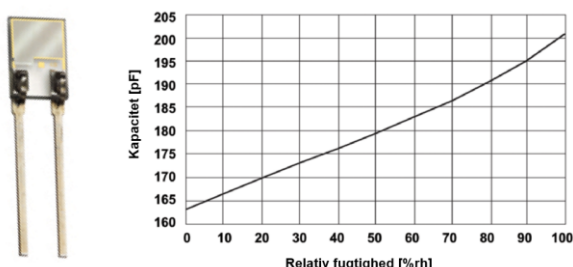
Sensorens kapacitet som funktion af den relative fugtighed, her benævnt $C(RH)$, kan findes af:

Ligning 10

$$C(RH) = \frac{\epsilon_{RH} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}$$

hvor ϵ_{RH} er den relative permittivitet (eller dielektricitetskonstanten) for polymeren ved en given relativ fugtighed, ϵ_0 er **vakuumperrmittiviteten**, A er elektrodearealet, og d er afstanden imellem elektroderne.

ϵ_{RH} stiger med vandoptaget i polymeren, fordi den relative permittivitet (ϵ_r) er højere for vand end for polymeren. For eksempel er ϵ_r ca. 3,5 for polyimid (Kapton®), men ca. 80 for vand (begge ved stuetemperatur). Da vandoptaget i polymeren stiger nogenlunde proportionalt med den relative fugtighed, bliver sensorens kapacitet som funktion af den relative fugtighed $C(RH)$ tilnærmelsesvis en ret linje – se Figur 17.



Figur 17: Venstre: Eksempel på kapacitiv polymersensor. Højre: Eksempel på karakteristik for en kapacitiv polymersensor.

Den nominelle kapacitet (ofte opgivet ved 50 %rh og 25 °C) ligger normalt omkring 100 – 500 pF, og følsomheden er typisk 0,2 – 0,5 pF / %rh. En så lav kapacitet sætter en praktisk begrænsning for længden af sensorens tilledninger, typisk på omkring 3 m. Årsagen er tilledningernes egenimpedans.

Selv med state-of-the-art produktion er det normalt ikke muligt at lave kapacitive sensorer tilstrækkeligt ens. I de fleste tilfælde kalibreres alle nye sensorer derfor fra fabrikken, så en efterfølgende individuel justering eller korrektion er mulig.

Vandoptaget i en polymer som funktion af den relative fugtighed falder en smule med temperaturen. Dertil kommer, at ϵ_r for vand også falder ved stigende temperatur (ϵ_r er ca. 55 ved 100 °C). En kapacitiv fugtsensor, der ikke er temperaturkompenseret, vil derfor typisk vise for lavt ved højere temperaturer.

Grundlæggende måler en kapacitiv fugtsensor relativ fugtighed, men man finder den af og til omtalt som en dugpunktssensor. Årsagen til dette er formodentligt, at en dugpunktsmåling normalt betragtes som værende finere (mere nøjagtig) end en relativ fugtmåling. Dette skyldes sikkert en ubevidst sammenligning med det meget nøjagtige dugpunktshygrometer (spejlhygrometer). Målingen fra en kapacitiv sensor skal dog altid suppleres med en temperaturmåling (ideelt set samme sted) for at muliggøre en beregning af dugpunkt og evt. absolut fugtighed.

Da lufttemperaturen på flere måder er en relevant parameter i forbindelse med fugtmåling og samtidig kan

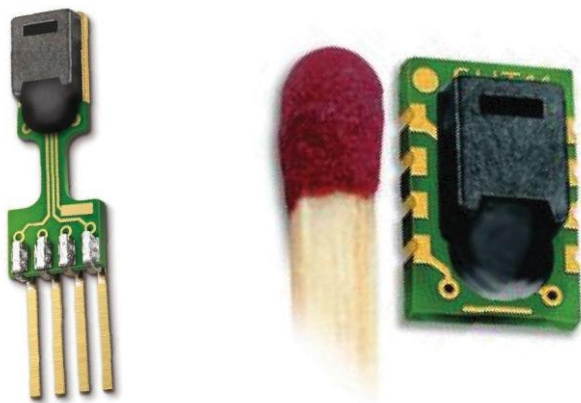
bruges til temperaturkorrektion, vil man i fugtmåleinstrumenter med kapacitive sensorer næsten altid også finde en temperatursensor. Et eksempel på dette er vist på Figur 18.



