Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap

Meten van het binnenklimaat

De voorbereiding

Meten van het binnenklimaat

De voorbereiding

Colofon
Auteurs: Bart Ankersmit en Marc Stappers
Tekstredactie: VU-Taalcentrum
Afbeeldingen: Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, tenzij anders vermeld.
Aan deze uitgave kunnen geen rechten worden ontleend.

© Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, 2022

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed
Postbus 1600
3800 BP Amersfoort
www.cultureelerfgoed.nl

Inhoud

Lijst met gebruikte termen en afkortingen 6

Inleiding 8

Hoe komt het binnenklimaat tot stand? 11
Temperatuur en relatieve en absolute luchtvochtigheid 11
Temperatuur in de binnenruimte 12
Vocht in de binnenruimte 12
Relatieve luchtvochtigheid 13
Schillen en microklimaten 15

Stappenplan 19
STAP 1 - Waarom meten? 19
STAP 2 - Verzamelen van algemene informatie over de binnenruimte 19
STAP 3 - Wat meten? 20
Binnenklimaat 20
Meten van de oppervlaktetemperatuur 21
Oppervlaktemeting van de relatieve luchtvochtigheid 22
Meten van het vochtgehalte in muren en vloeren 22
Menselijk comfort 23
Meten van het ventilatievoud 23
Meten van de luchtsnelheid 23
STAP 4 - Waar meten? 24
Gemiddelde klimaatconditie in een ruimte 24
Lokaal afwijkend klimaat 24
Klimaatcondities bij de collectie 25
STAP 5 - Hoe meten? 25
Meetperiode 26
Tijdsinterval 27

Afsluitend 30

RCE-publicaties over het binnenklimaat 32

Bijlage 1 - De relatie tussen temperatuur, absolute luchtvochtigheid en relatieve luchtvochtigheid 34
Temperatuur en de maximale absolute luchtvochtigheid 34
Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid 34
Van mollierdiagram naar psychrometrische kaart 35

Hermann Naw
Spezialpapier- und
D-51688 Wipp
Tel.: 0 22 68 / 91 37-0
www.korrosionsschutzve
2 Sec.
DIN 55
MIL-PR
DEF ST
KM3 07
Scotch
testo 405

Lijst met gebruikte termen en afkortingen

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AV	Absolute luchtvochtigheid (g/kg of in kg/kg)
Binnenklimaat	De parameters temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in een ruimte
Exfiltratie	Het ongewenst en ongecontroleerd naar buitentreden van binnenlucht uit het gebouw
Fluctuatie	Ongecontroleerde verandering van een parameter in de tijd
Gradiënt	Verschil van een parameter over een afstand
Infiltratie	Het ongewenst en ongecontroleerd binnendringen van buitenlucht in het gebouw
Intervaltijd	De tijd tussen de momenten waarop het klimaat wordt geregisteerd
Microklimaat	Een van de ruimte klimatologisch gescheiden volume waarin een ander klimaat kan heersen
PvE	Programma van eisen
RV	Relatieve luchtvochtigheid (%)
Stratificatie	Verschil van een parameter over een hoogte
T	Temperatuur (°C)
Thermische massa	Het vermogen van een materiaal om warmte en koude op te nemen, een periode vast te houden en later afhankelijk van de ruimtetemperatuur weer af te geven
Variatie	Gecontroleerde verandering van een parameter in de tijd
Ventilatie	Gewenste en gecontroleerde uitwisseling van buiten- met binnenlucht
Ventilatievoud	Aantal malen per tijdseenheid dat het gehele luchtvolume als gevolg van ventilatie, infiltratie en exfiltratie wordt ververst
Zone	Een groep ruimten in een gebouw die wat betreft omgang en/of klimaat gelijkwaardig zijn

Foto pagina 5: De ventilatievoud van een afgesloten volume kan worden bepaald door de concentratie CO_2 kunstmatig te verhogen en vervolgens de afname in de tijd te registeren.

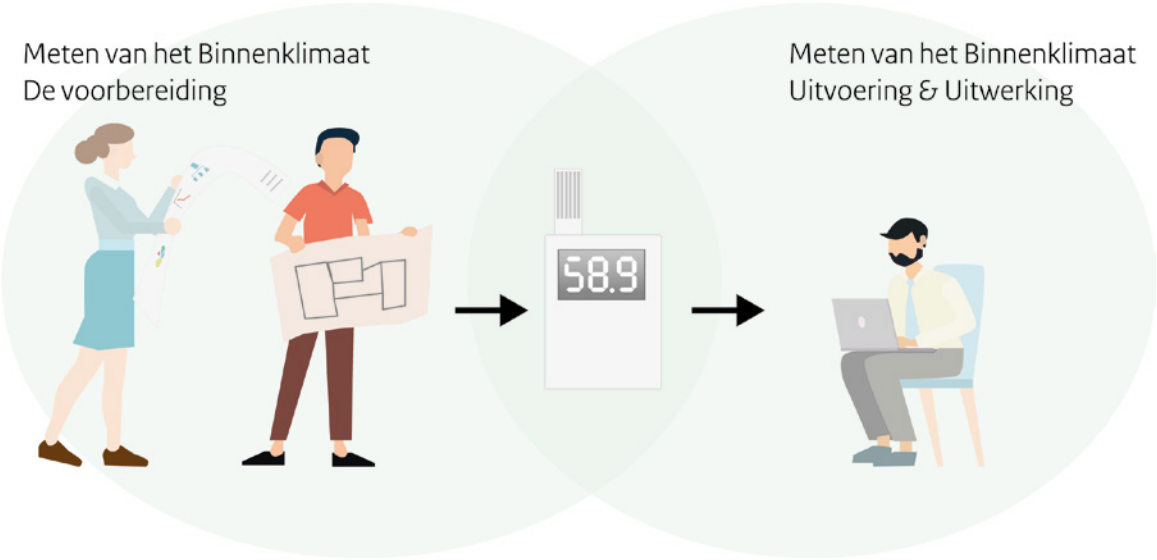
Inleiding

Deze informatiebrochure is ontwikkeld voor collectiebeheerders van erfgoedinstellingen die verantwoordelijk zijn voor het binnenklimaat. Met de brochure hoopt de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed inzicht te geven in verschillende aspecten van het meten van het binnenklimaat, zodat de metingen op een zinvolle wijze kunnen worden uitgevoerd.
De brochure richt zich op de achtergronden van het meten van het binnenklimaat en het opzetten van een meetplan. De Brochure 'Meten van het binnenklimaat, uitvoering en uitwerking wordt in 2023 verwacht en zal ingaan op de uitwerking en interpretatie van klimaatmetingen. Afbeelding 1 geeft schematisch de overlap weer van beide brochures.

De Rijksdienst adviseert musea, historische huizen, kerken en andere culturele instellingen al jaren het binnenklimaat te meten. De meetresultaten leiden vaak tot nieuwe inzichten over het gedrag van het gebouw, de klimaatrisico's voor de collectie en de effectiviteit van aanwezige apparatuur voor klimaatbeheersing. In veel ruimtes registeren dataloggers daarom quasi continu temperatuur (T) en relatieve luchtvochtigheid (RV).
Op deze manier wordt er veel geld en soms ook tijd besteed aan het registreren van het binnenklimaat. Dit is juist nu urgent, omdat veel musea worstelen met de vraag hoe een duurzaamheidsambitie te vertalen naar een verantwoorde behoudsambitie. Welke klimaatspecificaties moeten bijvoorbeeld worden nagestreefd?[1]
Een belangrijk uitgangspunt voor het antwoord op deze vraag is wat het klimaat in de huidige situatie is. Het al oude adagium 'Meten is weten' speelt hierin een cruciale rol, want met de kennis over het binnenklimaat kunnen behoudsstrategieën worden ontwikkeld die passen bij de duurzaamheidsambitie, de kennis in de erfgoedorganisatie en het beschikbare budget.
De praktijk wijst uit dat metingen uit het verleden lang niet altijd bruikbaar zijn. De metingen worden pas echt waardevol als deze op adequate wijze worden uitgevoerd, en als data worden verzameld vanuit een goed geformuleerde vraagstelling.

Klimaatgegevens die in het verleden zijn verzameld roepen tal van vragen op: waarom is gemeten? Waar is precies gemeten? Was het meetapparaat gekalibreerd? Vanwege deze onzekerheden wordt in de meeste gevallen besloten nieuwe klimaatmetingen uit te voeren en de oude data niet te gebruiken. Ook gebeurt het regelmatig dat collectiebeheerders databestanden aanleveren met verschillende intervaltijden en starttijden. Dit bemoeilijkt de vergelijking van gegevens buitengewoon en maakt deze soms zelfs onmogelijk.

[1] In de brochure 'Het binnenklimaat in het Programma van Eisen' worden aanzetten gegeven voor het beantwoorden van deze vraag. De brochure is te downloaden via de website van de Rijksdienst.



Afbeelding 1 Schematische weergave van hoe de twee brochures 'Meten van het binnenklimaat, de voorbereiding en de uitvoering en uitwerking' op elkaar aansluiten en deels overlappen.

Foto pagina 7: Met een klimaatsensor, die hier naast de schoorsteenmantel is geplaatst, wordt het klimaat in de ruimte geregistreerd. Op basis van de meting wordt de luchtbehandeling aangestuurd. Deze levert de geklimatiseerde lucht via de kanalen in de schoorsteenmantel aan de ruimte.

Het is dan ook essentieel om metingen zodanig in te richten dat dataverwerking later goed kan worden uitgevoerd. Daarover leest u meer in de brochure 'Meten van het binnenklimaat, uitvoering en uitwerking'.

Deze brochure presenteert een stappenplan waarmee een meetstrategie kan worden ontwikkeld. Dit zorgt ervoor dat betekenisvolle dataregistratie kan plaatsvinden en de gegevensanalyse kan worden uitgevoerd. Dit gebeurt in vijf stappen:

1. Waarom wil je het binnenklimaat meten?
2. Welke informatie is beschikbaar over het gebouw en de klimaatinstallaties?
3. Wat wil je precies meten?
4. Waar moet worden gemeten?
5. Hoe kan het best worden gemeten?

De bovenstaande stappen leiden tot een meetplan met een overzicht van welke metingen, op welke locatie, gedurende een bepaalde tijd plaats gaan vinden.

Dit meetplan dient als documentatie van de metingen en is een eerste aanzet om te rapporteren naar belanghebbenden over de meetresultaten.

Een aantal gerelateerde onderwerpen valt buiten het bereik van deze brochure. In de publicatie 'Klimaatwerk' staan onderwerpen als: welke materialen en constructies in onze museumcollecties zijn gevoelig voor een verkeerd binnenklimaat en welke mogelijkheden zijn er om controle over het binnenklimaat te krijgen. Een aparte brochure gaat dieper in op het complexe onderwerp van de interpretatie van meetgegevens om klimaatrisico's in te schatten. De publicatie 'Managing Indoor Climate Risks in Museums' verwijst naar maatregelen die genomen kunnen worden.

Deze brochure bespreekt eerst kort de wijze waarop het binnenklimaat tot stand komt, waarna deze dieper ingaat op de vijf stappen om te komen tot zinvolle klimaatmetingen.

SONDE 11
HANWELL
4000Series
20.1
52.8
www.the-imcgroup.com

Hoe komt het binnenklimaat tot stand?

Een gebouw is een fysieke scheiding tussen buiten- en binnenklimaat. De kwaliteit van de bouwschil bepaalt in welke mate en op welke wijze het buitenklimaat naar binnen wordt doorgegeven. Hierbij speelt beglazing een rol, maar ook warmte- en vochtisolatie, warmte- en vochtbuffering, ventilatie en mate van lekheid (infiltratie).

Om inzicht te krijgen in hoe het klimaat tot stand komt in een gebouw/ruimte, ligt het voor de hand om van buiten naar binnen te kijken. Hoe en in welke mate dringt de buitenlucht naar binnen? Veranderen de condities van deze lucht na binnenkomst? Is de temperatuur binnen anders dan buiten? Is er sprake van vochtafgifte of -opname (vochtbuffering) door het gebouw, interieur, collectie en/of bezoekers? Wordt de lucht actief be- en/of ontvochtigd, gekoeld en/of verwarmd? Inzicht in het gedrag van het gebouw, de inrichting, de installaties en in werkwijzen en procedures is noodzakelijk om te begrijpen hoe het binnenklimaat tot stand komt.

