

VOORDRACHTEN VAN DE
VAKANTIE-LEERGANG
VOOR
WARMTETECHNIEK

GEHOUDEN OP 28 EN 29 AUGUSTUS

1973

Prijs f 25

hoofdafdeling
Maatschappelijke Technologie
TNO
afd. warmte en koudetechniek
Postbus 342
7300 AH APELDOORN
tel. 055-773344

CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO
AFDELING WARMTE- EN KOUDETECHNIEK

KONINKLIJK INSTITUUT VAN INGENIEURS
SECTIE VOOR WARMTETECHNOLOGIE

NEDERLANDSE TECHNISCHE VERENIGING
VOOR VERWARMING EN LUCHTBEHANDELING
TVVL

INHOUD

		Blz.
FACTOREN DIE DE KEUZE EN DE KOSTEN VAN EEN MEETTECHNIEK BEPALEN	<i>Ir. J. Claus</i>	4
TEMPERATUURMETINGEN	<i>Ir. G. Snellink</i>	9
SNELHEIDSMETINGEN EN HOEVEELHEIDSBEPALINGEN IN LUCHTINSTALLATIES	<i>Ing. G. van Winkoop</i>	17
EMISSIEMETINGEN AAN VERBRANDINGSINSTALLATIES	<i>Ing. Kiel</i> <i>Ing. W. F. M. Hesseling</i>	22
BEHAAGLIJKHEIDSMETINGEN	<i>Ing. H. Ph. L. den Ouden</i>	29
PRAKTIJKTOEPASSINGEN EN ERVARINGEN BIJ METINGEN AAN KLIMAATINSTALLATIES	<i>Ir. G. G. Franke</i>	39

Factoren die de keuze en de kosten van een meettechniek bepalen

door ir. J. Claus *)

SAMENVATTING

Uitgaande van een analyse van de vraag hoe de keuze van een meetmethode dient te geschieden, worden een aantal factoren besproken die deze keuze beïnvloeden. Onder meer komen ter sprake de invloed van de nauwkeurigheid, de frequentie van het gebruik van een instrument en een aantal praktische factoren zoals de toegankelijkheid van de installatie voor metingen en de bereikbaarheid van het meetpunt.

Speciale aandacht wordt besteed aan de grote invloed die voorschriften en keuringseisen hebben op de keuze en de kosten van een meetmethode.

1. INLEIDING

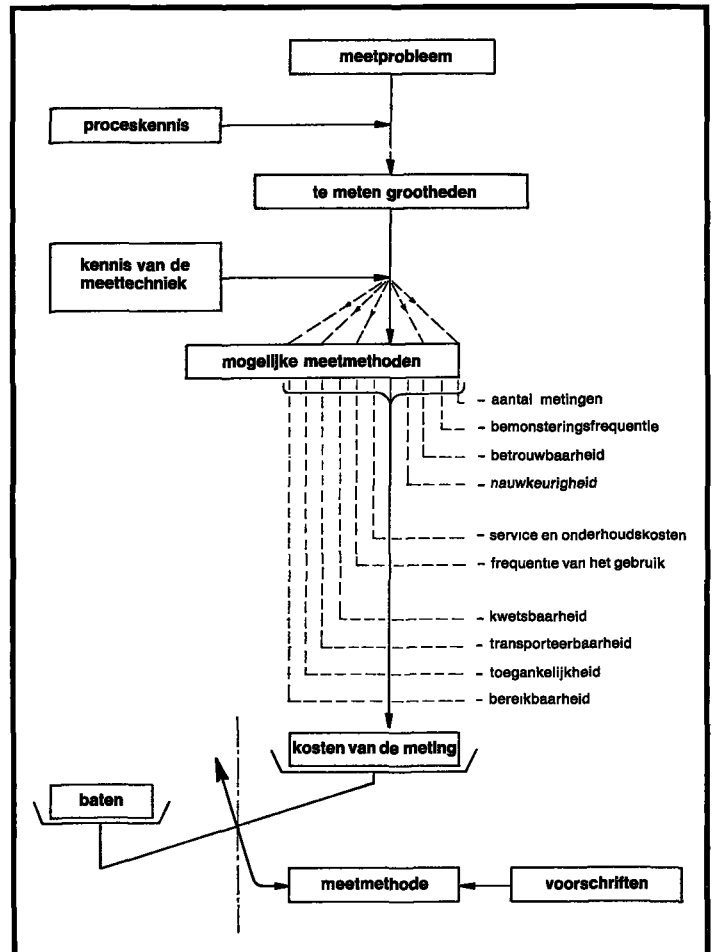
Door de vooruitgang van de elektronica, hebben meetinstrumenten en dataverwerkingsapparatuur de laatste jaren een enorme ontwikkeling doorgemaakt. De consequentie van deze ontwikkeling is geweest, dat verfijnde meettechnieken tot ontwikkeling zijn gebracht, waarmee zeer zwakke signalen over grote afstanden met nagenoeg geen verstoring op een uiterst verfijnde manier kunnen worden verwerkt en vastgelegd. Door gebruik te maken van een voldoende aantal „black boxes“ kunnen praktisch alle voorkomende metingen uiteindelijk worden vastgelegd op ponsband of tape en kan ervoor worden gezorgd dat de resultaten na verwerking in tabellen worden geprint of in grafieken worden geplot. Dit alles zonder tussenkomst van personen.

Het is logisch dat door een dergelijke ontwikkeling in een tijdperk van ruimtevaart en maanlandingen de indruk ontstaat dat ook op het gebied van „technische metingen“ aan alle voorkomende vragen en eisen moet kunnen worden voldaan. Nu valt niet te ontkennen dat veel van wat vroeger onmogelijk of moeilijk realiseerbaar was, thans kan worden gemeten of berekend. Wat we ons hierbij wel moeten realiseren is, dat de kosten die met geavanceerde metingen gemoeid zijn hoog zullen zijn en vaak een veelvoud zullen bedragen van op conventionele wijze uitgevoerde metingen. Het is daarom beslist noodzakelijk om bij het kiezen van een meettechniek en de verwerkingsapparatuur de daarmee gepaard gaande kosten grondig af te wegen tegen de voordelen die door het inzetten van deze apparatuur kunnen worden behaald.

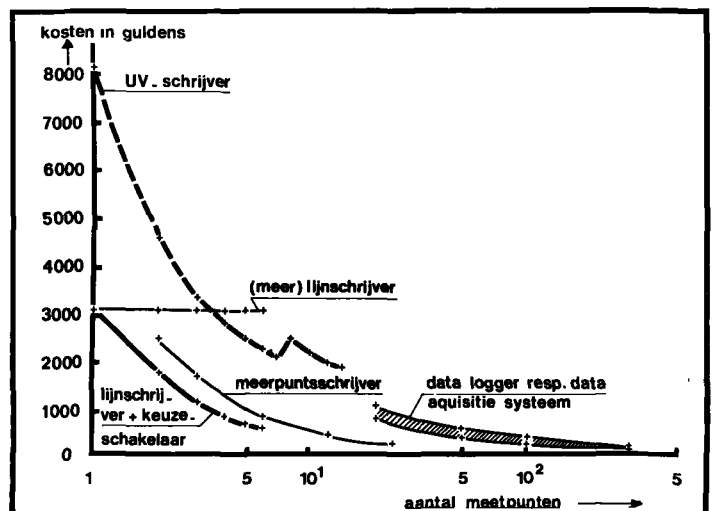
De aanleiding om metingen uit te voeren kan bij voorbeeld gelegen zijn in het feit dat moet worden nagegaan of een apparaat of installatie aan de garanti voorwaarden voldoet. Andere redenen voor het verrichten van metingen zijn: moeilijkheden met de installatie, onderzoek en ontwikkelingswerk, het controleren van beveiligingen enzovoort.