Figur 18: Fugtmåleprobe uden beskyttelseshætte.
Øverst: Temperatursensor (gråsort).
Nederst: Kapacitiv fugtsensor (inde i hvid filt).

4.4.1 Alt-i-én sensorer

Målingen af fugtsensorens kapacitet, og eventuelt også temperatur, kræver i sig selv en del elektronik. Dertil kommer behovet for en mikrokontroller, som kan håndtere målinger og kommunikation, og hukommelse til eventuelle kalibreringsdata. Dette, sammenholdt med kravet om korte tilledninger, gør det oplagt at samle alt i én komponent. Et eksempel på dette er vist på Figur 19.

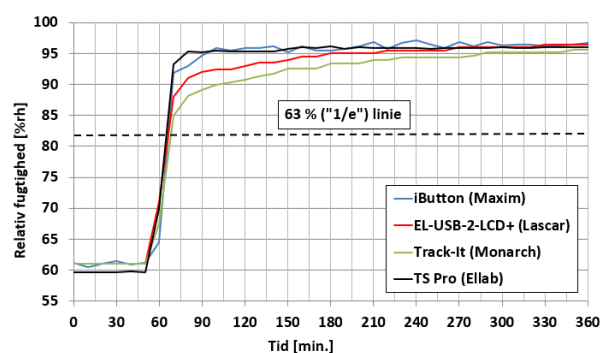


Figur 19: Digital humidity sensors fra Sensirion, indeholdende: temperatursensor, kapacitiv fugtsensor, måleelektronik og hukommelse.
Venstre: SHT7X (pin version). Højre: SHT1X (SMD version).

De viste sensorer kræver kun forsyningsspænding. Måleværdier for temperatur og relativ fugtighed er tilgængelige via en standard serial I²C bus (2 forbindelser).

4.4.2 Fordele og ulemper

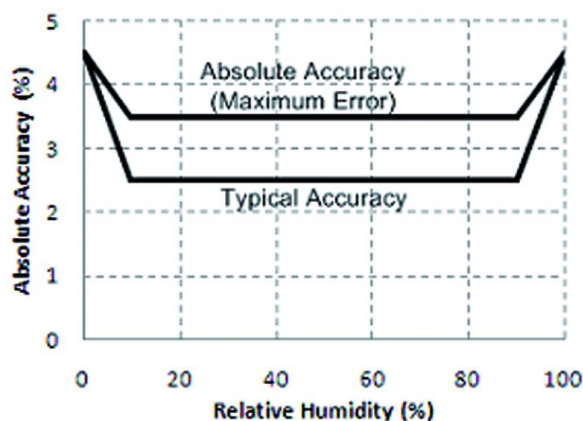
Umiddelbart ser impedanshygrometre med kapacitive sensorer ud til at være ideelle til de fleste målinger. De er relativt billige og har et forsvindende lavt strømforbrug og dermed minimal effektafsættelse. De er normalt specificerede til at kunne måle helt fra 0 til 100 %rh og ved temperaturer helt op til 200 °C. Responstiden ligger normalt i størrelsesordenen 30 til 60 sekunder for et 63 % spring i relativ fugtighed (63 % af aktuelt spring, ikke 63 %rh). Men kapacitive sensorer har ofte problemer med fugtmætning, især ved høje relative fugtigheder. Dette giver sig udslag i lange (reelle) responstider og såkaldt hysteresse.



Figur 20: Step-respons for fire forskellige hygrometre (data-loggere) ved et skift fra 60 til 95 %rh (25 °C).