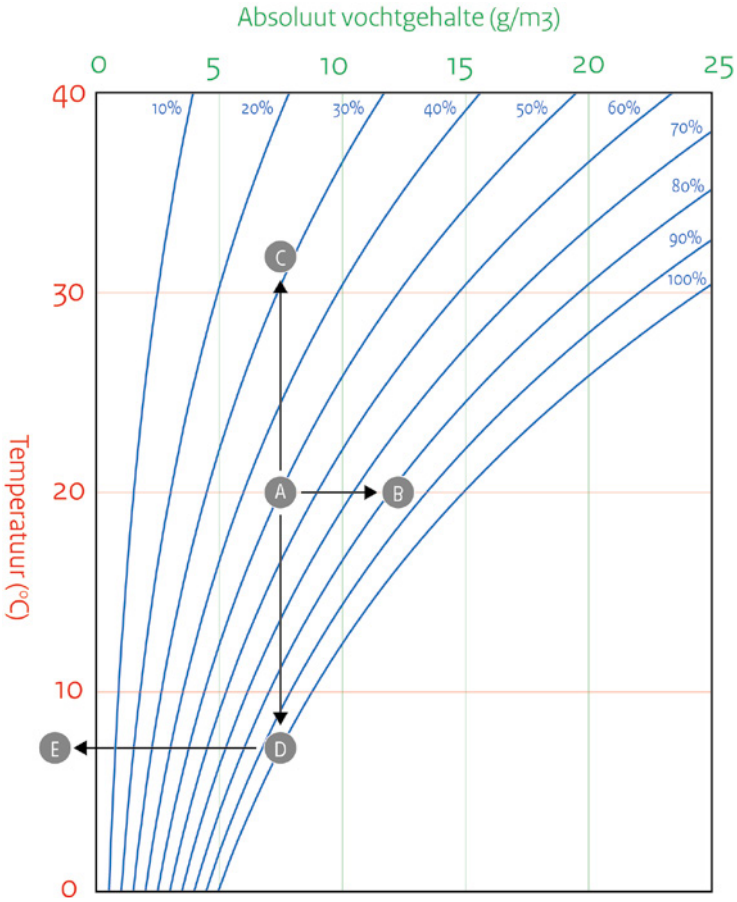
Temperatuur en relatieve en absolute luchtvochtigheid

Er zijn drie grootheden die het (binnen)klimaat karakteriseren: de luchttemperatuur (T), de absolute luchtvochtigheid (AH, uitgedrukt in g/m³ of g/kg), en de relatieve luchtvochtigheid (RH). De temperatuur en de absolute luchtvochtigheid zijn eigenschappen van lucht.

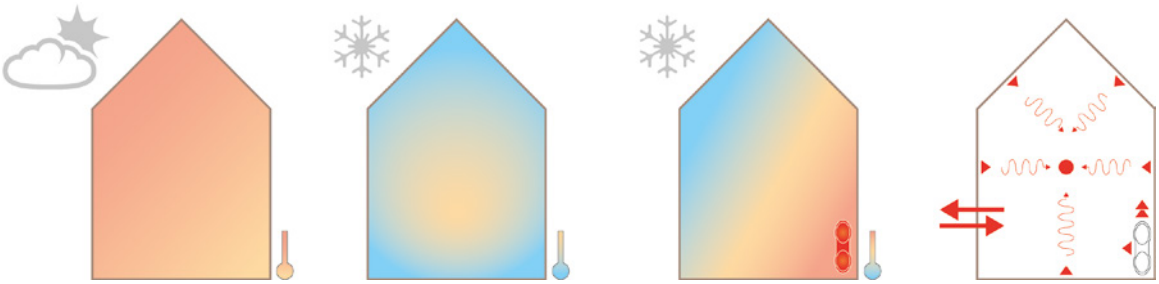
De moleculen in een kubieke meter lucht hebben een zekere temperatuur, en omdat een deel van die moleculen waterdamp is, heeft deze kubieke meter lucht een bepaalde absolute luchtvochtigheid. Het is belangrijk om te weten dat de temperatuur bepaalt wat de maximale absolute luchtvochtigheid (AV_{max}) kan zijn. Bij een hogere temperatuur is deze hoog en vice versa. Bijlage 1 gaat hier dieper op in.

De relatieve luchtvochtigheid is geen eigenschap van de lucht, want er zijn voor een bepaalde relatieve luchtvochtigheid meerdere combinaties van temperatuur en absolute luchtvochtigheid mogelijk. Een hoeveelheid lucht kan maar één temperatuur en één absolute luchtvochtigheid op een gegeven moment kan hebben.

De relatie tussen de temperatuur, absolute luchtvochtigheid en de relatieve luchtvochtigheid kan worden gevisualiseerd in een mollierdiagram. Het mollierdiagram toont bijvoorbeeld de veranderingen van de relatieve luchtvochtigheid door een veranderende temperatuur (met gelijkblijvend absoluut vochtgehalte) of een veranderende absolute luchtvochtigheid (met een gelijkblijvende temperatuur). Zo kan gezien worden dat relatieve luchtvochtigheid 50% bedraagt, als de luchttemperatuur 20°C is en de absolute luchtvochtigheid 8,7 g/m³ is (punt A in afbeelding 2). Als vervolgens de lucht wordt bevochtigd en de absolute luchtvochtigheid stijgt en de temperatuur gelijk blijft, dan stijgt de relatieve luchtvochtigheid (punt B in afbeelding 2). Maar als de lucht wordt verwarmd zonder dat vocht wordt toegevoegd, daalt de relatieve luchtvochtigheid juist (punt C in afbeelding 2). Bij een verlaging van de temperatuur met een gelijkblijvend absoluut vochtgehalte, stijgt de relatieve luchtvochtigheid (afbeelding 2, vanuit punt A naar punt D). De lucht kan een maximale hoeveelheid vocht bevatten, dan is de relatieve luchtvochtigheid 100% en zal condens op het oppervlak gevormd worden. De temperatuur waarbij dit optreedt, wordt de dauwpuntstemperatuur genoemd (punt E in afbeelding 2).



Afbeelding 2 Het mollierdiagram toont de relatie tussen de absolute luchtvochtigheid (x-as), de luchttemperatuur (y-as) en de relatieve luchtvochtigheid (blauwe kromme lijnen). Als de vochtigheid en/of de temperatuur van de lucht verandert, zal ook de relatieve luchtvochtigheid veranderen.



Afbeelding 3 Temperatuur is zelden uniform in een zone. In de zomer kan door bezonning één zijde van een gebouw bijvoorbeeld iets warmer zijn (links). In de winter zal de schil bijvoorbeeld 's nachts kouder zijn als er geen verwarming van de binnenlucht is (midden links). Als een verwarmingselement, zoals een radiator, wordt aangeschakeld, ontstaat een temperatuurgradiënt van warm naar koud (midden rechts). (rechts) De luchttemperatuur centraal in een zone (rode cirkel) is een gevolg van alle oppervlaktetemperaturen (rode driehoeken) in de ruimte, de warmteafgifte door convectie (dubbele rode driehoek) en de lucht die van buiten naar binnen gaat en omgekeerd (rode pijlen). Dit is de operatieve temperatuur.

Temperatuur in de binnenruimte

De ruimtelijke luchttemperatuur komt hoofdzakelijk tot stand door de temperatuur van de binnenkomende lucht, ventilatie en infiltratie, en warmteverlies en -winst door de kwaliteit van de bouwschil. Hierbij spelen met name de mate van isolatie en thermische massa voor warmte- en koudebuffering een rol (zie afbeelding 3).

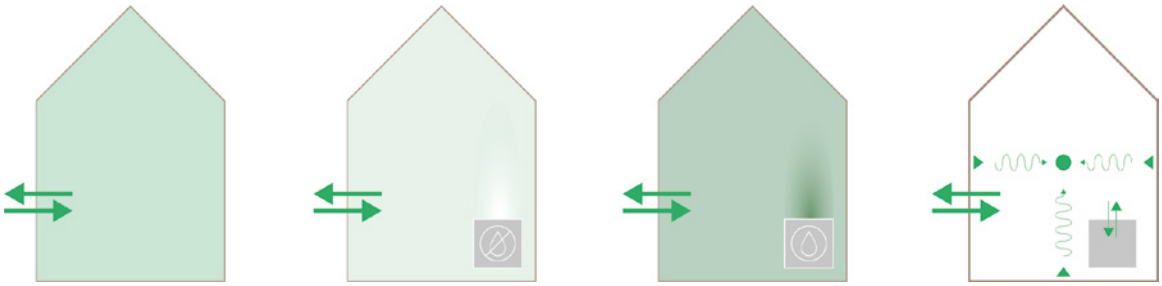
In tegenstelling tot moderne gebouwen hebben historische gebouwen een slecht geïsoleerde buitenschil, ondanks de soms dikke muren. Daar is de isolatiewaarde dus laag. Bij dunne muren betekent dat de zon en buitenluchttemperatuur makkelijker de binnenluchttemperatuur beïnvloeden, doordat de warmte makkelijk wordt doorgegeven. Gebouwen met dikke muren en weinig glasoppervlak, zoals kastelen en kloosters, hebben een grote thermische massa. De warmte van de zon en de buitenluchttemperatuur kunnen daardoor een bepaalde periode worden gebufferd. Deze gebouwen zullen dus na afkoeling in de winter relatief koel blijven gedurende de lente en zomer en slechts heel langzaam opwarmen. Hierdoor zijn bijvoorbeeld bunkers koel en klam in de zomer. De grote thermische massa dempt ook mogelijke fluctuaties van dag-/nachttemperatuur van het buitenklimaat op het binnenklimaat. Ook de gemiddelde seizoentemperatuur wordt gedempt en vertraagd doorgegeven: het gebouw is 's zomers koel en 's winters relatief warm.

Er kunnen ook plaatselijk afwijkende klimaatcondities heersen. De temperatuur kan lokaal oplopen, doordat zonnestraling een ruimte binnentreedt en een deel van een object, wand of vloer opwarmt. Ook kan warmte afgegeven worden door infraroodstraling afkomstig van verlichting, zoals halogeen. In een afgesloten ruimte, zoals een vitrine, kan door het gebruik van warmte afgevende verlichting de temperatuur hoog oplopen en sterk afwijken van de ruimtelijke temperatuur. Ook bezoekers geven warmte af. Maar de meest voorkomende warmtebron is in veel situaties de radiator; hier stroomt water doorheen met temperaturen tot wel 90°C. In matig tot slecht geïsoleerde gebouwen zal er een significant verschil zijn tussen de oppervlakte temperatuur van de buitenmuur vergeleken met een binnenmuur. De oppervlakte temperatuur van de binnenmuur zal vergelijkbaar zijn met de temperatuur van de lucht, terwijl de oppervlakte temperatuur van de buitenmuur meer beïnvloed wordt door de buitentemperatuur. Laag in de winter en relatief hoog in de zomer. In situaties waar een voorzetwand voor een geïsoleerd raam is geplaatst is dit temperatuurverschil nog groter. Daarnaast zijn er ook nog minder evidente afwijkingen te noemen die slechts na gedegen onderzoek aan het licht komen. Neem bijvoorbeeld de bezonning van een geblindeerd raam achter een voorzetwand. Er kan ook sprake zijn van lokale koeling door airconditioning of een lagere of hogere temperatuur door luchtstroming (tocht).

Vocht in de binnenruimte

Het totaal aan vochtbronnen en vochtputten bepaalt de absolute luchtvochtigheid in de binnenruimte (zie afbeelding 4). Er kan worden verondersteld dat de absolute luchtvochtigheid in de binnenruimte min of meer gelijk is aan die van buiten, in gebouwen waar aan de binnenlucht geen vocht wordt toegevoegd of weggenomen. Dit is in de praktijk zelden het geval, omdat gebouwen opgetrokken zijn uit verschillende materialen die ook vocht bevatten. Deze materialen kunnen vocht aan de binnenlucht vrijgeven of onttrekken.
Vochtbronnen geven vocht af aan de lucht en de mate waarin dat gebeurt, hangt af van de capaciteit van de betreffende bron. Bekende vochtbronnen zijn:

- Lekkages. Waarbij in relatief korte tijd veel vocht aan de lucht kan worden afgegeven.
- Optrekkend vocht. Als grondwater via de fundering en de wanden uiteindelijk aan de binnenzijde van de muren kan verdampen is er een min of meer continue toevoer van vocht. De absolute luchtvochtigheid in de betreffende ruimte zal hoger zijn dan die van buiten.



Afbeelding 4 De absolute luchtvochtigheid in een gebouw zonder vochtbronnen en/of -putten is min of meer uniform en wordt primair bepaald door de absolute luchtvochtigheid buiten (links). Als in een ruimte een ontvochtiger wordt geplaatst (links van het midden), dan zal de lucht lokaal droger zijn. De gradiënt is klein. Als in een ruimte een bevochtiger wordt geplaatst (rechts van het midden), dan zal de lucht lokaal vochtiger zijn. Samengevat (rechts) is de absolute vochtigheid in een zone (groene cirkel) de resultante van de uitwisseling met de buitenlucht (groene pijlen) en alle vochtbronnen en -putten in het gebouw.