In al deze gevallen is er sprake van een *meetprobleem* (zie schema).

Voor de oplossing van dit probleem is in eerste instantie een goed inzicht vereist in de fysica van het proces. Met deze *proceskennis* zal het meetprobleem moeten worden geanalyseerd en zal moeten worden vastgesteld welke grootheden moeten worden gemeten, op welke plaats de metingen dienen te geschieden, met welke nauwkeurigheid en met welke bemonsteringsfrequentie.



Schematische voorstelling van de wijze waarop de keuze van een meetmethode tot stand komt.



1. Investeringskosten per meetpunt bij verschillende verwerkingstechnieken.

*)Centraal Technisch Instituut TNO, Apeldoorn

Is de proceskennis bij de met de meting belaste personen nodig om een juist meetprogramma te kunnen opstellen, bij de andere betrokkenen is een goede proceskennis van belang om begrip te kunnen opbrengen voor de kosten en moeite die met sommige metingen gepaard gaan.

Zijn de *te meten grootheden* bekend, dan zal met *kennis van de meettechniek* moeten worden vastgesteld welke *meetmethoden* in aanmerking komen om te worden toegepast bij de oplossing van het meetprobleem.

Aangezien het de bedoeling is dat in de overige artikelen van deze leergang uitgebreid aandacht wordt besteed aan de fysische factoren die bij de keuze van een meetmethode een rol spelen, zal in dit artikel hieraan geen aandacht meer worden geschonken. Deze inleiding zal zich verder richten op andere factoren die de keuze en de kosten van een meettechniek bepalen. Opgemerkt moet worden dat de volgorde waarin verschillende factoren zullen worden besproken geen rangorde van belangrijkheid inhoudt.

2. FACTOREN DIE DE KEUZE EN AANSCHAFKOSTEN VAN EEN MEETINSTRUMENT BEPALEN

2.1 Aantal metingen en bemonsteringsfrequentie

Bij het opstellen van meetprogramma's zal men zich moeten afvragen hoeveel meetpunten bemonsterd zullen moeten worden en met welke frequentie dit zal dienen te geschieden.

Bij de meeste installaties of processen zullen de metingen niet onder stationaire condities kunnen worden uitgevoerd, zodat het nodig zal zijn de waarnemingen op de een of andere wijze te registreren.

Voor een beperkt aantal punten en een geringe bemonsteringsfrequentie kan gebruik worden gemaakt van een lijnschrijver met keuzeschakelaar. Neemt het aantal meetpunten toe, dan komen achtereenvolgens de meerlijnschrijvers, de meerpuntsrecorders en de dataloggers met printer of ponsband in aanmerking. De laatste toepassing zal vooral aantrekkelijk worden wanneer na het vastleggen van de waarnemingen ook nog een berekeningsfase volgt. In dat geval kan de door de datalogger geproduceerde ponsband als drager van het ingangssignaal voor een computer worden gebruikt.

Vooral wanneer men tot deze laatste vorm van dataverwerking besluit, is het gewenst zich van tevoren zeer goed af te vragen in welke vorm de waarnemingen en de resultaten van de berekening beschikbaar moeten komen om het aantal waarnemingen niet te overdrijven.

De ervaring leert, dat men met deze apparatuur het gevaar loopt te veel waarnemingen te verzamelen.

In **afb. 1** is globaal aangegeven hoe de investeringskosten per meetpunt, die nodig zijn voor de meting en registratie, afhangen van de gekozen verwerkingstechniek en het aantal meetpunten. Deze vergelijking is opgesteld voor een bepaalde meetnauwkeurigheid. Door de kosten per meetpunt op deze wijze te benaderen, zal kunnen worden beoordeeld of de voordelen die een ander registratiesysteem biedt opwegen tegen de extra kosten die daarvoor moeten worden gemaakt.

De grens waarbij het aantrekkelijk wordt om op een ander en doorgaans duurder verwerkingssysteem over te gaan is nooit nauwkeurig te bepalen. Een reden om de signalen digitaal te verwerken kan bij voorbeeld ook zijn gelegen in het feit dat de grootte van de signalen die moeten worden geregistreerd onderling sterk verschillen. In dat geval heeft de combinatie digitale voltmeter, ponsband of printer de voorkeur boven de veel sterker aan een meetgebied gebonden recorder. Algemeen kan worden gesteld dat de verwerking met geavanceerde meetapparatuur (in de meest geperfectioneerde vorm de on-line computer) vooral bij ontwikkelingswerk en routinematige metingen lonend zal zijn.

2.2 Betrouwbaarheid

Hoewel de betrouwbaarheid van een meetinstrument of verwerkingstechniek altijd een belangrijke factor is, speelt ze een overheersende rol wanneer de metingen verregaand worden geautomatiseerd. Het eenmalig haperen van een scanner of van de

ponsbandapparatuur zal een geheel meetprogramma, waardeeloos maken.

Bij metingen van dit type zal men dus gebruik moeten maken van meetmethoden en meetinstrumenten die in de praktijk hebben bewezen gedurende lange tijd zonder toezicht goed te blijven functioneren en zal men met regelmatige tussenpozen controlemetingen in moeten lassen.

Een overheersende rol speelt de betrouwbaarheid ook bij regelen en beveiligingssystemen. Het falen van een klein onderdeel van zo'n systeem zal tot gevolg kunnen hebben dat processen worden onregelmatig of beveiligingen niet meer functioneren. Zeker wanneer het falen van een meet- of verwerkingsmethode risico's voor mensen inhoudt, zullen aan de betrouwbaarheid hoge eisen moeten worden gesteld.

Het gevaar bestaat dat men door toepassing van extra beveiligingen een systeem als het ware „overbeveiligt“, hetgeen tot gevolg kan hebben dat door de toegenomen kans op storingen de „beschikbaarheid“ van een installatie afneemt. Bovendien nemen de kosten onnodig toe.

Om tussen betrouwbaarheid en beschikbaarheid een goed evenwicht te vinden, zal in feite een risico-analyse van een meetstelsel gemaakt moeten worden. Dat met behulp van deze techniek uitermate betrouwbare meet- en verwerkingstechnieken kunnen worden ontwikkeld is met de maanreizen uit het Apollo-project bewezen.

Helaas ontbreken voor meer aardse meet-, regel- en beveiligingssystemen vaak nog de gegevens die het verrichten van een dergelijke analyse mogelijk maken.

2.3 Nauwkeurigheid

Een zeer belangrijke factor bij de keuze van een meetmethode is de nauwkeurigheid waarmee de metingen moeten worden verricht. In het algemeen zullen de kosten die met een meting gemoeid zijn, toenemen naarmate de eisen die men aan de nauwkeurigheid stelt hoger zijn. Het stijgen van de kosten met een hogere nauwkeurigheid wordt niet alleen veroorzaakt door de extra zorg die aan de verwerking van de signalen moet worden besteed. Ook hier geldt, dat de zwakste schakel in de keten de werking van het geheel bepaalt. Een met onvoldoende nauwkeurigheid gemeten signaal zal ook met de duurste verwerkingsapparatuur tot onvoldoende resultaten leiden. Omgekeerd zal een met zorg gekozen en uitgevoerde meetmethode kunnen worden bedorven door de toepassing van componenten van onvoldoende kwaliteit in de verwerkingscyclus.