Figur 20 viser step-respons for fire forskellige hygrometre (dataloggere) med kapacitive sensorer. Den stiplede linje på Figur 20 angiver det punkt, hvor måleværdien er indenfor 63 % af slutvisningen. EL-USB-2-LCD+ og Track-It har meget lange responstider. Hvis målingerne skal indenfor 3 %rh af slutvisningen, skal man generelt vente 3-6 timer, og helt op til 10 timer, for at komme indenfor 1-2 %rh. Helt anderledes er det med iButton og TrackSense Pro, der generelt måler lige så hurtigt eller hurtigere end de genererede ændringer. Af figuren kan det også ses, at alle loggerne har en fornuftig responstid op til 63 % af slutvisningen. Den store forskel imellem de fire logger viser sig først i den sidste del af indsvingningsforløbet. Man skal derfor være meget opmærksom på

specifikationen af responstiden, og ikke mindst tolkningen af denne for et givent impedanshygrometer. Hysteres dækker over det fænomen, at hygrometret måler forskelligt ved samme kondition afhængigt af forhistorien. Laver man eksempelvis en måling ved lav relativ fugtighed efterfulgt af en længere eksponering ved høj relativ fugtighed, vil man ved gentagelse af målingen ved lav relativ fugtighed se, at hygrometret nu indikerer højere relativ fugtighed. For capacitive sensorer er ændringen normalt reversibel, men hvor længe det varer, før visningen bliver normal igen, varierer meget fra sensor til sensor. Endelig kan en capacitive sensor have stor langtidsdrift, hvis den udsættes for miljøer med aggressive gasser eller kemikalier kombineret med høj relativ fugtighed. Den samlede nøjagtighed for et typisk impedanshygrometer med kapacitiv sensor er vist i Figur 21.



Figur 21: Typisk målenøjagtighed for impedanshygrometre med kapacitiv sensor.

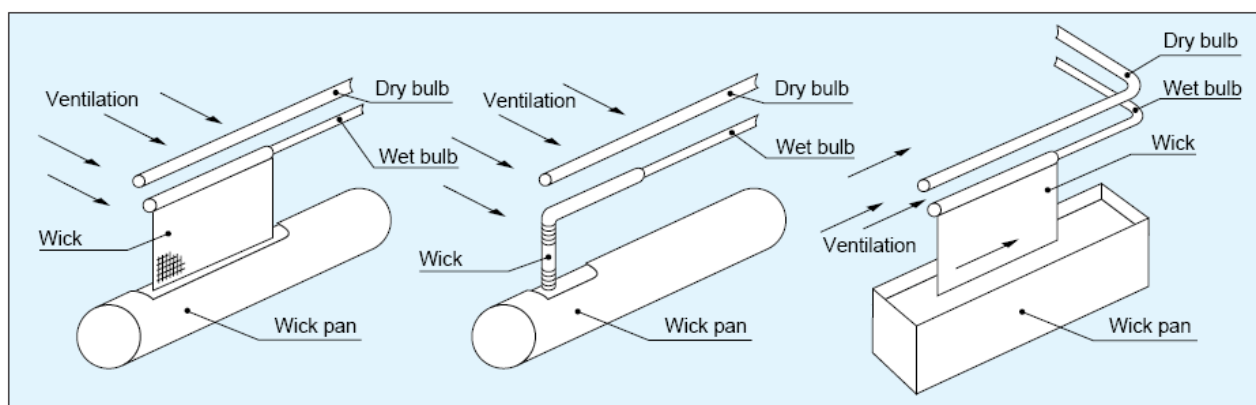
4.5 Psykrometret



Figur 22: To forskellige psykrometre med tilhørende måleelektronik.

Psykrometret, der kun sælges i få kommercielle udgaver, dækker området imellem spejlhygrometret og impedanshygrometret.

Psyko er græsk og betyder koldt, og det er netop det, et psykrometer gør, nemlig at måle kulde (afkøling). Psykrometret (se Figur 23) består af et "tørt" termometer (Dry bulb) og et "vådt" termometer (Wet bulb). Det tørre termometer måler ganske enkelt luftens temperatur (den "tørre" temperatur, T). Det våde termometer er dækket af en væge (Wick), som befugtes med vand, der enten suges fra et reservoir (Wick pan) eller automatisk sprøjtes på med jævne mellemrum. En blæser suger luft (Ventilation) henover den våde væge, hvorved vand fra vægen fordamper.