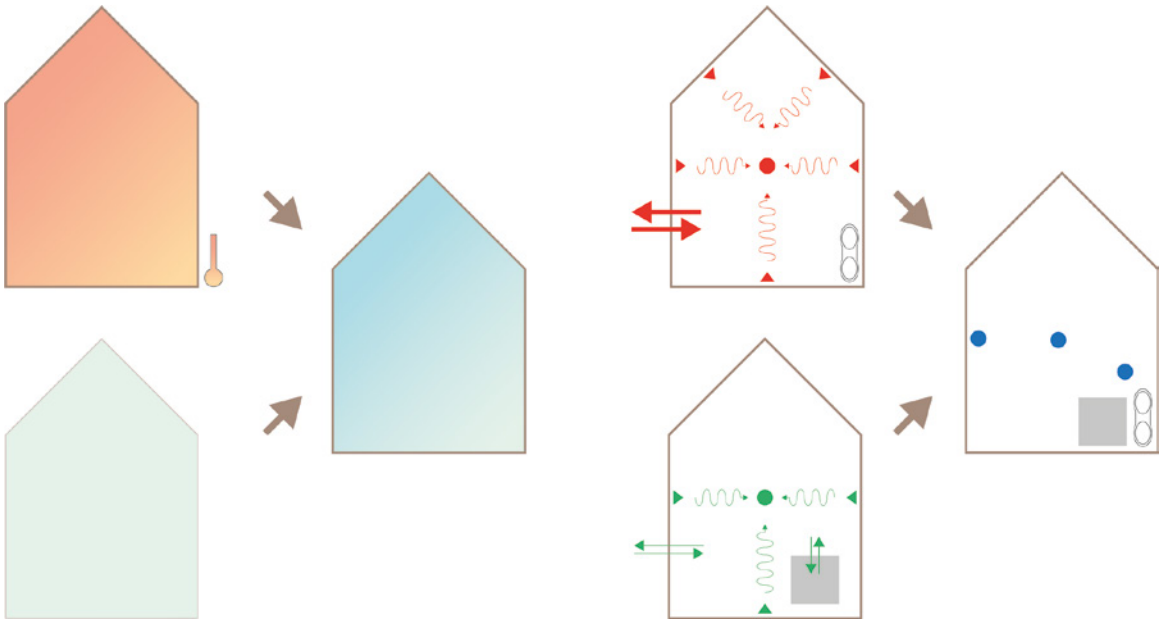
- Bezoekers. In gebouwen waar veel mensen verblijven kan de vochtigheid gedurende het verblijf significant hoger zijn. Zodra de mensen weg zijn zal over het algemeen de absolute luchtvochtigheid weer dalen.
- (Mobiele) Luchtbevochtigers. Met apparaten wordt actief vocht aan de lucht toegevoegd. Er zijn verschillende typen die ieder een specifieke capaciteit hebben. In veel erfgoedinstellingen worden mobiele bevochtigers gebruikt om tijdens het stookseizoen de relatieve luchtvochtigheid niet te laag te laten worden. De aanwezigheid van meer bevochtigers staat echter niet direct gelijk aan een hogere luchtvochtigheid. Dit is natuurlijk afhankelijk van de mate waarin de binnenlucht in verbinding staat met de buitenlucht (in- en exfiltratie). Daarnaast kan (een deel van) het gebouw zelf ook een vochtbron zijn, vooral als er sprake is van optrekkend of doorslaand vocht. Dit vochttransport wordt vaak zichtbaar door verkleuringen in en/of zoutuitbloei op de betreffende wanden.

Vocht kan ook worden afgevoerd door zogenaamde vochtputten. Voorbeelden van vochtputten zijn (mobiele) ontvochtigers en condensatieprocessen, zoals op enkelglas in de winter. Daarnaast kan condensatie ook elders in de bouwschil plaatsvinden waar het niet direct zichtbaar is. Denk bijvoorbeeld aan koude plekken achter wandbespanning of lambrisering.

De bouwmassa, het interieur en misschien zelfs de collectie roerende objecten vormen ook belangrijke vochtbronnen of –putten. Het evenwichtsvochtgehalte van alle aanwezige hygroscopische materialen verandert bij een veranderende relatieve luchtvochtigheid. Zo vormen de documenten en boeken in de collectie van bibliotheken en archieven een grote buffermassa van vocht.

Relatieve luchtvochtigheid

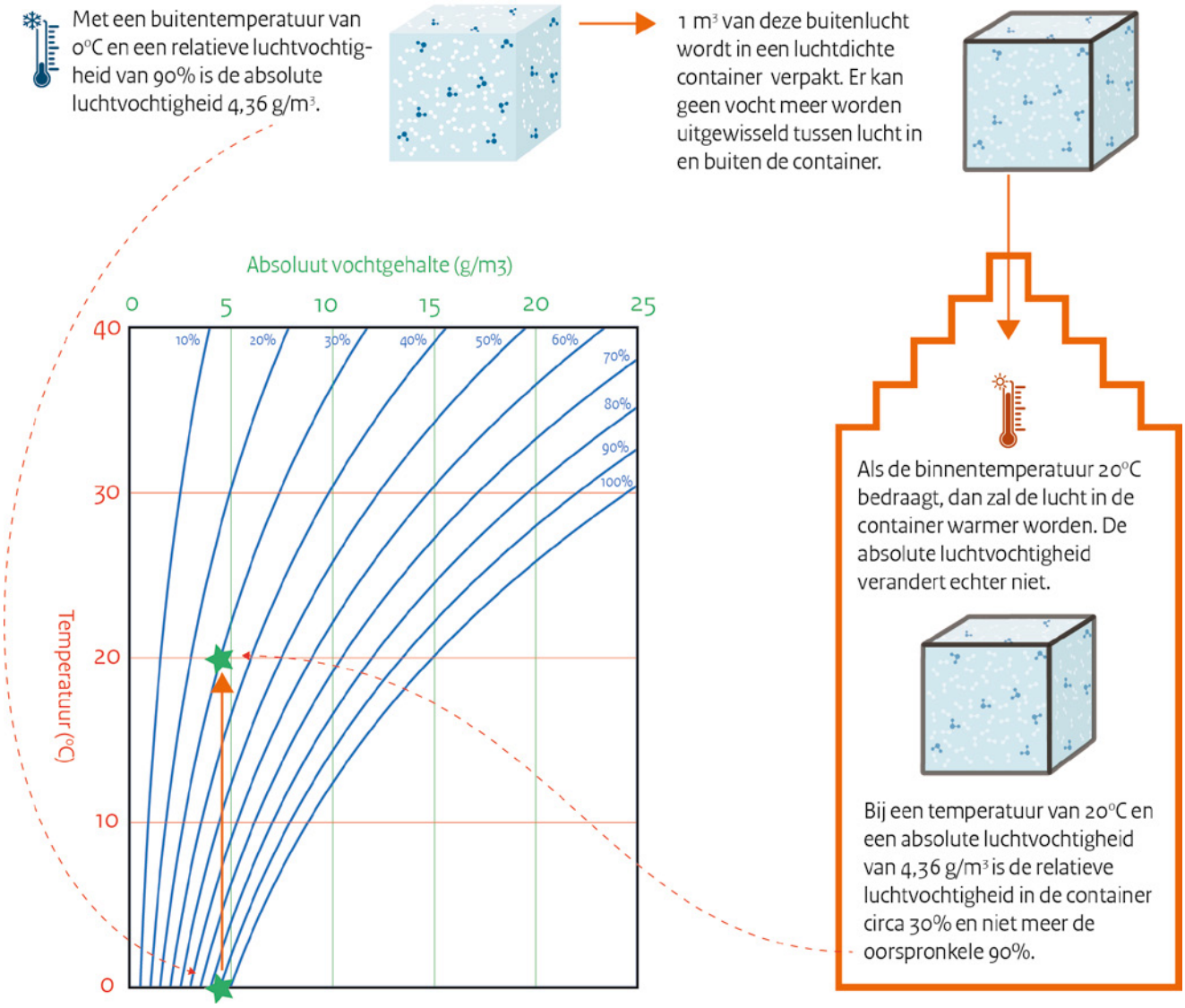
De relatieve luchtvochtigheid is afhankelijk van de temperatuur en de absolute luchtvochtigheid (bijlage 1 en afbeelding 16). Om de lokale relatieve luchtvochtigheid theoretisch te bepalen, wordt aangenomen dat de



Afbeelding 5 De relatieve luchtvochtigheid in een gebouw is een gevolg van de lokale temperatuur en de lokale absolute luchtvochtigheid.

absolute luchtvochtigheid in een gebouw uniform verdeeld is. Dit betekent dat de (lokale) relatieve luchtvochtigheid daarom primair bepaald wordt door de (lokaal afwijkende) temperaturen (zie afbeelding 5). Oftewel, door zicht te hebben op de lokaal afwijkende temperaturen wordt een goed beeld gekregen van de lokaal afwijkende relatieve luchtvochtigheden. Het temperatuur- en absolute luchtvochtigheidprofiel samen geven inzicht in de (lokale) relatieve luchtvochtigheid. Koude wanden, warme radiatoren, vochtige kelders en koude zolders zullen verschillende relatieve luchtvochtigheden hebben. Dit beeld is samengevat in afbeelding 5.

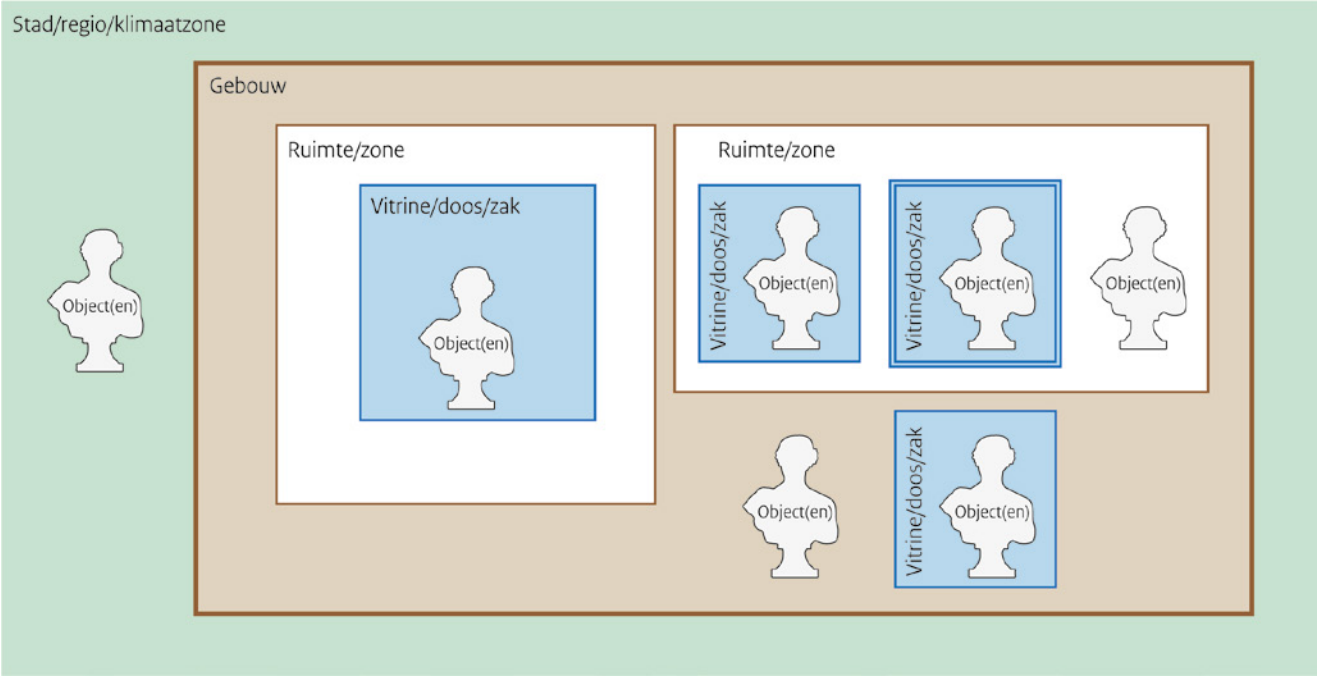
Er is een veel voorkomende misvatting dat de relatieve luchtvochtigheid van de binnenlucht direct afhankelijk is van de relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht. Dit is echter niet het geval. De relatieve luchtvochtigheid in het gebouw is een resultante van de absolute luchtvochtigheid en de (lokale) temperatuur.
In Afbeelding 6 wordt aan de hand van een klein gedachte-experiment aangetoond dat de relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht geen direct verband houd met de relatieve luchtvochtigheid van de binnenlucht, zie afbeelding 6.



Afbeelding 6 De relatieve luchtvochtigheid binnen is niet direct gekoppeld aan de relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht. Als een hermetisch afgesloten volume buitenlucht naar binnen wordt gebracht zal als gevolg van een temperatuursverandering de relatieve luchtvochtigheid in de afgesloten ruimte veranderen.

Schillen en microklimaten

Het klimaat kan op verschillende manieren worden bekeken. Het kan heel handig zijn om van buiten naar binnen te denken en de verschillende barrières die zich tussen buitenklimaat en object bevinden in beeld te hebben. Afbeelding 7 geeft hiervan een schematische weergave.



Afbeelding 7 Schematische weergave van de schillen rondom de collectie.