Bij het bepalen van de nauwkeurigheid waarmee een meting zal of moet worden uitgevoerd, dient men zich terdege rekenschap te geven van het belang van de betreffende meting in het beeld van het gehele onderzoek. Zo zal men zich in ieder geval moeten realiseren dat, wanneer er ook nog andere metingen moeten worden uitgevoerd, de nauwkeurigheid van alle metingen op elkaar moeten worden afgestemd. Ook zal men in aanmerking moeten nemen, dat de nauwkeurigheid soms sterk wordt beïnvloed door de omstandigheden waaronder de metingen in de praktijk moeten worden uitgevoerd.

Het toepassen van meetapparatuur met een grote nauwkeurigheid zal ook hoge eisen stellen aan de condities van de omgeving waarin de metingen moeten worden verricht. Een bekend voorbeeld is de geconditioneerde omgeving die in sommige meetkamers moet worden gehandhaafd.

In de praktijk van warmte-technische metingen zal men dikwijls te maken hebben met meetopstellingen die naast of in ruimten van hoge temperatuur zijn opgesteld. De invloed hiervan op de werking van de apparatuur zal men bij een beoordeling van de nauwkeurigheid zeker niet kunnen veronachtzamen. Een goed voorbeeld hoe een meting met een zeer nauwkeurig meetinstrument toch kan worden bedorven door de invloed van de omgeving is de bepaling van de oppervlakte temperatuur van een object met behulp van stralingsmetingen. Door de verevorderde ontwikkeling van de infrarood meettechniek is het mogelijk, althans op papier, de temperatuur van objecten contactloos zeer nauwkeurig te meten. Temperatuurverschillen van 0,1 °C kunnen daarbij ge-

makkelijk worden aangetoond. Een toepassing van deze apparatuur is bij voorbeeld het lokaliseren van slechte plekken in geïsoleerde wanden van koelkasten, containers en dergelijke.

Bij deze meettechniek dient men zich te realiseren dat niet alleen de door het meetpunt uitgezonden straling wordt waargenomen, maar dat ook de door het object in de richting van de detector gereflecteerde straling wordt gemeten. Dit betekent dat een in de experimentele ruimte geplaatst verwarmingselement, een door de zon verwarmde wand en dergelijke, een volkomen verkeerd beeld van de kwaliteit van de isolatie kunnen geven.

Om bij een dermate gevoelig instrument de storende invloed van de omgeving uit te sluiten, zullen dus extra voorzieningen nodig zijn waarvan de kosten bij de aanschaf en de toepassing van het apparaat in aanmerking moeten worden genomen.

Zoals reeds eerder is gesteld zullen in het algemeen met de nauwkeurigheid de kosten van het meetsysteem toenemen.

Een uitzondering hierop is bij temperatuurmetingen de glasthermometer. Met dit, van de gebruikelijke temperatuurmeters goedkoopste instrument, kunnen in statische condities met laboratoriuminstrumenten meetnauwkeurigheden worden bereikt van 0,5 % van het schaalbereik, een nauwkeurigheid die bijvoorbeeld met de combinatie geïjkt thermokoppel-automatische compensator niet mogelijk is. Natuurlijk vervalt het voordeel van de glasthermometer bij dynamische metingen waarvoor de snel reagerende thermokoppels in aanmerking komen, maar het is goed dat men zich realiseert dat voor bepaalde toepassingen de eenvoudige en dus goedkopere meters vaak zeer goed zullen voldoen.

Sprekende over temperatuurmetingen is het wel illustratief om te laten zien hoe met het groter worden van de invloed van de elektronische apparatuur de nauwkeurigheid in de temperatuurmeettechniek zich heeft ontwikkeld en de prijzen zijn beïnvloed. **Tabel 1** geeft hiervan een overzicht.

De tabel is opgesteld voor temperatuurmeters van industriële uitvoeringen voor waarnemingsapparatuur van eenzelfde fabrikaat. Voor een onderlinge vergelijking van deze apparatuur moet een meetgebied gekozen worden dat voor alle meettechnieken hetzelfde is. In dit geval is gekozen voor een meetgebied van 0-600 °C en een meetgebied van 350-400 °C. De industriële glasthermometer is veruit de goedkoopste meetmethode. De nauwkeurigheid van deze meter is daarbij zeer goed en wordt alleen in het hogere temperatuurgebied overtroffen door de weerstandsthermometer, die echter vele malen duurder is.

De kosten per meetpunt bij een meting met een handelskoppel en een mV-meter hangen sterk af van de klasse van het gebruikte meetinstrument. De hier gegeven globale waarden gelden voor een klasse 1 en klasse 0,5 instrument. De nauwkeurigheid van deze meetmethode is zeker bij lagere temperaturen beduidend geringer dan die van de glasthermometer. Voor een nagenoeg even grote nauwkeurigheid als bij een draaispoelinstrument klasse 0,5, zullen de kosten bij een temperatuurmeting met een digitale aanwijzing in °C veel hoger uitvallen.

Ook vergeleken met de automatische compensator is de digitale meter duurder. Dit verschil is echter gering en zal in sommige gevallen opwegen tegen het voordeel van de snelle afleesbaarheid van een digitaal weergegeven temperatuur.

3. FACTOREN DIE DE KEUZE EN DE GEBRUIKSKOSTEN VAN EEN MEETINSTRUMENT BEPALEN

3.1 Service en onderhoudskosten

Hoewel verwacht zou mogen worden dat met het toenemen van de technische mogelijkheden de kwaliteit van de afgeleverde meet- en regelapparatuur gelijke tred zou houden, blijkt dit lang niet altijd het geval te zijn. De minder zorgvuldige uitvoering en behandeling van meetapparatuur is er dan ook dikwijls de oorzaak van dat nieuw gekochte apparatuur in het geheel niet aan de gestelde specificaties voldoet, of dat tijdens het bedrijf herhaaldelijk storingen optreden.

In die gevallen speelt de mate waarin terug kan worden gegrepen op service van fabriek of handelsfirma een grote rol in de uiteindelijke kosten die een storing met zich meebrengt.

Het is dan ook zeker geen overbodige zaak om bij de aanschaf van een nieuw type meetinstrument referenties hierover te vragen en eventuele bestaande evaluatietests te bestuderen.

3.2 Frequentie van gebruik

Aangezien door de snelle ontwikkelingen op het gebied van de meetapparatuur de meetinstrumenten snel verouderen, is het noodzakelijk de afschrijving hieraan aan te passen. Zeker voor instrumenten die bij automatisering en dataverwerking worden toegepast geldt dat alleen een frequent gebruik de investeringen zal terugbetalen.

Voor een enkele meetserie aan één installatie zullen daarvoor de metingen om economische redenen meestal niet geautomatiseerd kunnen worden uitgevoerd. Gebruik van geautomatiseerde apparatuur wordt in zo'n geval wel mogelijk wanneer gebruik wordt gemaakt van bij laboratoria beschikbaar potentieel.

Veel laboratoria zijn regelmatig betrokken bij metingen van eenzelfde karakter. Hierdoor zullen voor deze instellingen de kosten per meting wel laag kunnen blijven en zal tegen voor één meting relatief geringe kosten van de voordelen van automatische dataverwerking gebruik kunnen worden gemaakt.