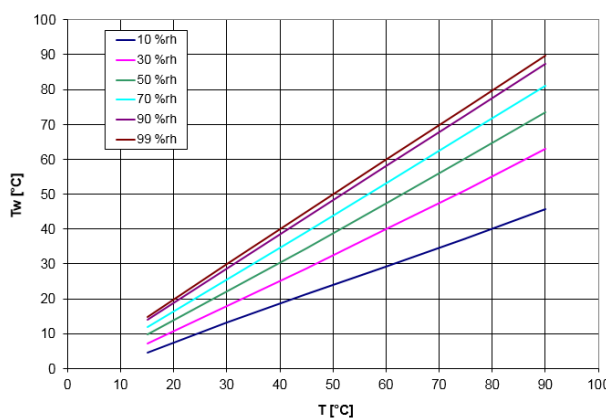
Figur 23: Typiske psykrometre anvendt i klimakamre (Espec, Weiss, Vötsch m.fl.)

Da fordampningen skaber kulde, afkøles den våde væge til en temperatur, der er lavere end luftens temperatur (den "våde" temperatur, T_w). Jo lavere den relative luftfugtighed er, jo lavere bliver den "våde" temperatur. Forskellen imellem de to temperaturer ($T - T_w$) kaldes den psykometriske differens. Den relative luftfugtighed (%rh) ved en given temperatur kan beregnes, når man har den psykometriske differens, luftens temperatur (den "tørre" temperatur, T) og (den "våde" temperatur, T_w). Beregningen udføres ved hjælp af den såkaldte psykometerligning:

Ligning 11

$$U[\%rh] = \frac{e_w(T_w) - A \cdot P \cdot (T - T_w)}{e_w(T)} \cdot 100$$

$e_w(T_w)$ og $e_w(T)$ er mætningsdamptrykkene ved hhv. den "våde" og den "tørre" temperatur. P er atmosfæretrykket i Pascal og A den såkaldte psykometerkonstant, der typisk ligger imellem $6,4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ og $6,8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. På den følgende figur ses sammenhængen mellem den "våde" temperatur, T_w , den "tørre" temperatur, T og den relative luftfugtighed.



Figur 24: Sammenhængen mellem den "våde" temperatur, T_w , den "tørre" temperatur, T og den relative luftfugtighed.

I et moderne psykrometer måles den "tørre" (T) og "våde" temperatur (T_w) med to stabile termometre (eksempelvis Pt100 typen). Beregningen af relativ luftfugtighed (%rh), ved brug af psykometerligningen, foregår typisk i noget tilhørende måleelektronik. Psykrometrets langtidsstabilitet er primært bestemt af termometrenes stabilitet, men også vægens montage, sugsevne og evt. forurening spiller en afgørende rolle. Vægen skal derfor udskiftes med jævne mellemrum. Endelig er psykometermålingen afhængig af det

absolutte atmosfæretryk (P), men det kan der korrigeres for, hvis det måles samtidigt (nødvendigt for meget præcise psykometermålinger).

4.5.1 Fordele og ulemper

Psykrometret hviler på kendte termodynamiske principper og har derfor tidligere været anvendt som referenceinstrument på bl.a. metrologi og meteorologiske institutter. Mange steder er det dog afløst af spejlhygrometre. Et velkonstrueret psykrometer kan have en samlet måleusikkerhed i størrelsesordenen $\pm 1\text{--}2 \text{ } \%rh$ i et måleområde på $10\text{--}100 \text{ } \%rh$ ved 0 til $100 \text{ } ^\circ\text{C}$. Heraf udgør langtidsstabiliteten typisk $< 0,5 \text{ } \%rh / \text{år}$. I modsætning til impedanshygrometret måler psykrometret bedst ved høje relative luftfugtigheder og høje temperaturer. Det gør det interessant som sensor i klimakamre til udførelse af fugttest, hvor der netop testes ved høj temperatur og fugtighed. Derudover har psykrometret en typisk responstid på under 1 min. , hvilket er det laveste for de tre hygrometertyper beskrevet her. Endelig kan psykrometret være det eneste fornuftige valg, hvis man skal måle i miljøer med høje koncentrationer af aggressive gasser, eks. SO_2 , H_2S m.fl.