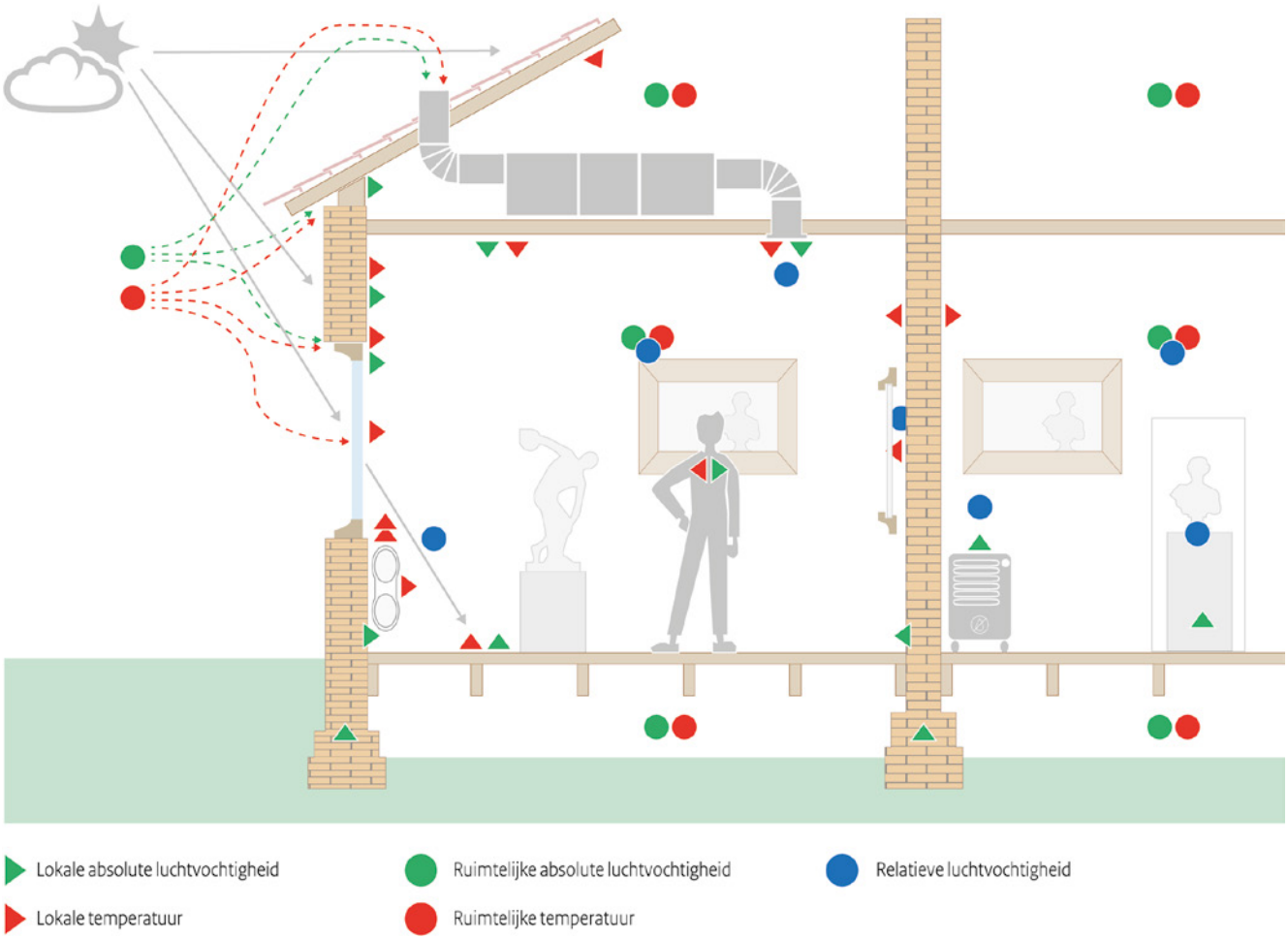
Er zijn vier schillen aanwezig tussen de buitenlucht en het microklimaat als een object als volgt opgeborgen is:

1. object in een kartonnen doos;
2. kartonnen doos in een afgesloten kast;
3. de kast in een depot;
4. het depot als doos-in-doos op de zolder.

Door bepaalde eigenschappen aan de barrières te geven, kan rondom het object een heel ander klimaat worden gerealiseerd dan in de zone. Afbeelding 8 laat als voorbeeld de speciale droge omgeving zien die gecreëerd is met behulp van een plexiglazen doos in een vitrine.

Afbeelding 8 Een archeologische vondst van ijzer wordt in een aparte plexiglazen doos onder droge omstandigheden afgeschermd van het klimaat in de vitrine. De vitrine schermt de voorwerpen af van het klimaat in de tentoonstellingsruimte.

Voor het inrichten van een meetprogramma is het handig om inzicht te hebben in de vermoedelijk afwijkende klimaten in het gebouw. Een plattegrond laat zien op welke locaties vermoedelijk een afwijkende temperatuur heerst, zodat juist op die locaties sensoren geplaatst kunnen worden. Soms bepalen pragmatisme of veiligheid ook de locatie. Het scenarioschema in afbeelding 9 helpt bij de identificatie van mogelijk afwijkende klimaten.



Afbeelding 9 Schematisch overzicht van het binnenklimaat met lokaal verschillende temperaturen en verschillende absolute luchtvochtigheid. De relatieve luchtvochtigheid (blauwe cirkel) is een resultante van de absolute luchtvochtigheid (groene driehoeken en cirkels) en de temperatuur (rode driehoeken en cirkels).

19
°C 30%

Stappenplan

Dit gedeelte van de brochure legt in 5 stappen uit waarom en hoe klimaatmetingen moeten plaatsvinden.

STAP 1 - Waarom meten?

In deze stap wordt de eigenlijke reden voor het doen van de metingen geformuleerd: de onderzoeksvraag.
Het verdient aanbeveling om de vraag zo specifiek mogelijk te maken. Als de vraag te algemeen is, is deze zeer lastig te beantwoorden.

Er zijn tal van vragen en redenen om kennis over het heersende binnenklimaat te willen vergaren. De meest voorkomende zijn:

- Hoe komt het binnenklimaat tot stand in een specifieke ruimte?
- Wat zijn de typische gemiddelde waarden en fluctuaties in een specifieke ruimte?
- Wat zijn de heersende klimaatzones in het gebouw? Er kan gekeken worden hoe ruimtes elkaar beïnvloeden en hoe deze optimaal gebruikt kunnen worden voor het opslaan of presenteren van collecties.
- Kennis over het klimaat rondom de objecten (ook als deze zich achter glas of in dozen bevinden), om daarmee een schatting te kunnen maken van de risico's waaraan de collectie werkelijk blootgesteld wordt en om mogelijke schades te kunnen verklaren.
- Wat gebeurt er in afgesloten ruimtes (vitrines, dozen en kasten) en wat is de prestatie van deze potentiële barrières?
- Kennis over de prestatie van de aanwezige klimaatbeheersing, zoals radiatoren, lokale be- en ontvochtigers, en/of de klimaatinstallatie (en hoe deze geregeld wordt).
- Controle van de werking van getroffen maatregelen zoals een veranderd deurenbeleid.

Incorrecte metingen door sensoren van het gebouwbeheersysteem (GBS) kunnen leiden tot ernstige klimaatafwijkingen. Onafhankelijke registratie wordt aanbevolen om meetfouten van de installatie tijdig op te merken.

STAP 2 - Verzamelen van algemene informatie over de binnenruimte

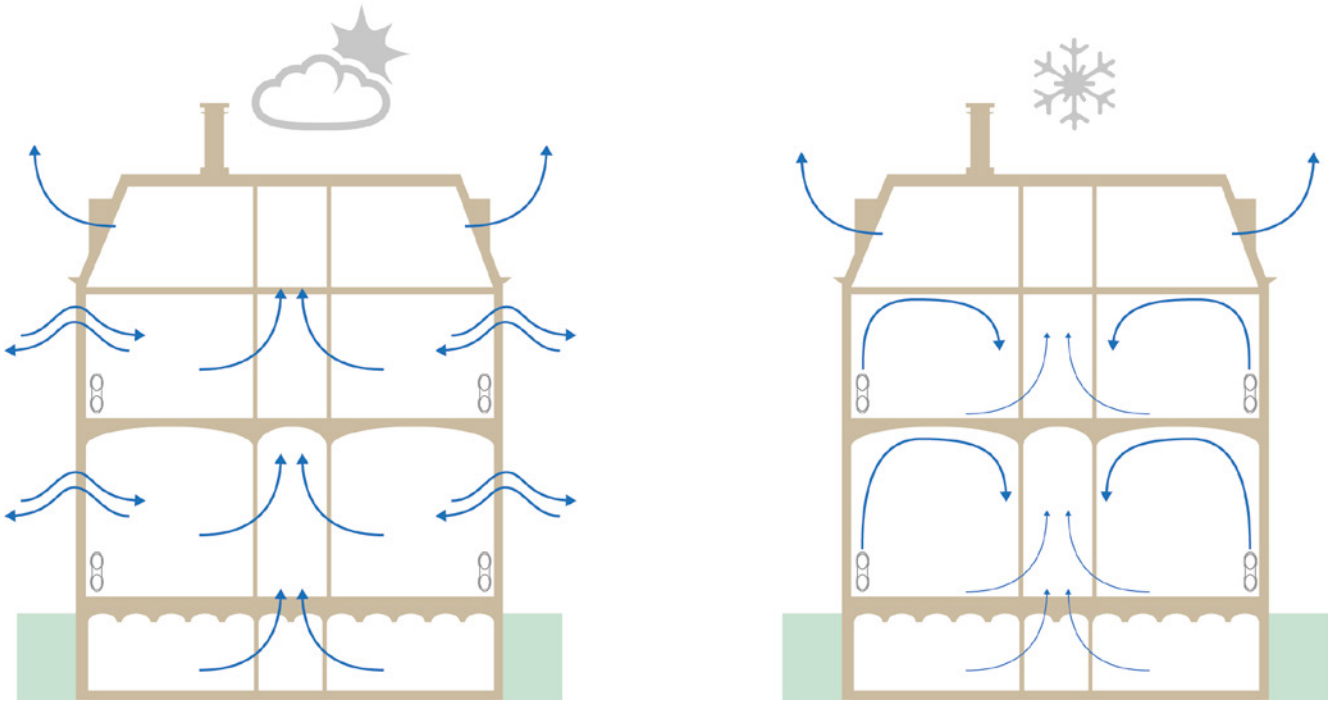
Het is aan te raden om eerst de factoren die het binnenklimaat bepalen in kaart te brengen, voordat tot meten van het binnenklimaat wordt overgegaan. Deze factoren gaan over de aanwezige installatie, de wijze waarop deze is geregeld, de frequentie van openen van deuren en ramen voor natuurlijke ventilatie, het gebruik van bepaalde lampen en aanverwante zaken. De persoon die hier intern verantwoordelijk is, kan deze informatie geven, maar ook een externe adviseur kan hiervoor geraadpleegd worden. Vooral als het gaat over complexe systemen, zoals all-air klimaatinstallaties. Vervolgens kan een risicoprofiel worden opgesteld door afwijkende warme en koude plekken op plattegronden aan te geven, bijvoorbeeld door ze te arceren met kleur.

Bij deze afwijkende warme en koude plekken kan gedacht worden aan:

- warmtebronnen, zoals lampen, radiatoren, kachels, verlichting, randapparatuur en oppervlakken waarop direct zonlicht valt;
- koude plekken, zoals (dunne) buitenmuren, kelders en enkel glas;
- mogelijke vochtige locaties, zoals garderobe, museumcafé en kelders;
- mobiele klimaatbeheersingsapparatuur, zoals airconditioningunits, be- en ontvochtigers;
- inblaaspunten voor de klimaatbeheersing.

Het risicoprofiel van het winterseizoen wijkt door verwarming (en vaak bevochtiging) sterk af van het zomerseizoen. De zomer kenmerkt zich juist door hoge luchttemperaturen en de daaraan gekoppelde wens tot (natuurlijke) ventilatie voor menselijk comfort. In historische huizen en kleine musea worden dan vaak ramen en deuren opengezet. In de winter wordt de luchtuitwisseling met buitenlucht zo veel mogelijk beperkt en is er vooral interne luchtverplaatsing. Lucht kan zeer effectief gaan stromen via verticale schachten, zoals trappenhuizen, liftschachten of rookkanalen, door het zogenoemde schoorsteeneffect. Warme lucht stijgt op, en als deze wordt aangevuld met koude lucht kan een luchtstroom ontstaan. Afbeelding 10 geeft de mogelijke luchtstromen in zomer en winter schematisch weer.

Foto pagina 18: Het klimaat kan op veel verschillende manieren worden geregistreerd. Loggers met een display tonen direct wat het heersende binnenklimaat op dat moment is. Niet alle sensoren kunnen de geregistreerde gegevens opslaan. Dat maakt evaluatie van het binnenklimaat over een lange termijn onmogelijk. Juist inzicht over de ontwikkeling van het binnenklimaat over lange tijd geeft ons niet alleen inzicht in het dag- en nachtritme maar juist over de seizoenfluctuaties.