Bij instrumenten waarvoor de hier geschetste problematiek geldt, zal het ook nodig zijn om over uitgebreide meetervaring en routine te beschikken om een goede verwerking van de meetresultaten te garanderen. Het zal daarom beslist nodig zijn om bij het beoordelen van het al of niet toepassen van een meettechniek niet alleen de aanschafkosten van een instrument te rekenen, maar ook die kosten in te calculeren die gemoeid zijn met het opbouwen van de nodige meetervaring en meetroutine. De hiermee gepaard gaande kosten kunnen die van de aanschaf van het instrument vele malen overtreffen, zeker bij ingewikkelde meettechnieken.

In **tabel 2** is een overzicht gegeven van de investeringskosten die gemoeid zijn met de apparatuur die nodig is voor het uitvoeren van een garantiemeting aan een middelgrote vuilverbrandingsinstallatie. Hierbij is er van uitgegaan dat een „eenvoudige” gasanalyse wordt uitgevoerd en niet behoeft te worden gebruikt gemaakt van kostbare analysetechnieken zoals massaspectrometrie. De stofmeting waarvan bij deze meting sprake is, is semi-continu en wordt volledig automatisch uitgevoerd.

Met de post „Personeel” is een schatting aangegeven van het bedrag dat gedurende een halfjaar is besteed aan opleiding en training van het meetteam dat voor het uitvoeren van deze meting nodig is. De hiermee gemoeide kosten bedragen nagenoeg het dubbele van de kosten aan apparatuur.

Voor een beperkt aantal meetseries zal het zelf opbouwen van deze ervaring en routine nooit verantwoord zijn, ook al niet omdat zonder het regelmatig werken met de instrumenten de routine niet op het vereiste peil zal blijven.

In het algemeen kan worden gesteld, dat het bij een beperkt aantal metingen economisch aantrekkelijk zal zijn om de hulp in te roepen van laboratoria die over de nodige deskundigheid beschikken en op deze wijze als het ware niet alleen het instrument maar ook de meetervaring en meetroutine te kopen.

4. FACTOREN DIE DE KEUZE EN KOSTEN VAN DE METING BEPALEN

De tot nu toe besproken punten hebben allemaal een duidelijk directe invloed op de kosten van het meetinstrument en dus op de kosten van een meting.

Naast deze factoren bestaan er ook nog een aantal die de kosten van de meting indirect beïnvloeden, doordat ze om metingen mogelijk te maken extra voorzieningen vereisen aan de meetapparatuur of de te onderzoeken installatie. Ook zullen sommige factoren de mogelijkheid een bepaalde meettechniek toe te passen blokkeren. Van dit type factoren volgen hierna een aantal voorbeelden.

4.1 Kwetsbaarheid

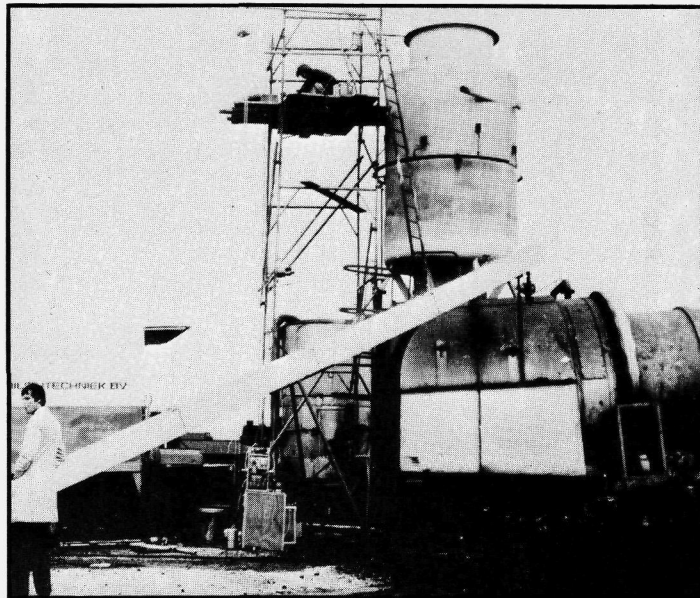
Voor metingen in het kader van R & D werk in het laboratorium, zal de kwetsbaarheid nauwelijks enige invloed hebben op de keu-

Meetmethode	nauwkeurigheid in C		investering/meetpunt in guldens	Opmerking
	meetgebied 0-600 C	meetgebied 350-400 C		
glasthermometer	± (1-6)	± 2,5	75	
koppel + draaispoel instrument	± (8-11) (5-8)		270 600	
koppel + autom. compensator	± (3-6)	± 3,2	3000 425	1 lijnschrijver 12 puntsschrijver
koppel + digitale aan- wijzing in C	± (4,5-7) ± (3-6)	± 4,5 ± 3,6	2700 3900	beide voor 1 meetpunt meetgeb. -130-1300 C resp. -215-400
weerstandsthermometer + aut. compensator	± (1-3)	± 1	3200 500	1 lijnschrijver 12 puntsschrijver

Tabel 1. Kostenvergelijking tussen verschillende soorten temperatuurmetingen.

Stofmeetapparatuur	f 35.000
Gasanalyse apparatuur	f 80.000
Dauwpunt- en temperatuurmeting	f 10.000
Hoeveelheidsmetingen (rookgas + water)	f 20.000
Diverse meetapparatuur	f 15.000
	f 160.000
Opleiding personeel	f 300.000

Tabel 2. Investeringskosten voor een garantiemeting aan een verbrandingsinstallatie voor huisvuil.



2. Emissiemetingen aan een afvalverbrandingsinstallatie.

ze van de meettechniek, aangezien daar voldoende voorzorgen kunnen worden getroffen voor de juiste behandeling van het instrument.

Voor „trouble shooting” metingen die „te velde” moeten worden verricht, zal daarentegen juist aan dit punt speciale aandacht moeten worden besteed. Bij metingen in een bedrijf dienen vaak bijzondere voorzieningen te worden aangebracht; de installatie moet zorgvuldig worden afgesteld en aan de bedrijfsvoering tijdens de beproevingen zal extra aandacht moeten worden besteed. In sommige gevallen leidt zo'n meting zelfs tot een tijdelijke onderbreking van het productie proces.

Het is duidelijk dat de meetploeg alles in het werk zal moeten stellen om te bereiken dat de productie niet langer dan noodzakelijk wordt beïnvloed door de meting. Het instrumentarium zal daarom

bestand moeten zijn tegen de relatief ruwe bedrijfsomstandigheden en tegen het transport naar de meetplaats. De in de handel verkrijgbare apparatuur is lang niet altijd voor praktijkmetingen ontworpen. Dit betekent dat instrumenten die op een laboratorium zeer goed bruikbaar zouden zijn geweest niet altijd bij praktijkmetingen kunnen worden ingezet. Dit zal in sommige gevallen tot concessies in de meetnauwkeurigheden en de meetsnelheid leiden. Een voorbeeld van een meettechniek die om deze reden door ons slechts zelden direct in de praktijk wordt toegepast is de volledige rookgasanalyse met de gaschromatograaf.

Met dit apparaat zou het mogelijk zijn om met het nemen van één gasmonster te volstaan en daarvan een volledige analyse op CO₂, CO, H₂, O₂, N₂ binnen 5 minuten uit te voeren.