Psykrometrets ulemper er mest af praktisk natur og inkluderer:

- Vægen skal udskiftes ca. hver anden uge (ved konstant måling).
- Vægen skal have konstant forsyning af destilleret vand.
- Psykrometret kan normalt ikke måle under $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, da forsyningen af vand (som is) er svær at få til at fungere i praksis. Selve psykometerprincippet virker dog stadigvæk fint under $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, men konstanten A i psykometerligningen skal ændres fra ca. $6,6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ til $5,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ for at give retvisende resultater.
- Psykrometret påvirker sine omgivelser med afgivelse af vanddamp fra den våde væge, og dens ventilator skaber forstyrrelse af den omgivende luft.

5 Terminologi indenfor hygromettermåling

I det følgende forklares nogle af de begreber, der erfaringsmæssigt har vist sig at give anledning til flest spørgsmål i forbindelse med fugtmåling og tolkning af datablade for hygrometre.

5.1 Kalibrering

Kalibrering udføres ved en sammenligning med et mere nøjagtigt hygrometer, hvis visningsfejl er kendt. De mest nøjagtige kalibreringer foretages vha. normaler (referencehygrometre), der med en vis usikkerhed repræsenterer en måleenhed. For luftfugtighed er de mest præcise normaler, de såkaldte primære realisationsmetoder, det gravimetriske hygrometer (måler massen af vanddamp i en given fugtig luftmasse) og dugpunktsgeneratoren. Det næstbedste er et spejlhygrometer, som er kalibreret ved sammenligning med en primær normal. Bemærk, at ordet kalibrering ofte bruges til også at inkludere justering (f.eks. kalibrering af et joysticks midterposition). Dette er dog forkert i henhold til den vedtagne definition.

5.2 Justering

Justering af et hygrometer gøres normalt for at opnå den mindst mulige visningsfejl, typisk ud fra resultaterne af en forudgående kalibrering. Tidligere blev justering af elektroniske hygrometre ofte foretaget ved, at man drejede på en lille skrue (*potentiometer*). Dette er senere blevet erstattet af softwarejustering, som i øvrigt ofte meget misvisende kaldes for softwarekalibrering. Da kalibreringen altid vil være behæftet med en vis usikkerhed, kan man aldrig justere et hygrometer, så det kommer til at vise helt rigtigt. Det kan også være svært at justere godt nok, hvis visningsfejlen ikke følger en funktion, som umiddelbart kan implementeres i instrumentets software. Ofte er elektronikken i hygrometre meget begrænset, både hvad angår regnekraft og hukommelse. I nogle tilfælde vælges det at undlade justering af instrumentet, og i stedet korrigeres visningen ud fra en tabel eller et regneark.

5.3 Fejl, usikkerhed og nøjagtighed

I traditionel fejlteori forsøges det at opdele fejl i forbindelse med målinger i systematiske fejl og tilfældige fejl. De systematiske fejl er egentlige fejl på målingerne, og de tilfældige fejl er ikke virkelige fejl, men tilfældige afvigelser fra den sande værdi. Ideelt set skulle man derfor efter en kalibrering kunne justere eller korrigere et hygrometer helt for systematiske fejl og anvende statistik til at beskrive størrelsen af de tilhørende tilfældige fejl. Da de tilfældige fejl dermed med denne opdeling indeholder det, man er usikker på, kunne man vælge at kalde dem usikkerhed. Det viser sig dog at være umuligt helt at holde denne opdeling i praksis. Nogle fejlbidrag kan være mere eller mindre systematiske/tilfældige, og i nogle tilfælde kan det være meget uhensigtsmæssigt at skulle justere eller korrigere for systematiske fejl, hvis de for eksempel ændrer sig langsomt med tiden. Derfor har man valgt at udvide usikkerhedsbegrebet lidt, så det også kan inkludere systematiske fejl, hvis blot de er fornuftigt afgrænsede (minimum og maksimum). Det gælder dog stadig om, så godt som muligt, at holde de rigtige systematiske fejl (der nu blot kaldes fejl eller bias) adskilte fra usikkerhed.