Afbeelding 10 Dwarsdoorsnede van een historisch huis met de winter- en zomersituatie. Een indicatie van luchtstromen als de ramen en deuren open staan in de zomersituatie (links) en met vooral interne luchtstromen in de winter (rechts).

STAP 3 - Wat meten?

Binnenklimaat

Er zijn meetapparaten en dataloggers verkrijgbaar die verschillende aspecten van het (binnen)klimaat kunnen meten en registreren. Een aantal hiervan staat onderaan opgesomd.

Robuuste handmeters meten de relatieve luchtvochtigheid aan de hand van de natte- en drogeboltemperatuur. Deze handmeter herleidt de relatieve luchtvochtigheid door deze temperaturen te meten en vervolgens in een mollierdiagram in te tekenen. De temperatuur van de natte bol heeft een relatieve luchtvochtigheid van 100% en de droge bol toont de ruimtetemperatuur bij de onbekende relatieve luchtvochtigheid. Met een digitale handmeter kunnen momentopnames van de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid gemaakt worden.

Een datalogger slaat klimaatgegevens op met een te kiezen meetinterval, zodat het verloop in de tijd kan worden gevolgd. Het meest gebruikte type is de logger waarmee de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur gelijktijdig gemeten worden. Dit soort metingen wordt dan ook het meest door musea in eigen beheer uitgevoerd. Het grote voordeel van deze digitale loggers zijn de mogelijkheden voor data-analyse en de ruime flexibiliteit waarmee ze kunnen worden ingezet.
Het nadeel van digitale dataloggers is echter dat collectiebeheerders niet meer zelfstandig kunnen kalibreren. Daarnaast blijkt het in de praktijk lastig om geregistreerde data om te zetten in overzichtelijke en begrijpelijke grafieken. Het spreekt voor zich dat het belangrijk is om de sensoren regelmatig te kalibreren.

Uit de praktijk blijkt dat de relatieve luchtvochtigheid sensor sneller afwijkt dan de temperatuursensor.
Er wordt aanbevolen de sensoren jaarlijks te laten kalibreren door de leverancier. Het kan namelijk zijn dat er onzekerheid heerst over de meting van een bepaalde logger. Een logger kan bijvoorbeeld continu eenzelfde hoge (of juist lage) waarde registreren. Er wordt dan aanbevolen om deze logger naast een andere logger het klimaat te laten meten gedurende 1 tot 2 dagen. Daarna kan gekeken worden of beide dezelfde of afwijkende data tonen. Eventueel kan met een losse gekalibreerde handmeter een vergelijking gemaakt worden. Neem hiervoor wel de tijd; meestal duurt het ongeveer 20 minuten voordat de handmeter is geacclimatiseerd.

Hierdoor is direct duidelijk waarom handmeters eigenlijk ongeschikt zijn om het binnenklimaat op een deugdelijke wijze in kaart te brengen. Het is tijdrovend en brengt een

grote onzekerheid met zich mee. De meeste meters kennen een toegestane afwijking. Meestal gaat het om een toegestane afwijking van 2-3% RV en 2°C (zie de gebruiksaanwijzing van de betreffende meter). Houd hiermee rekening bij het vergelijken van metingen van verschillende meters.

Soms wordt het binnenklimaat beheerst door middel van mobiele be- en/of ontvochtigers. Ook de sensoren in deze apparaten vertonen zogenoemde drift en onnauwkeurig worden. Vergelijk de waarden aangegeven op de be- en ontvochtigers regelmatig met losse (hand)meetapparatuur. Zorg ook hier voor regelmatig onderhoud en een goede plaatsing van de apparatuur voor een optimaal resultaat. Om de onnauwkeurigheid van een mobiele be- en/of ontvochtiger te omzeilen, kan het apparaat of apparaten via een externe hygrostaat worden geschakeld.

Naast het meten van de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur kunnen ook andere metingen worden gedaan die bijdragen aan kennis over het binnenklimaat. Dit type metingen wordt meestal niet door erfgoedinstellingen uitgevoerd. Over het algemeen worden deze metingen door professionals gedaan als er een probleem is gesignaleerd met het klimaat dat niet direct verklaard kan worden vanuit de klimaatmetingen. Hierna wordt een aantal van deze andere metingen besproken.

Meten van de oppervlaktetemperatuur

De lokale oppervlaktetemperatuur kan een zeer afwijkende temperatuur en daarmee vochtigheid hebben, vooral op plekken achter objecten aan een geïsoleerde buitenwand. In een binnenruimte die in de winter bevochtigd wordt, resulteert een lokaal lage oppervlaktetemperatuur in een lokaal (zeer) hoge relatieve luchtvochtigheid. Zoals afbeelding 2 weergeeft, kan in een verwarmde ruimte op 20°C en een relatieve luchtvochtigheid van 50% (punt A in afbeelding 2), condensatie optreden als de oppervlaktetemperatuur lager is dan 9,3°C (punt E in afbeelding 2).

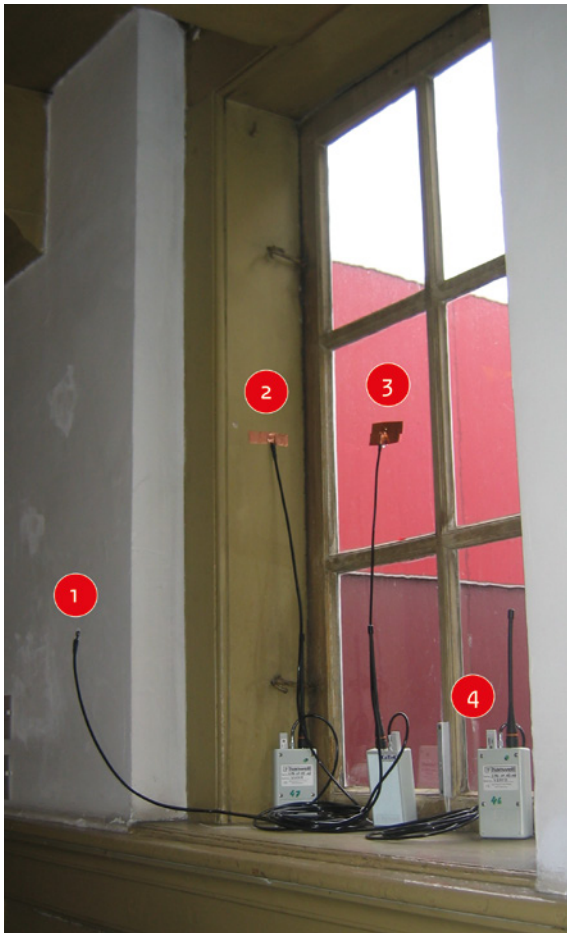
In de zomer staat de zon in het zuiden hoger, waardoor de horizontale zoninstraling kleiner is. Daardoor worden de zuidoost- en zuidwestgeoriënteerde gevels meer opgewarmd dan de zuidgeoriënteerde gevel.
De gevolgen daarvan zijn hoge relatieve luchtvochtigheid en mogelijk condensatie, die het risico op schimmelgroei aanzienlijk verhogen. Het is dus belangrijk om te weten waar de (lokaal afwijkende) oppervlaktetemperaturen in een binnenruimte voorkomen, zodat gepaste maatregelen getroffen kunnen worden. Met behulp van een warmtebeeld-camera (infraroodcamera) is het mogelijk om de thermische energie (in de vorm van infraroodstraling) die een voorwerp uitstraalt zichtbaar te maken en te meten (zie afbeelding 11).

Thermische energie is dat deel van het elektromagnetisch spectrum dat vanwege haar lange golflengte niet door het menselijk oog kan worden waargenomen, maar we wel als warmte ervaren. Ieder object straalt warmte uit naar zijn omgeving. Hoe hoger de temperatuur van een voorwerp is, hoe groter de hoeveelheid uitgezonden infraroodstraling. Een infraroodcamera meet energie die een oppervlak uitstraalt en berekent daaruit de temperatuur. Met behulp van een kleurenschaal is het vervolgens mogelijk om de verschillende oppervlaktetemperaturen, die door de camera worden berekend, van een infraroodthermogram af te lezen. Met deze meetmethode kunnen oppervlakken met een afwijkende temperatuur in een gebouw worden opgespoord.

Als het condensatierisico op een raam in kaart moet worden gebracht dan ligt het voor de hand om een oppervlakte temperatuursensor midden op het glas te

Afbeelding 11 Oppervlaktetemperaturen worden zichtbaar gemaakt met behulp van een warmtebeeldcamera. De vloerverwarming in een tentoonstellingszaal kan eenvoudig zichtbaar worden gemaakt (links). Een voorzetwand voor een afgedekt raam voorkomt niet dat de temperatuur aan de wand in de winter afwijkt van de ruimtelijke condities (midden). Een afwerking met gipsplaat aan de buitenwand is aanzienlijk kouder dan de ernaast gelegen binnenmuur, ook is duidelijk de betengeling van de gipsplaten zichtbaar (rechts).

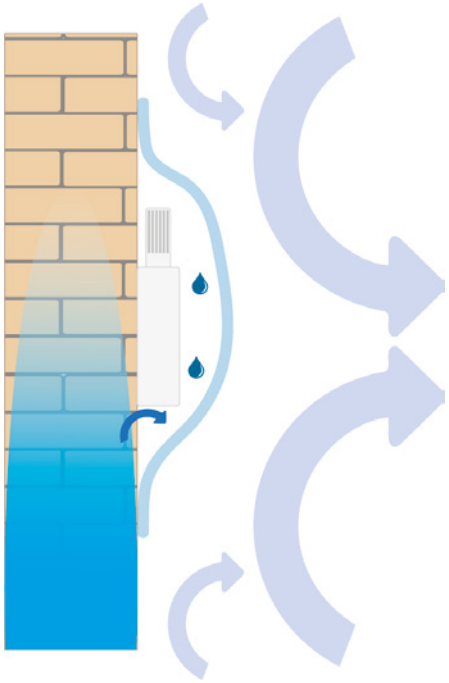
plaatsen. Als daarnaast ook op het kozijn en op de muur naast het raam (zie afbeelding 12) wordt gemeten ontstaat een volledig beeld. Met dit type metingen kan in een koude periode redelijk eenvoudig worden bepaald welke temperaturen de verschillende onderdelen van de bouwschil aannemen als functie van het buitenklimaat. Soms is er een vermoeden dat de relevante koude oppervlakken uit het zicht dieper in de bouwschil liggen. In dat geval kan het nodig zijn om de sensoren in de muur in te brengen, bijvoorbeeld achter lambrisering of nabij opleggingen van een balkkop.



Afbeelding 12 Rondom het raam worden oppervlaktemetingen uitgevoerd aan wand (1), kozijn (2), enkelglas en luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid.

Oppervlaktemeting van de relatieve luchtvochtigheid

Als het vermoeden bestaat dat een bepaalde muur of vloer vocht afgeeft aan de ruimte, dan kan dit bestudeerd worden door de meetsensor af te dekken met bijvoorbeeld een plasticfolie (zie afbeelding 13). De sensor meet nu de lucht die in evenwicht komt met het oppervlak, zonder dat een luchtstroom in de ruimte die lucht afvoert. De meetresultaten onder het afgedekte plastic tonen aan of de muur of vloer een mogelijke vochtbron is, door deze te vergelijken met metingen meer centraal in de ruimte.



Afbeelding 13 De mogelijke emissie van vocht uit een wand of vloer kan in kaart worden gebracht door de meting af te zonderen van de (geventileerde) ruimte, met behulp van een plasticfolie. Als er waterdamp uit de wand wordt vrijgegeven, zal de meting in het afgesloten volume een hogere absolute luchtvochtigheid tonen dan de meting die in de ruimte wordt uitgevoerd.

Meten van het vochtgehalte in muren en vloeren

Niet alleen kennis van de hoeveelheid vocht in de lucht, ook kennis over vocht in oppervlakten als vloeren en muren is soms belangrijk om afwijkende plekken in een ruimte te kunnen identificeren. Wanneer op een muur donkere vlekken voorkomen of wanneer verfbladders en blazen verschijnen, kan dit duiden op de aanwezigheid van vocht in de materialen. Om het vochtgehalte in een materiaal niet-destructief te kunnen meten, kan met een vochtmeter een elektrisch veld in het materiaal worden opgewekt. De hoeveelheid vocht in het materiaal beïnvloedt de signaalsterkte. Verschillen tussen meetpunten op het oppervlak duiden op verschillen in het vochtgehalte van het materiaal. Per type meetinstrument kan de diepte van de meting verschillen, van enkel het oppervlak tot enkele tientallen centimeters

diep in het materiaal. Het is belangrijk er rekening mee te houden dat de meting wordt beïnvloed door de aanwezigheid van zouten.

Een andere methode is het nemen van boormonsters waarbij het boorgruis wordt gewogen, gedroogd en nogmaals gewogen. Het verschil tussen de wegingen staat gelijk aan de hoeveelheid water in het materiaal. Dergelijke metingen zijn destructief en vinden vaak op meerdere hoogten en diepten plaats.