De bijzondere voorzieningen die in verband met de kwetsbaarheid voor het transport van dit apparaat getroffen moeten worden zijn er onder andere (omvang, stabiliteit, draaggassen en dergelijke spelen ook een rol) de oorzaak van dat de inzet van dergelijke apparatuur beperkt blijft tot die gevallen waarbij de voordelen van de meettechniek de nadelen van de te treffen voorzieningen duidelijk overtreffen.

4.2 Toegankelijkheid

De toegankelijkheid van het meetobject voor metingen zal een belangrijke invloed hebben op de kosten die met de meting gemoeid zijn. Uiteraard zal dit vooral een rol spelen bij metingen die aan praktijkinstallaties moeten worden verricht. De ervaring die wij met praktijkmetingen hebben is, dat bij de opbouw van installaties te weinig rekening wordt gehouden met de mogelijkheid dat er wel eens metingen gedaan zouden moeten worden.

Blijkt het dan in een later stadium toch nodig om aan het apparaat of de installatie metingen te verrichten, dan zullen vaak tegen relatief hoge kosten speciale meetvoorzieningen moeten worden aangebracht. Dit punt kan worden geïllustreerd aan de hand van een capaciteitsmeting aan een koelinstallatie van een koelhuis. Bij deze meting is het nodig om de in het systeem circulerende hoeveelheid ammoniak te meten. Dit wordt gedaan door middel van een speciaal voor deze metingen geconstrueerde meetset waarin de hoeveelheid ammoniak met een geijkte turbine flowmeter wordt gemeten. Om de inbouw van deze meetset in het koelsysteem mogelijk te maken moeten niet alleen aansluitflenzen voor de meetset worden aangebracht, maar moet het systeem ook gedeeltelijk worden afgetapt en uiteraard na inbouw weer worden gevuld.

De hiermee gemoeide kosten kunnen voor een eenvoudige meting tot 50 % van de totale kosten van de meting oplopen. De inbouwkosten zouden voor dit geval aanzienlijk minder zijn geweest (1/5) indien direct bij de opbouw van de installatie door het aanbrengen van spruitstukken en afsluiters de mogelijkheid voor snelle aansluiting van een meetinstrument zou zijn aangebracht. Veel belangrijker is voor dit geval echter de veel kortere bedrijfs-onderbreking die daardoor mogelijk zou zijn geweest waardoor de onderbreking van het koelproces tot een minimum zou zijn beperkt.

Het is daarom aan te bevelen om in installaties direct bij de aanleg meetmogelijkheden voor een eenvoudige garantie- of controlemeting in te bouwen. In ieder geval zal dit moeten gebeuren wanneer in het bestek bepaalde garantievoorwaarden zijn genoemd en deze bij oplevering moeten worden gecontroleerd.

4.3 Bereikbaarheid

Bij metingen „te velde” zal men vaak worden geconfronteerd met het feit dat de plaatsen waar de metingen gedaan moeten worden moeilijk bereikbaar zijn.

Een voorbeeld hiervan illustreert **afb. 2** die een beeld geeft van de voorzieningen die moesten worden getroffen voor een emissiemeting aan een verbrandingsinstallatie voor huishoudelijk afval. Voor deze meting moest een speciaal meetbordes worden gebouwd waarop de meetapparatuur kon worden opgesteld.

Een ander voorbeeld is een meting van de capaciteit van een verwarmingsinstallatie van een tank van een tanker voor het transport van zware olie. Hiertoe moesten in de tank meetpunten wor-

den aangebracht waarvan de registratie moest geschieden in een meethut op het achterschip. Voor het aanbrengen van de koppels moest in totaal pl.m. 2000 m koppeldraad worden uitgelegd. De voorbereiding van de meting vergde in totaal 2 maanden. De eigenlijke meting was binnen twee dagen voltooid.

Deze voorbeelden illustreren hoe de bereikbaarheid van de meetpunten een grote invloed zal hebben op de kosten van een meting. Vaak worden de meeste kosten gemaakt om een meetpunt te bereiken en de meetapparatuur op te stellen.

5. BATEN

Wanneer op grond van beschouwingen als de voorgaande bepaalde meetmethoden aan een aantal meer of minder belangrijke criteria zijn getoetst, zal kunnen worden vastgesteld welke meting praktisch bruikbaar is, en wat de *kosten van de meting* zullen zijn. Zijn die bekend, dan zullen deze kosten moeten worden gesteld tegenover de *baten* die met het oplossen van het meetprobleem worden verkregen. De *meetmethode* die de balans naar de positieve kant laat doorslaan zal dan bij het oplossen van het *meetprobleem* moeten worden toegepast.

Niet in alle gevallen zal van duidelijke baten sprake zijn, zeker niet, wanneer de meting een onderdeel vormt van een veel groter onderzoek. Een duidelijk voorbeeld van het verkrijgen van besparingen is het inzetten van bepaalde meet- en regelapparatuur waardoor met minder bedienend- of bewakingspersoneel kan worden volstaan. Maar ook bij toepassing van instrumenten bij controlemetingen zal men zich moeten realiseren dat door een doelmatige controle een slechte bedrijfsvoering en daarmee te hoge bedrijfskosten kunnen worden gesignaleerd en vermeden. De heilzame preventieve werking die van controlemetingen uitgaat moet daarbij niet worden onderschat.

6. VOORSCHRIFTEN

De zojuist besproken gang van zaken, die uiteindelijk leidt tot de keuze van een *meetmethode*, behoeft niet te worden gevolgd wanneer de toe te passen meettechnieken in voorschriften zijn omschreven. Dit kan bij voorbeeld het geval zijn bij garantie- en controlemetingen, waarvoor de uit te voeren metingen tot in de details zijn omschreven en bij voorbeeld in een normalisatievoorschrift uitgebreid is toegelicht hoe en met welke nauwkeurigheid de metingen moeten worden uitgevoerd en verwerkt.

Deze genormaliseerde beproevingen beperken zich meestal tot de onderdelen van de gehele installatie, zoals de ketel, de luchtverhitters, de luchtkoelers etc.

In verband met de grote invloed van deze voorschriften op de keuze van de meettechniek en de kosten die met de metingen gemoeid zijn, zal op de wijze waarop deze voorschriften worden opgesteld iets nader worden ingegaan.

De voorschriften worden doorgaans opgesteld door normalisatiecommissies of keuringseisencommissies die zich in feite bij het opstellen van de voorschriften ook rekenschap zouden moeten geven van het feit, dat zij de kosten die met de toe te passen methodiek gemoeid zijn, voor anderen vaststellen.

In het ideale geval zal men zich bij het opstellen van meetmethoden om de eigenschappen van apparaten te bepalen analoog aan het hiervoor gestelde, goede rekenschap geven van de werking van het toestel (proceskennis) om in logisch vervolg daarop vast te stellen met welke metingen deze eigenschappen moeten worden bepaald (kennis van de meettechniek). In de praktijk blijkt helaas, dat men toch (voortijdig) tot het ontwikkelen en voorschrijven van meetmethoden overgaat, alvorens het fysisch gedrag van het te beproeven apparaat te kennen. Wanneer dan voor het verrichten van de metingen ook nog unieke en daardoor kostbare meetfaciliteiten zijn aangeschaft, zal het vrijwel niet meer mogelijk zijn om in goed overleg tot een andere meetmethode te komen. Hierdoor worden anderen verplicht om of eenzelfde dure meetopstelling te bouwen of de metingen tegen hoge kosten te laten uitvoeren.