Usikkerhed bruges mest indenfor kalibreringsverdenen, hvor det normalt er underforstået, at alle hygrometre naturligvis har en (systematisk) visningsfejl. Den kan man finde ved passende kalibrering og i øvrigt justere eller korrigere for, hvis det skulle være nødvendigt.

Nøjagtighed bruges meget i procesindustrien og datablade for hygrometre. Her er det underforstået, at ethvert hygrometer naturligvis er justeret ind (kalibreret) efter bedste evne, og at de resterende mere eller mindre systematiske/tilfældige fejl er inkluderet i nøjagtigheden. Dermed kan man sige, at nøjagtigheden inkluderer både usikkerheden og eventuelle systematiske fejl, som man ikke har kunnet justere væk. Der er dog langtfra enighed om tolkning af begrebet nøjagtighed.

6 Referencer og litteratur-henvisning

- [1] A. Wexler, Humidity and Moisture, Measurement and Control in Science and Industry, 1965
- [2] The Institute of Measurement and Control, A Guide to the Measurement of Humidity, 1996
- [3] J. D. Muzzy, Thermoplastics – Properties, Georgia Institute of Technology
- [4] B. Duncan, J. Urquhart and S. Roberts, Review of Measurement and Modelling of Permeation and Diffusion in Polymers, National Physical Laboratory, 2005

Appendix 1 Ordliste

Adiabatisk ekspansion	Ekspansion (af en gas) uden udveksling af varme med omgivelserne.
Daltons lov	Daltons lov siger, at det totale tryk af en blanding af (ideelle) gasser er lig med summen af partialtrykkene (deltrykkene) af de gasser, der er i blandingen, hvis de hver især optog det samme volumen ved den samme temperatur.
Dielektrikum	Et fysisk legeme karakteriseret ved dets permittivitet ϵ og dets permeabilitet μ . Det er en elektrisk isolator, der dog kan polariseres af et påført elektrisk felt.
Elektrolytisk	Kemisk omdannelse af et stof ved hjælp af elektricitet.
Friktionskoefficient	Forholdet imellem friktionskraft og trykkraft for to legemer, der gnider mod hinanden.
Intermolekylære kræfter	Kræfter imellem atomer og molekyler, som ikke holdes sammen af kemiske bindinger.
Kapacitive	Fungerer ved ændringer i elektrisk kapacitet.
Keramiker	Keramiske (ikke metalliske) materialer, eks.: cement, beton, tegl, kakkel, glas mm.
Maxwells hastighedsfordeling	Statistisk fordeling af molekylhastigheder i gasser. Se også: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/kintem.html
Metaloxid	Kemiske forbindelser imellem et metal og ilt.
Peltierelement	Også kaldet en termoelektrisk køler (på engelsk "TEC" Thermoelectric cooler). Elektronisk komponent der kan blive kold på den ene side og varm på den anden, når der løber en strøm igennem den. Effekten blev opdaget af den franske fysiker Jean Charles Athanase Peltier 1834.
Polymerer	Fra Wikipedia.org: "En polymer er en naturlig eller syntetisk forbindelse med høj molekylvægt, som er dannet ved sammenføjning af op til flere milliarder identiske eller i hvert fald sammenlignelige enheder (monomer)". Polymerer kaldes i daglig tale også for "plastic".
Potentiometer	Variabel modstand (for et bestemt modstandsinterval), typisk med en skrue, så modstanden kan justeres med en skruetrækker.
Relativ permittivitet	Egenskab ved et dielektrisk materiale, som udtrykker materialets evne til at frembringe en elektrisk fluxtæthed (D).
Resistive	Fungerer ved ændringer i elektrisk resistans (modstand).
Spektroskopisk	Fungerer ved anvendelse af spektroskopi. Spektroskopi er måling og studie af spektre fra materialer. Et spektrum fra et materiale betyder normalt fordeling af intensitet som funktion af energien i de udsendte partikler (f.eks. elektroner eller fotoner).
Standardatmosfæretrykket	Internationalt vedtaget gennemsnitsværdi for atmosfæretrykket ved jordens overflade, 101325 Pa = 1 atmosfære.
Vakuumpermittiviteten	Permittivitet (se ovenfor) af det frie rum (vakuum). $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [Farad/meter].