Menselijk comfort

Een belangrijke factor voor de vorming van het binnenklimaat is menselijk comfort. Het is de belangrijkste reden dat er in de winter wordt verwarmd en in de zomer gekoeld. Hierdoor wordt in beide gevallen de binnenlucht ververst. Een laag comfort door een verkeerd binnenklimaat is vaak een gevolg van hoge luchttemperatuur, hoge oppervlaktetemperatuur, gebrek aan ventilatie en/of een hoge concentratie CO_2. Er zijn naast de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid nog drie soorten metingen die kunnen worden gedaan om inzicht te krijgen in deze aspecten van menselijk comfort: het ventilatievoud, de luchtsnelheid en het CO_2-gehalte.

Meten van het ventilatievoud

Het ventilatievoud is een maat voor de luchtverversing in een ruimte. Het wordt uitgedrukt als het aantal malen per tijdseenheid dat het gehele volume wordt ververst. Daarmee is het ventilatievoud het getal dat aangeeft hoeveel keer per uur (of per dag voor zeer afgesloten volumes) het luchtvolume wordt vervangen. Daar waar veel mensen samenkomen, is een hoger ventilatievoud noodzakelijk om te voorkomen dat de lucht te veel CO_2 gaat bevatten en muf wordt. Voor collecties is in het algemeen een laag ventilatievoud in ruimtes en vitrines bevorderlijk.

Het ventilatievoud kan op verschillende manieren gemeten worden, bijvoorbeeld met behulp van een zogenaamd tracer-gas. De meest eenvoudige manier is om CO_2 in de afgesloten ruimte in te brengen en de afname daarvan in tijd te meten. Met de snelheid waarmee de concentratie CO_2 afneemt, kan het ventilatievoud, van bijvoorbeeld een vitrine of ruimte, worden bepaald.

Een andere manier om het ventilatievoud van een ruimte te bepalen met de CO_2-methode te bepalen is door mensen als een natuurlijke bron te gebruiken. Als in een ruimte een groep mensen aanwezig is en de deur gesloten, zal de CO_2-concentratie toenemen. Als de groep na verloop van tijd de ruimte verlaat, kan de afname van de CO_2-concentratie worden gemeten. Mogelijke situaties die voor een dergelijke meting in aanmerking komen, zijn een bruiloft, receptie en/of diner.

De natuurlijke CO_2-achtergrondconcentratie bedraagt ongeveer 350-450 ppm (parts per million). Een goed geventileerde ruimte heeft bij een 'normale' bezetting een CO_2-concentratie die lager is dan 1000 ppm. Daarboven wordt het binnenklimaat voor de mens vaak onaangenaam en onfris. Er wordt een maximale concentratie van 1200 ppm geadviseerd. Een infraroodsensor kan het CO_2-gehalte in ppm meten.

Naast CO_2 zijn er ook andere gassen beschikbaar om dit type metingen uit te voeren. Een veel gebruikt gas is zwavelhexafluoride (SF_6).

Meten van de luchtsnelheid

De Arbowetgeving geeft aan dat voor menselijk comfort de luchtsnelheid niet hoger mag zijn dan 0,15 m/s. Bij hogere luchtsnelheden wordt de tocht als vervelend ervaren. De snelheid (in m/s) waarmee lucht zich verplaatst, kan worden gemeten met een thermische luchtsnelheidsmeter of met een vleugelradanemometer.

Het meten van de luchtsnelheid kan ook inzicht geven over de hoeveelheid verplaatste lucht. Dit is vooral interessant bij het meten van de hoeveelheden lucht die een klimaatinstallatie de ruimte inblaast, via een inblaasrooster. Het luchtvolume (ook wel debiet genoemd) kan worden berekend door de luchtsnelheid bij een inblaasrooster te meten en deze te vermenigvuldigen met het oppervlak van dat rooster. Het totale debiet kan worden bepaald door bij alle inblaasroosters deze meting uit te voeren.

STAP 4 - Waar meten?

In de voorgaande stappen is vastgesteld waarom en wat er moet worden gemeten. De volgende stap is om te kijken naar waar de meetapparatuur kan worden geplaatst. Vaak zijn er beperkingen voor de plaatsing van de datalogger/sensor en is de meetlocatie een compromis tussen het wetenschappelijk wenselijke en het praktisch haalbare. Algemene aandachtspunten voor de plaatsing van de sensoren zijn:

- dat deze makkelijk en risicoloos te bereiken zijn;
- dat het eventueel aanwezige display makkelijk af te lezen is;
- dat ze niet makkelijk weg te nemen zijn door derden;
- dat bij radiografische systemen het signaal van de datalogger goed is.

In stap 4 worden de volgende drie meetstrategieën verder uitgewerkt:

1. de gemiddelde klimaatconditie in een ruimte (of afgesloten volume);
2. een lokaal afwijkende klimaatconditie;
3. de klimaatcondities bij de collectie.

Gemiddelde klimaatconditie in een ruimte

De gemiddelde klimaatconditie van een ruimte bestaat eigenlijk niet, omdat er bijna altijd sprake is van afwijkende temperaturen en daarmee ook van lokaal afwijkende relatieve luchtvochtigheden. De 'gemiddelde' ruimtelijke klimaatconditie is dan ook slechts een indicatie. Om de condities van de lucht in de ruimte te meten, zal in het midden van een ruimte een meetsensor geplaatst moeten worden (bij voorkeur op het kruispunt van de ruimtediagonalen).

Het plaatsen van een meetinstrument in het midden van een ruimte kan praktisch onhaalbaar zijn door beperkingen, zoals de inrichting en het gebruik van de ruimte. Dit vraagt om een alternatief. Men moet met de volgende elementen rekening houden bij het zoeken van een geschikte plek voor het meten van het ruimtelijke klimaat. Plaats het meetinstrument op zo'n manier dat:

- er geen direct zonlicht op valt;
- het niet te dicht bij een warmtebron zoals verwarming of lamp is;
- het niet te dicht bij een inblaasrooster van een installatie is;
- het niet te dicht bij lokaal afwijkende klimaten, zoals buitenmuren en beglazingen is;
- het instrument uit tocht- of luchtstromen (zoals op de lijn tussen twee tegenover elkaar openstaande deuren) is;
- het niet op de grond is.

Voorbeelden van mogelijk geschikte locaties binnen een ruimte zijn: in of aan een centraal geplaatste (hang)lamp, boven op een kast of op de zitting van stoel die aan een (eet)tafel geschoven staat. Soms kan de sensor ook op de tafel geplaatst worden.

Voor buitensensoren geldt specifiek dat de temperatuur van de lucht gemeten moet worden op een hoogte van anderhalve meter boven een open grasvlakte. Dit gebeurt volgens internationale afspraken van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO). De thermometer of de sensor waarmee de temperatuur wordt waargenomen, staat in een wit kastje met wanden in de vorm van een open jaloezie. Daardoor heeft de wind vrij spel, maar kunnen zon en neerslag niet tot de instrumenten doordringen. Soms kan het buitenklimaat niet gemeten worden en kunnen klimaatgegevens van het KNMI uitkomst bieden.[2]

Lokaal afwijkend klimaat

Wanneer de risicoplekken in een ruimte in kaart zijn gebracht, kan besloten worden om deze afwijkende klimaten verder te verkennen. Sensoren worden geplaatst in de directe nabijheid van thermische afwijkingen, koude en warme oppervlakken, en/of plaatsen waar vochtbronnen worden vermoed. Een sensor kan ook meer centraal in de ruimte geplaatst worden om enig inzicht te krijgen in het effect dat het microklimaat heeft op, bijvoorbeeld, het ruimtelijk gemiddelde klimaat. Om te zien of er lokaal afwijkende condities heersen, moet 'lokaal' met 'elders' of 'algemeen' worden vergeleken. Er is sprake van twee vragen:

1. Wat is het lokale klimaat, en
2. In welke mate wijkt het af van het ruimtelijke gemiddelde?

Typische voorbeelden van microklimaten zijn:

- koude oppervlakken, zoals (dunne) buitenwand, vloeren, dakbeschot onder ongeïsoleerd dak of (enkel)glas;
- warme oppervlakken zoals radiatoren, vloeren met vloerverwarming, oppervlakken waar de zon op straalt;
- afgesloten volumes zoals verpakkingen, vitrines en microklimaatdozen;

[2] Voor verschillende locaties in Nederland en voor verschillende tijdsperioden zijn gegevens te vinden op: https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens

- luchtspouw achter een wandbespanning;
- luchtspouw tussen radiator en vitrine;
- inblaasroosters van klimaatinstallatie.

Omdat microklimaten vaak ontstaan door afwijkende oppervlaktetemperaturen, wordt de oppervlaktetemperatuur ook direct gemeten. De sensor wordt direct op het oppervlak geplaatst. In geval van locaties waar de binnentemperatuur die van buiten snel volgt, een zogenaamde koudebrug, vindt dit onderzoek plaats om het risico op condensatie en daarmee op schimmel te onderzoeken. Een handig alternatief is om met behulp van een thermische of infraroodcamera een oppervlaktetemperatuurmeting uit te voeren.

Temperatuurstratificatie kan zorgen voor afwijkende klimaten in verticale richting. Warme lucht stijgt op en blijft in de nok van de ruimte hangen en onderin verzamelt zich de relatief koude lucht. Er is dan sprake van een temperatuurverschil over de hoogte van de ruimte. Inzicht in de aanwezigheid (of afwezigheid) van stratificatie kan iets zeggen over de menging van de lucht of het risico op schade aan objecten die zich op grote hoogte bevinden (of wellicht verschillende temperaturen ervaren door hun lengte). Bij onderzoek naar specifiek vochtige ruimten kan het niet alleen interessant zijn om verschillende ruimten met elkaar te vergelijken, maar ook om te onderzoeken of het mogelijk is de vochtbron te vinden.

Klimaatcondities bij de collectie

Metingen in musea zijn er in het algemeen op gericht om de risico's van een verkeerd binnenklimaat voor collecties in kaart te brengen. Daarom verdient het aanbeveling om de loggers zo dicht mogelijk bij de objecten te plaatsen. Er zal een keuze gemaakt moeten worden bij welke objecten de meting zal plaatsvinden, omdat a) het aantal museale objecten vaak veel groter is dan het aantal sensoren dat ter beschikking staat, en b) het weinig zinvol en praktisch onhaalbaar is honderden metingen tegelijkertijd uit te voeren. Het ligt voor de hand een object uit te kiezen dat het meest gevoelig is voor een verkeerd binnenklimaat en waarvan het vermoeden bestaat dat dit op de bewuste locatie daaraan blootgesteld wordt.

Meten van de condities in de nabijheid van objecten betekent meten in de vitrine, in de kast of zelfs in de doos. Zo wordt het reële klimaat rondom het object in kaart gebracht.

STAP 5 - Hoe meten?

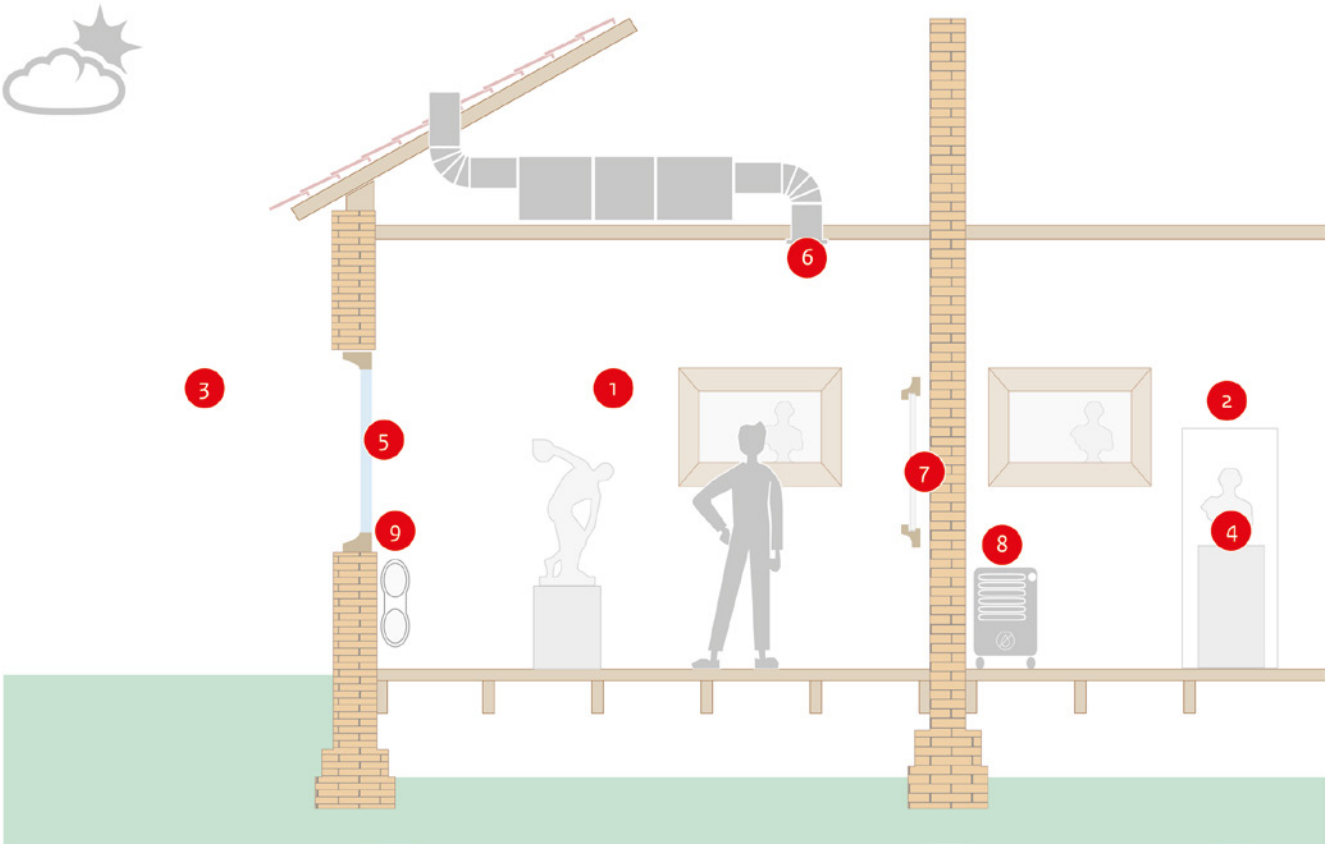
In de meest ideale situatie wordt gedurende het hele jaar op alle relevante meetlocaties gemeten. Op die manier zou men na slechts één jaar meten alle antwoorden op de onderzoeksvragen kunnen hebben. De realiteit leert ons echter dat er nooit genoeg sensoren zijn en dat er gemeten moet worden met wat voorhanden is.
Vaak wordt er voor gekozen de meeste sensoren (of loggers) min of meer permanent in een ruimte te plaatsen en enkele meer gericht en gefaseerd te gebruiken. Het ligt voor de hand om de permanente sensoren in de meest intensief gebruikte museale ruimten te plaatsen, en in een of enkele representatieve vitrines. De hoeveelheid sensoren die nodig is voor een representatief beeld van het ruimtelijke binnenklimaat in een gebouw, hangt af van:

- het aantal (museale) ruimten;
- de oriëntatie van de ruimtes (verdieping en bezonning);
- de hoogte van de ruimte(s);
- andere functies in het gebouw (restaurant).

Het wordt sterk aanbevolen de loggers niet op een permanente locatie te plaatsen, maar deze flexibel in te zetten om andere aspecten van het binnenklimaat te bekijken. Een kalender helpt om deze loggers efficiënt te gebruiken, om verschillende metingen na elkaar te plannen. Op die manier kunnen seizoensgebonden metingen als eerste plaatsvinden, waarna de metingen gebeuren die onafhankelijk zijn van het buitenklimaat. Afbeelding 14 geeft locaties weer op basis van het scenarioschema in afbeelding 9.

Bij het analyseren van de verschillen tussen meetresultaten wordt aanbevolen om deze metingen op hetzelfde moment uit te voeren. Het is namelijk vrijwel onmogelijk om klimaatmetingen te vergelijken uit verschillende ruimten en gemeten in verschillende perioden. Soms kan een meetlocatie representatief zijn voor een aantal andere. Ruimten kunnen worden gegroepeerd; de meting van één vitrine betekent dan bijvoorbeeld inzicht in alle vergelijkbare vitrines.

Er kan een keuze gemaakt worden om de slechtste situatie (worst case) of juist de optimale situatie (best case) te bekijken. In de volgende secties wordt iets dieper ingegaan op twee aspecten van de meting: de meetperiode en het tijdsinterval tussen de metingen.



Afbeelding 14 Mogelijke meetlocaties voor verschillende onderzoeksvragen. De gemiddelde ruimtelijke condities in de tentoonstelling kunnen bestudeerd worden door bijvoorbeeld meetlocatie 1 met meetlocaties 2 en 3 te vergelijken. Een lokaal afwijkend klimaat kan bestudeerd worden door meetlocaties 1 en 2 te vergelijken met locaties 5, 6, 8 en 9. De klimaatcondities nabij de collectie kunnen bepaald worden door te meten op locaties 1, 2, 4 en 7.

Meetperiode

De duur van een meetprogramma hangt grotendeels af van het doel van de meting. Ook het aantal beschikbare meetapparaten speelt hierbij een rol. Wanneer men de seizoensinvloeden op het binnenklimaat in kaart wil brengen, zal idealiter een geheel jaar in de verschillende ruimtes moeten worden gemeten. Als meetapparatuur gerouleerd wordt, kan tijdens elk seizoen een korte en vaste periode van bijvoorbeeld een week in iedere ruimte worden gemeten. Zodoende is het toch mogelijk om de seizoensinvloeden in meerdere ruimtes enigszins in kaart te brengen. Om de meetgegevens vervolgens met elkaar te kunnen vergelijken, moet het meetinstrument echter wel steeds op dezelfde plaats in de ruimte worden geplaatst. Het vergelijken van ruimtes onderling blijft lastig, maar effecten van aanpassingen worden wel inzichtelijk.

Een mogelijk meetschema voor een museum met vijf verschillende ruimten en twee verschillende type vitrines (in ruimte 1 en 2) en twee loggers zou er uit kunnen zien zoals tabel 1. Hierbij wordt aangenomen dat vergelijkbare vitrines in andere ruimtes zich min of meer hetzelfde gedragen en dus niet gemeten hoeven te worden.

Dit betekent dat in 12 weken de relaties tussen de verschillende ruimten en vitrines in kaart kunnen worden gebracht. De cyclus kan dan herhaald worden, of er kan gekozen worden de loggers gedurende langere tijd op één locatie te laten.

De invloed op het binnenklimaat door een bouwkundige ingreep of een andere afstelling van de klimaatsbeheersingsinstallatie of -apparatuur wordt in kaart gebracht door te meten vóór en na de aanpassingswerkzaamheden.
Het effect van de ene verandering is echter sneller zichtbaar dan van de andere. Wanneer warmteproducerende lichtbronnen worden vervangen door 'koude' lichtbronnen, zal dit effect vrijwel direct meetbaar zijn. De verandering van de gemiddelde luchtcondities in een ruimte zal daarentegen langzamer verlopen bij een andere afstelling van de airconditioning.

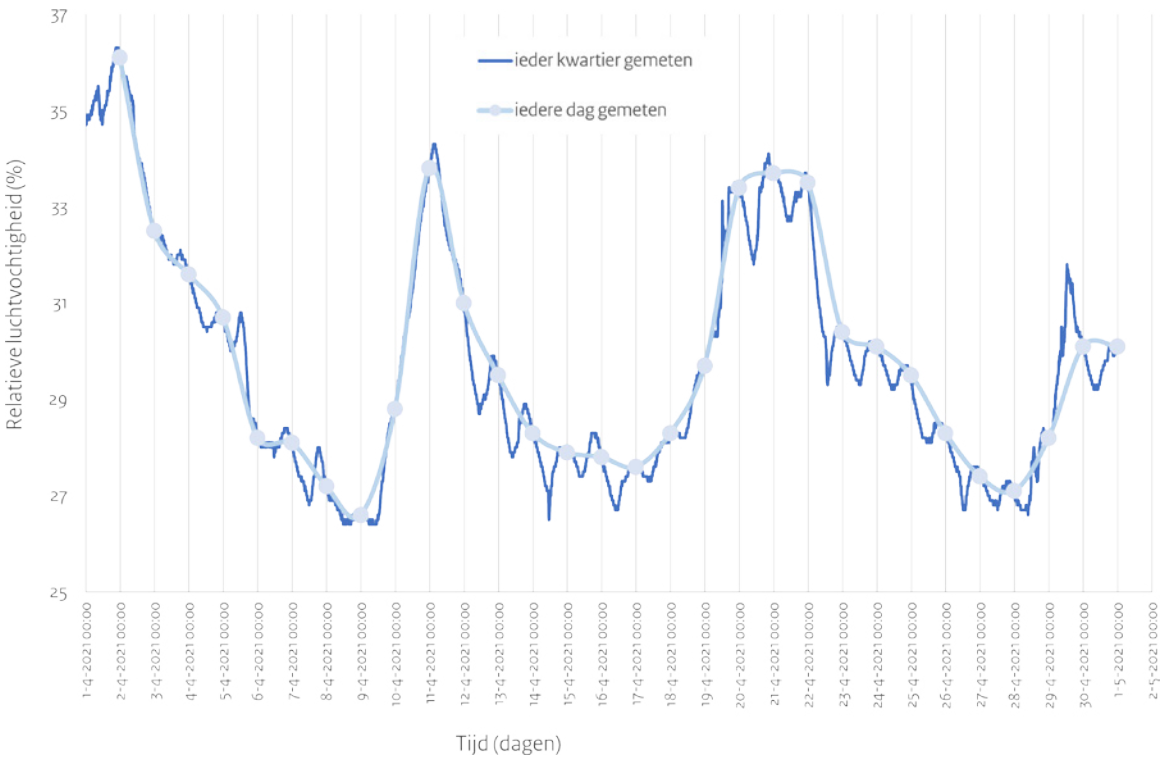
Tabel 1 Meetschema om met slechts twee meetsensoren in één seizoen het klimaat in vijf ruimten en twee vitrines te meten.

Week	Ruimte 1	Ruimte 2	Ruimte 3	Ruimte 4	Ruimte 5	Vitrine 1	Vitrine 2
1	X	X					
2	X		X				
3	X			X			
4	X				X		
5	X					X	
6		X	X				
7		X		X			
8		X			x		
9		X					X
10			X	X			
11			X		X		
12				X	X		

Tijdsinterval

Hoeveel metingen een bepaalde tijd zijn er nodig om een reëel beeld te hebben van het heersende binnenklimaat? Een enkel meetmoment per dag levert een ander beeld op van het heersende binnenklimaat dan wanneer ieder kwartier de relatieve luchtvochtigheid wordt geregistreerd (zie afbeelding 15). Een lange intervaltijd geeft dus geen inzicht over kortdurende fluctuaties. Om een goed beeld van het dagelijkse binnenklimaat te verkrijgen, is het nodig om te meten met een relatief kort interval, van bijvoorbeeld vijf minuten. Voor (zeer) lange perioden, zoals bijvoorbeeld een jaar, volstaat een intervaltijd van 30 minuten of zelfs een uur.

Hierbij moet worden opgemerkt dat een logger slechts een eindig aantal meetpunten kan opslaan. Bij een korte intervaltijd kan dus een kortere periode worden bestudeerd, voordat de logger moet worden uitgelezen. Het gebeurt in de praktijk dat de intervaltijd per ongeluk op één



Afbeelding 15 Het effect van de intervaltijd op de meting van de relatieve luchtvochtigheid gedurende één maand. De donker blauwe lijn toont de gegevens die iedere 15 minuten zijn geregistreerd. De licht blauwe lijn toont de lijn die ontstaat als slechts eenmaal op een dag om 23.45 het klimaat wordt geregistreerd. Duidelijk is dat bij een lange intervaltijd de kortdurende fluctuaties niet meer worden waargenomen.

seconde staat en dat het geheugen met een opslagcapaciteit van 100.000 datapunten binnen één dag geheel gevuld is. Als deze fout pas na enkele maanden wordt opgemerkt, is er veel kostbare meettijd verloren gegaan.

Commercieel verkrijgbare loggers hebben software waarmee de loggers kunnen worden geprogrammeerd en grafieken kunnen worden gegenereerd. Het tijdstip waarop de meting moet beginnen en het tijdsinterval kunnen eenvoudig worden geprogrammeerd. In veel gevallen volstaat een intervaltijd van 15 minuten. Kortere intervaltijden zijn interessant als het proces nauwkeuriger bestudeerd moet worden; bijvoorbeeld het (veranderende) klimaat in een vitrine. Bij een intervaltijd van 5 minuten kunnen zeer kortdurende veranderingen ook worden vastgelegd. Hierbij moet worden opgemerkt dat meten met korte intervaltijd niet altijd handig is. Meten met een korte intervaltijd geeft databestanden die zeer groot zijn en dus veel geheugenruimte vragen. Ook is het niet altijd noodzakelijk.

Door fluctuaties van de relatieve luchtvochtigheid zijn er risico's op mechanische schade van objecten. Daarom moet de snelheid waarmee de objecten vocht opnemen of afstaan (ook wel responstijd) worden meegenomen. Bijvoorbeeld: voor een object met een responstijd van een week volstaat een intervaltijd van bijvoorbeeld een halfuur of een uur. En voor een object met een responstijd van 15 minuten is een intervaltijd van bijvoorbeeld 1 minuut nodig. De snelheid waarmee veranderingen in het binnenklimaat verlopen, bepaalt met welk interval het beste gemeten kan worden. Bij relatief langzaam lopende processen, zoals de seizoensinvloeden op het binnenklimaat, voldoet het meten met een interval van zo'n 30 minuten. Een aanwezige klimaatinstallatie zal daarentegen soms iedere minuut zelf metingen uitvoeren om vervolgens ook iedere minuut aanpassingen te doen aan de condities van de lucht die de ruimtes wordt ingeblazen. Tabel 2 geeft voor verschillende verschijnselen een voorstel voor de duur en intervaltijd van metingen.