Aangezien door het stellen van de nauwkeurigheidseisen de kosten van een meting sterk worden beïnvloed, zal men zich ook bij

het opstellen van voorschriften voortdurend moeten afvragen, of de nauwkeurigheid van de metingen wel is afgestemd op het gebruik van het apparaat in de praktijk.

Het heeft technisch gezien weinig zin om de beproeving van een apparaat zodanig te perfectioneren dat de capaciteit op enkele procenten nauwkeurig kan worden bepaald om daarna het apparaat op grond van de beproevingsresultaten te kiezen voor een toepassing, waarbij de werkcondities van het toestel sterk afwijken van de beproevingscondities. Dat in bepaalde gevallen vanuit technische standpunt bezien, toch irreële nauwkeurigheden worden voorgeschreven, vindt vaak zijn oorzaak in concurrentie overwegingen en het eerder genoemde feit dat in reeds bestaande meetopstellingen grote bedragen zijn geïnvesteerd.

In het kader van dit artikel dient op nog een ander aspect van het opstellen van voorschriften te worden gewezen.

Het komt nogal eens voor dat in voorschriften de te verrichten metingen tot in de kleinste details zijn omschreven. Als reden voor het op deze wijze opzetten van voorschriften wordt dan gesteld, dat het voor iedereen mogelijk moet zijn om volgens het voorschrift metingen te verrichten. Hoewel tegen dit streven op zichzelf geen bezwaren behoeven te bestaan, zal het iedereen die zelf wel eens metingen aan de hand van een voorschrift heeft verricht duidelijk zijn, dat men alleen met een voorschrift geen goede meting zal kunnen garanderen en dat meetervaring daarbij een onmisbare zaak is. Is het aan de ene kant dus zo, dat ook met het opstellen van een zo uitgebreid en nauwkeurig mogelijke omschrijving niet kan worden vermeden dat fouten zullen worden gemaakt, aan de andere kant houdt een te nauwkeurige omschrijving van een meetmethode het gevaar in, dat het toepassen van nieuwe, betere en goedkopere meettechnieken wordt geblokkeerd.

Veel beter is het daarom om in voorschriften de omschrijving van een meetmethode te beperken tot het aangeven van de vereiste nauwkeurigheid en de toe te passen meettechniek over te laten aan de deskundigen van de beproevingslaboratoria. Eventueel kan dan in een appendix bij een voorschrift een voorbeeld van een meetopstelling en/of meettechniek worden gegeven.

In de praktijk zal niet in alle gevallen waarin een garantiemeting moet worden uitgevoerd terug kunnen worden gegrepen op normalisatie- of keuringsvoorschriften. Dit is bij voorbeeld het geval voor de afnamebeproeving van complete verwarmingsinstallaties, koelinstallaties en luchtbehandelingsinstallaties. Ook al zijn deze installaties opgebouwd uit componenten die ieder afzonderlijk met behulp van genormaliseerde beproevingen zijn getest, dan is het nog lang niet zeker dat de gehele installatie aan de gestelde eisen zal voldoen. De kans dat door een onjuiste combinatie van verschillende componenten de totale installatie niet aan zijn doel beantwoordt, is allerm minst uitgesloten. Een meting die de werking van de gehele installatie vaststelt zal dan ook zeker aan te bevelen zijn.

Om achteraf misverstanden te voorkomen over de wijze waarop een dergelijke garantiemeting moet worden uitgevoerd, is het noodzakelijk om voor de aanleg van de installatie af te spreken aan welke minimumeisen de installatie moet voldoen en met welke instrumenten en verwerkingsapparatuur zal worden bepaald of aan de gestelde eisen wordt voldaan.

Ook hierbij zal erop moeten worden gelet dat de nauwkeurigheid van de metingen overeenkomt met de eisen die in de praktijk aan een installatie worden gesteld.

Temperatuurmetingen

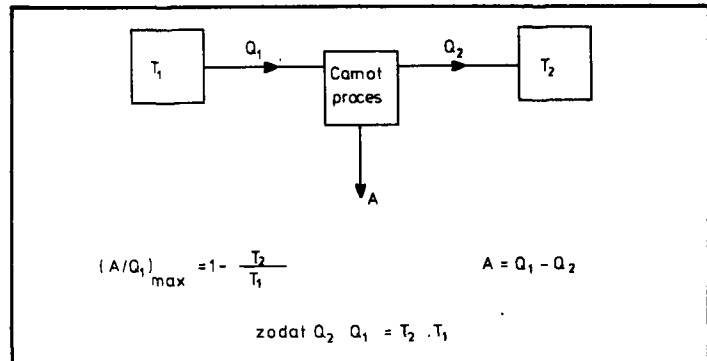
door ir. G. Snellink *)

INLEIDING

De techniek van het meten van temperaturen heeft zoveel facetten, dat binnen het kader van deze leergang noodzakelijkerwijze slechts een kleine selectie van de diverse aspecten van deze techniek kan worden behandeld. Bij het maken van deze selectie heb ik mij laten leiden door de wens om enerzijds een redelijk volledig overzicht te geven van de meetapparatuur die algemeen beschikbaar is voor het werkgebied van de warmtetechniek (opwekking, transport en gebruik van warmte) en anderzijds door de wens om op enige bijzondere problemen iets dieper in te gaan. Het zijn juist deze problemen die het goed meten van temperaturen zowel moeilijk als tot een interessante uitdaging maken. Het begint in feite al met de vraag naar het begrip temperatuur, hetgeen uiteindelijk gekoppeld blijkt met de bewegingssnelheid van de moleculen. Aangezien deze grootte voor praktische doeleinden niet meetbaar is, wordt voor het vaststellen van een schaal voor temperatuureenheden een afgeleid verschijnsel benut. De meest bekende schaal is de **temperatuurschaal van Celsius**. Hierbij zijn twee punten gekozen, namelijk het smeltpunt van ijs en het kookpunt van water bij standaardcondities. Door deze keuze en door het toekennen van numerieke waarden ligt deze schaal in feite geheel vast. Een gewone kwik-in-glas thermometer kan op deze waarden worden geijkt en het tussenliggende gebied in 100 gelijke delen worden verdeeld.

De stand van de kwikdraad in de thermometer verschuift echter als gevolg van de verschillen in uitzetting tussen kwik en glas ten gevolge van temperatuurverandering en deze uitzettingsverschijnselen verlopen niet lineair met de temperatuur. Het gevolg is dat, indien we een ander soort glas als mantel gebruiken, of een andere vloeistof als vulling, de aldus gevonden schalen niet met elkaar overeen zullen komen. Hoewel de verschillen niet groot behoeven te zijn is dit principieel ontoelaatbaar en het is bovendien niet te verdedigen om willekeurig een van deze thermometers tot standaard te verheffen. De keuze van Celsius ten aanzien van de meetmethode was dus op zich niet voldoende om willekeurige punten op de temperatuurschaal te bepalen, omdat er geen controlemogelijkheid is of de honderd gelijke schaaldelen inderdaad ook met gelijke temperatuurverschillen overeenkomen.

Om dit probleem op te lossen is de zogenaamde **thermodynamische temperatuurschaal** ingevoerd. Deze is gebaseerd op het rendement van een Carnot-proces, waardoor de bepaling van de verhouding van twee temperaturen wordt uitgevoerd via de bepaling van de verhouding van twee warmtehoeveelheden (afb. 1). Ook rechtvaardigt deze keuze het gebruik van de Wet van Boyle en Gay-Lussac, die aangeeft dat het produkt van druk en volume van een ideaal gas recht evenredig is met de temperatuur ($p \cdot V = R \cdot T$). Deze laatste wordt ook wel de **Avogadro-schaal** genoemd. Voor deze thermodynamische temperatuurschaal is de eenheid gelijk gekozen aan die van de schaal van Celsius, doordat het nulpunt is gedefinieerd en het tripelpunt van water is vastgesteld op 273,16 Kelvin.



1. Grondslag van de thermodynamische temperatuurschaal

Voor praktisch gebruik heeft men de **Internationale Praktische Temperatuurschaal** aanvaard. Deze schaal wordt gekenmerkt door een aantal vaste punten benevens interpolatievoorschriften voor tussengelegen waarden. De elf vaste punten, die goed reproduceerbaar zijn, lopen van het tripelpunt van waterstof (-259,34°C) tot aan het smeltpunt van goud (1064,4°C). De tussen de vaste punten gelegen waarden worden bepaald met behulp van gestandaardiseerde methoden zoals bijvoorbeeld door het leggen van een empirisch verband tussen de verhouding van de weerstanden van een genormaliseerde weerstandsthermometer. De twee of drie empirische coëfficiënten, die in de diverse gebieden tussen deze vaste punten gebruikt worden, zijn zo gekozen, dat de IPTS de thermodynamische temperatuurschaal zo goed mogelijk volgt. De IPTS blijft echter altijd ondergeschikt aan de thermodynamische temperatuurschaal, hetgeen inhoudt dat de temperaturen van de vaste punten op de IPTS veranderd kunnen worden, indien er door nauwkeuriger meetmethoden verschil tussen beide schalen blijkt te bestaan. Hoewel er nog andere temperatuurschalen bestaan, bijvoorbeeld Fahrenheit, zullen we daar niet verder op ingaan (in de anglosaksische literatuur ontmoet men nog wel eens de Rankine-schaal, dit is een schaal die evenals Kelvin bij het absolute nulpunt begint. De eenheid van de schaal komt overeen met die op de schaal van Fahrenheit).

MEETMETHODEN

Het feit dat het definiëren van een temperatuurschaal en het nauwkeurig positioneren van een punt op die schaal zo moeilijk is wordt beslist niet veroorzaakt door een gebrek aan duidelijke en reproduceerbare gevolgen van een temperatuurverandering. Het aantal fysieke verschijnselen dat voor temperatuurmeting gebruikt kan worden, en ook gebruikt wordt, is zeer groot. Bij technische metingen worden onder meer de volgende verschijnselen gebruikt:

1. uitzetting (vaste stof, vloeistof)
 2. drukverhoging bij nagenoeg constant volume (vloeistof, gas)
 3. dampspanning
 4. weerstandsverandering van een geleider of halfgeleider
 5. thermo-elektrische effecten
 6. stralingsintensiteit en spectrale verdeling
- (Bij de hierna volgende bespreking dient opgemerkt te worden

*) Centraal Technisch Instituut TNO, Apeldoorn

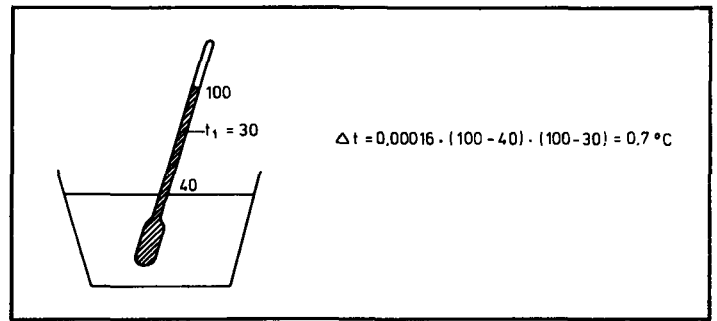
Temperatuurmetingen

dat het cijfermateriaal slechts als indicatie bedoeld is. Nauwkeuriger gegevens over specifieke apparatuur en over speciale uitvoeringen kunnen door de fabrikanten worden verstrekt).

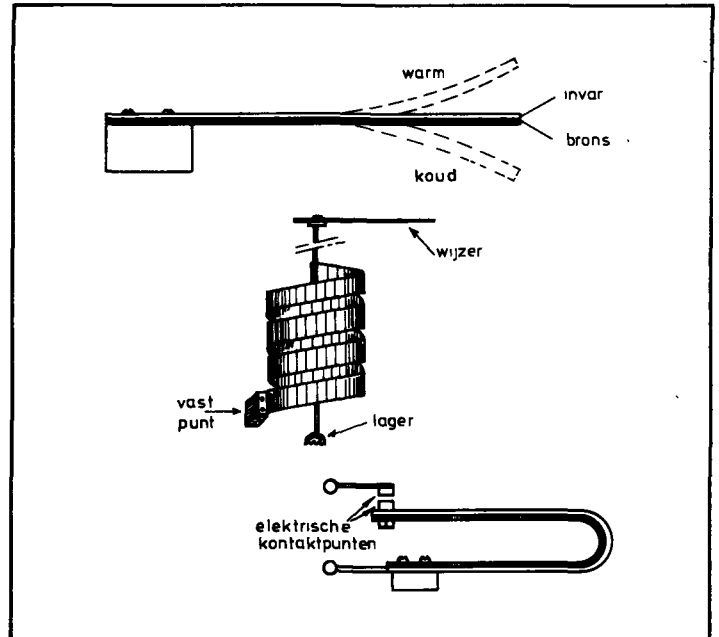
UITZETTING VLOEISTOF

Het meest bekende instrument hierbij is de glazen thermometer. Deze wordt gevormd door een reservoir met vloeistof aangesloten op een luchtledig capillair met ingegraveerde schaalverdeling. Over dit algemeen bekende instrument slechts een aantal opmerkingen.

- Het meetbereik is -30 tot $+450^{\circ}\text{C}$ (kwik), voor lagere waarden alcohol (-80°C), pentaan (-200°C) enzovoort.
- Nauwkeurigheid circa 1 schaaldeel.
- Betrouwbaar, goedkoop, eenvoudig in gebruik, echter kwetsbaar en veelal minder eenvoudig afleesbaar, niet bruikbaar voor automatische regeling en registratie, eventueel wel voor schakelsignaal (contactthermometer).
- Daar de thermometer geijkt is op grond van „totale onderdompeling” is een correctie nodig voor het geval een gedeelte van de „kwikdraad” buiten het bad uitsteekt. Deze correctie is afhankelijk van de lengte van het uitstekende deel N (uitgedrukt in graden), de afgelezen temperatuur t , de temperatuur van het uitstekende deel t_1 , en een factor die afhankelijk is van de gebruikte materialen. Voor een kwik-in-glas thermometer bedraagt deze factor ongeveer 0,00016, zodat $\Delta t = 0,00016 (t - t_1)N^{\circ}\text{C}$. Dat deze correctie in veel gevallen niet verwaarloosbaar is, volgt uit meting in kokend water ($t = 100$) waarbij het deel dat uitsteekt begint bij schaaldeel 40 $^{\circ}\text{C}$ ($N = 100 - 40 = 60$) en zich bevindt op een gemiddelde temperatuur van 30°C ($t_1 = 30$). Onder deze omstandigheden wijst de thermometer derhalve circa $0,7^{\circ}\text{C}$ ($0,00016 \cdot 60 \cdot 70$) te laag aan (afb. 2).