Het is vaak ook mogelijk om een alarmniveau in te stellen voor te hoge of te lage waarden bij dataloggers voor temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Ligt de waarde boven of onder de ingestelde waarden, dan gaat er in de meeste gevallen een LED lampje branden op de logger. In een grafiek van metingen over een bepaalde periode kan men zien of er veel overschrijding is van de alarminstelling, of niet. Nu het waarom, wat, waar en hoe over klimaatmetingen bekend zijn, kan de informatie vastgelegd worden. Zorgvuldig documenteren heeft verschillende voordelen:

- Het dwingt om precies aan te geven waar men naar op zoek is;
- Het is voor toekomstige beheerders mogelijk de gegevens te gebruiken;
- Het kan een aanzet zijn voor een volledige rapportage en externe belanghebbenden krijgen inzicht in de activiteiten die op dit gebied door de instelling worden uitgevoerd.

Tabel 2 Voorbeelden van bouwfysische verschijnselen en de intervaltijd waarmee het proces bestudeerd kan worden.

Verschijnsel	Duur van het proces	Intervaltijd van de meting	Duur van de meting
Dag/nachtcycli	Dag	15 min	1 week
Invallende zon	Uren - minuten	5 min	2 dagen
Deurenbeleid	Minuten	1 min	1 dag
Gedrag vitrine	Uren	5 min	Enkele dagen
Seizoenschommelingen	Jaar	15 min	Jaar

0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
%

Afsluitend

Het meten van het binnenklimaat is een relevant, maar complex thema. Er wordt veel geld en tijd geïnvesteerd om mogelijke risico's van een verkeerde temperatuur en/of relatieve luchtvochtigheid tot een minimum te beperken. Veel musea vertrouwen min of meer blindelings op klimaatbeheersingtechniek, zonder dat er enige kennis is over de kwaliteit van het binnenklimaat.
Met deze publicatie is geprobeerd enkele handvatten te bieden om zelfstandig en zinvol het binnenklimaat te meten. Het is duidelijk dat iedere situatie vraagt om een specifieke benadering. Er is kennis vereist om de loggers te programmeren en de verkregen data in een grafiek te verwerken en te analyseren. De investering in tijd en geld om inzicht te verwerven in het binnenklimaat is eigenlijk altijd terecht. Is het binnenklimaat naar verwachting? Moeten er aanpassingen gedaan worden en welk aspect van het binnenklimaat moet worden verbeterd? Op basis van metingen kunnen gerichte acties worden ondernomen en kan vervolgens geëvalueerd worden of ook deze effectief zijn gebleken. Zo worden onafhankelijke klimaatmetingen een vast onderdeel van de moderne museale bedrijfsvoering.

Foto pagina 29: Het registreren van het binnenklimaat met een analoge vochtmeter maakt het onmogelijk om het klimaat over een langere periode in kaart te brengen en de verschillen tussen dag en nacht en / of de seizoenen te zien.

23
56

RCE-publicaties over het binnenklimaat

RCE, Het binnenklimaat in het programma van eisen van erfgoedinstellingen, 2021.
RCE, Managing indoor climate risks, 2019.
RCE, Na-isolatie van historische woonhuizen Wegwijzer voor vakmensen, 2019.
RCE, Duurzame luchtbehandeling voor erfgoed-instellingen, 2018.
RCE, Kerkorgels en binnenklimaat, 2017.
RCE, Klimaatbeheersing in monumentale kerken, 2016.
RCE. De microklimaatdoos, 2004.
RCE, Het bewaren van fotografisch materiaal, 2002.

Foto pagina 31: De locatie van de sensor heeft grote invloed op de meetwaarden die worden geregistreerd. In dit geval zal de zon voor een tijdelijke opwarming van de lucht rondom de sensor en van de behuizing zorgen. Of dit lokale klimaat hiermee op dat moment representatief is voor de ruimte valt te bezien.

SIEMENS
340UT2
QFA3160
SIEMENS
16.1°C

Bijlage 1 - De relatie tussen temperatuur, absolute luchtvochtigheid en relatieve luchtvochtigheid

Temperatuur en de maximale absolute luchtvochtigheid

Afhankelijk van de temperatuur van de lucht kan deze een hoeveelheid waterdamp bevatten. Afbeelding 16 licht dit schematisch toe.

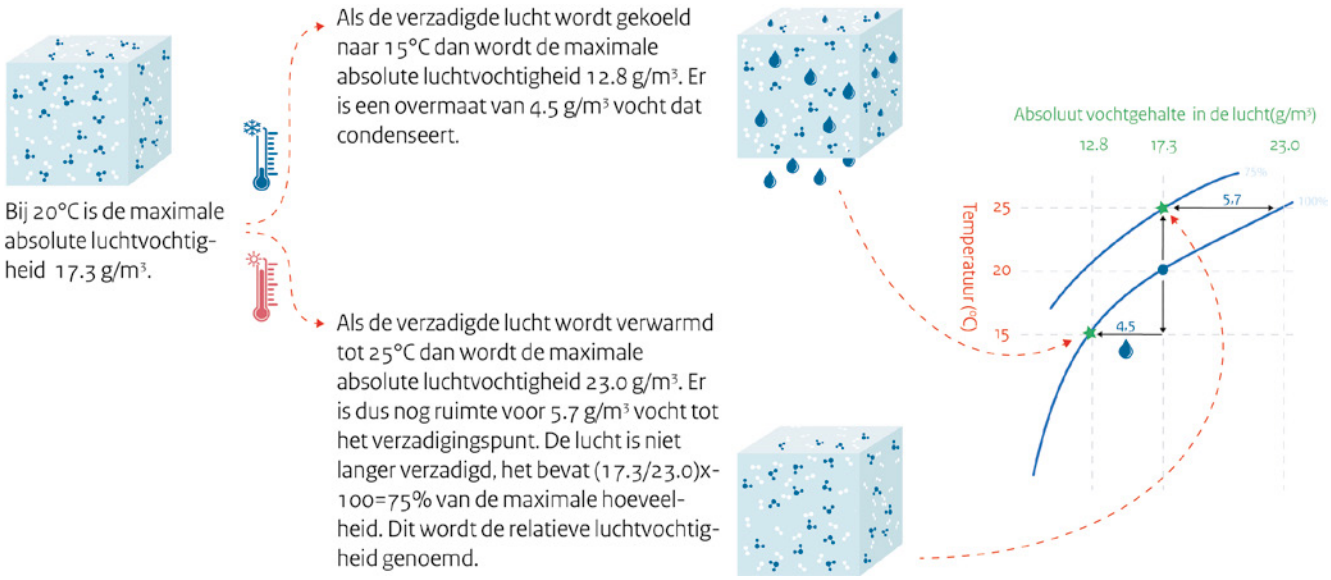
Afbeelding 16 De hoeveelheid waterdamp die de lucht maximaal kan bevatten is afhankelijk van de temperatuur.

Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid

De relatieve luchtvochtigheid is een resultante van de absolute luchtvochtigheid en de temperatuur. Als de lucht verzadigd is, dan is de relatieve luchtvochtigheid 100%. Maar als er minder dan de maximale hoeveelheid waterdamp is opgenomen, dan zal de relatieve luchtvochtigheid lager zijn. Afbeelding 17 licht dit schematisch toe.

Als de lucht bij een bepaalde temperatuur niet verzadigd is met waterdamp (dat willen zeggen dat de absolute luchtvochtigheid lager is dan de maximale absolute luchtvochtigheid), dan is de lucht niet verzadigd.
De verhouding tussen de absolute luchtvochtigheid (AV) en de maximale absolute luchtvochtigheid (AV_{max}) geeft de relatieve luchtvochtigheid:

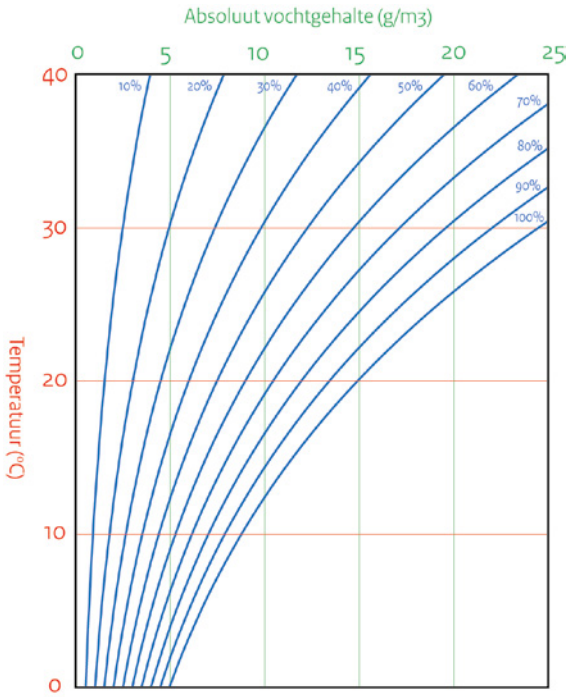
$$RV = \frac{AV}{AV_{max}}$$



Afbeelding 17 De relatieve luchtvochtigheid is afhankelijk van de temperatuur.

Foto pagina 33: In deze ruimte wordt het binnenklimaat met twee aparte sensoren gemeten: één voor de relatieve luchtvochtigheid en één voor de temperatuur.

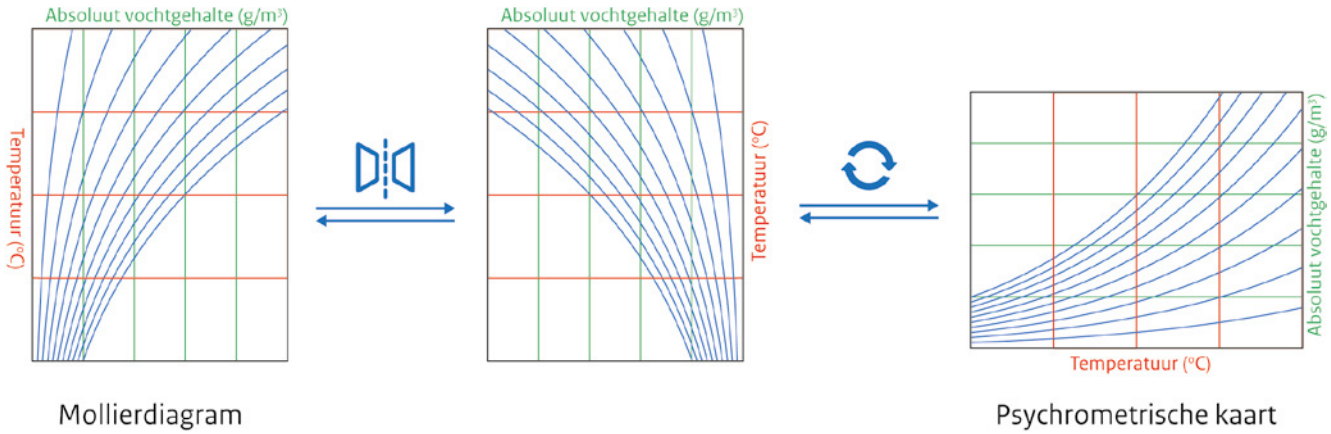
De relatieve luchtvochtigheid wordt bepaald door de temperatuur en de absolute luchtvochtigheid.
Voor verschillende combinaties van temperatuur en absolute luchtvochtigheid kunnen de lijnen van de verschillende relatieve luchtvochtigheden worden gevisualiseerd in een mollierdiagram (zie afbeelding 18).



Afbeelding 18 Het mollierdiagram. In dit diagram wordt de relatieve luchtvochtigheid (kromme blauwe lijnen) uitgezet tegen de absolute luchtvochtigheid (groene lijnen) op de horizontale x-as, en de temperatuur (rode lijnen) op de verticale y-as.

Van mollierdiagram naar psychrometrische kaart

In de praktijk komen we naast het mollierdiagram in de (inter)nationale literatuur ook vaak de Psychometrische kaart tegen. Beide figuren zijn inhoudelijk identiek, maar verschillen wat betreft hun uiterlijk. Het mollierdiagram is de Europese versie van de Angelsaksische Psychometrische kaart. Afbeelding 19 geeft de conversie weer van de één in de ander. In beide gevallen wordt de relatieve luchtvochtigheid (blauwe lijnen) gegeven als functie van de temperatuur (rode lijnen) en de absolute luchtvochtigheid (groene lijnen).



Afbeelding 19 De omzetting van een mollierdiagram in een Psychometrische kaart. Eerst moet de grafiek worden gespiegeld en daarna geroteerd.

Deze publicatie is bedoeld als praktisch hulpmiddel bij het monitoren van het museale binnenklimaat, zodat de lezer in staat wordt gesteld zelfstandig een meetplan voor het binnenklimaat op te stellen. In de brochure wordt ook kort en bondig ingegaan op enkele theoretische aspecten van het binnenklimaat en het belang van de responstijd als achtergrond bij het opstellen van een passend meetplan.