2. Correctie voor de „uitstekende kwikdraad”



3. Bimetaal thermometers

UITZETTING VASTE STOF

Veel gebruikt in deze categorie is de bimetaalthermometer. Twee strippen materiaal met ongelijke uitzettingscoëfficiënt worden op elkaar bevestigd (gelast, gewalst, enzovoort) en aan een uiteinde ingeklemd. Bij verwarming of afkoeling zal een zijde van de zo gevormde strip een grotere verlenging (of verkorting) willen ondergaan dan de andere zijde, waardoor de strip moet buigen (afb. 3). De verplaatsing van het vrije uiteinde is evenredig met het kwadraat van de lengte, zodat vaak spiralen, in het platte vlak of als cylinder uitgevoerd, gebruikt worden om een grote lengte in een kleine ruimte onder te brengen (afb. 3 midden).

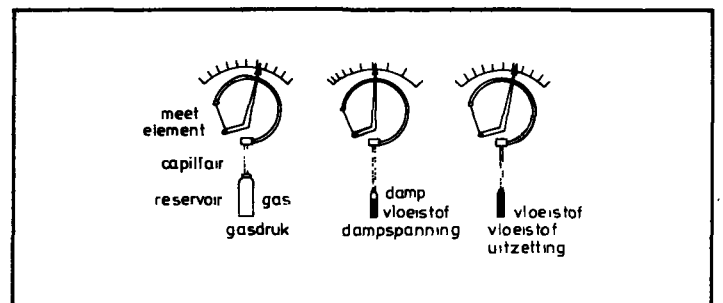
- Het temperatuurgebied dat bestreken wordt is ongeveer -50 tot $+600^{\circ}\text{C}$.
- Nauwkeurigheid tot circa 1% van het meetbereik.
- Goedkoop, eenvoudig, redelijk robuust, goed geschikt voor meting en voor eenvoudige regelingen (met name voor aan/uit-regeling) (afb. 3 onder).
- Registrerende uitvoeringen worden geleverd voor omgevings-temperatuurregistratie, soms gecombineerd met hygrometers.
- De keuze van de constructiematerialen is een compromis tussen de grootte van de uitslag per graad en de hysteresis.

Een andere constructie berustend op de uitzetting van vaste stof bestaat uit een buitenbuis, veelal van roestvrij staal met daarin een staaf uit bijvoorbeeld grafiet of kwarts. De buitenbuis is aan een zijde ingeklemd, de staaf is aan het andere einde van de buis vastgemaakt zodat ter plaatse van de inklemming van de buitenbuis een verplaatsing van het vrije staafeinde kan optreden. Deze kan gemeten worden met behulp van een meetklokje of andere mechanische versterking.

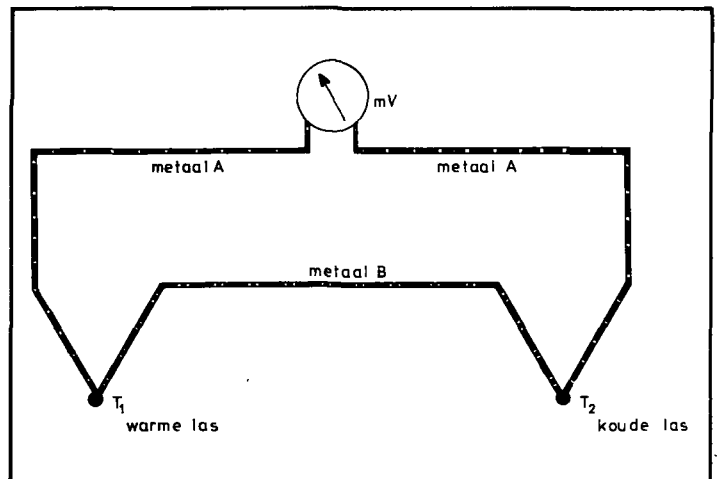
- Meestal thermisch vrij traag, goed reproduceerbaar, beperkt gebruik veelal voor indicatie. Het uitvoeren als aan/uit-regeling wordt eveneens toegepast.

Opmerking:

Op het principe van de uitzetting van een gas onder constante druk wordt industrieel geen gebruik gemaakt onder meer van-



4. Principe drukverhogingsthermometers



5. Principe thermo-element

wege de kwetsbaarheid. Deze zogenaamde gasthermometer wordt wel gebruikt voor zeer nauwkeurige temperatuurmetingen van wetenschappelijke aard. Indien gevuld met een ideaal gas, te benaderen door juiste keuze gas en sterke verdunning, sluit deze thermometer aan op de thermodynamische temperatuurschaal (hier de Avogadro-schaal).

DRUKVERHOOGING VLOEISTOF EN GAS, DAMPSPANNING

De constructie van deze drie typen is nagenoeg gelijk. Een meetreservoir is via een capillaire leiding verbonden met een drukmeter, meestal een Bourdonveer. Dit afgesloten systeem is geheel gevuld met vloeistof of met gas of gedeeltelijk met vloeistof en verder met verzadigde damp van deze vloeistof (afb. 4).

Daar het volume van dit systeem slechts weinig verandert met de temperatuur kan bij het gasge vulde systeem een nagenoeg rechtlijnig verband tussen absolute temperatuur en absolute druk worden verwacht, zodat de schaal praktisch lineair is. Meestal wordt stikstof als vulling gebruikt gezien de lage prijs en het neutrale gedrag. Hoewel de vuldruk circa 50 ato bedraagt, gedraagt stikstof zich in het gebied van circa 100 tot circa 450°C nog nagenoeg als een ideaal gas zodat de nauwkeurigheid voor een groot gedeelte bepaald wordt door die van de drukmeter.

- Meetgebied -100 tot +450°C (stikstof). Meetbereik $\geq 100^\circ\text{C}$. Helium en waterstof tot circa 250°C, daarboven treedt diffusie door de wand op.
- In principe is compensatie voor de omgevingstemperatuur variaties nodig, bij een grote verhouding reservoir volume: capillair volume is er echter slechts een kleine invloed.
- Het instrument is traag door de lage warmtegeleidingscoëfficiënt in het gas.
- Lineaire schaalverdeling.

De fysische wet dat de dampspanning boven het vloeistofoppervlak in een gesloten ruimte uitsluitend een functie is van de temperatuur en de vloeistof als meetmethode benut in de dampspanningsthermometer. De temperatuurfunctie is hier niet rechtlijnig doch neemt met toenemende temperatuur sterk toe. Het gevolg is dat als de meetfout aan het bovineinde van de schaal circa 1°C bedraagt, deze aan de onderzijde kan oplopen tot circa 5°C.

- Temperatuurgebied sterk afhankelijk van de vulvloeistof van circa -40°C (propan) tot +400°C, echter slechts als meerdere meetbereiken.
- Kleine dimensies van het meetreservoir, daardoor grote reactiesnelheid.
- Grote afstand tussen meetpunt en indicatie mogelijk (tot circa 150 m komt voor) doordat geen meetfout ontstaat van de invloed van de omgevingstemperatuur op de capillaire leiding.
- Stevig en weinig kwetsbaar.
- De meetnauwkeurigheid en de versterkingsfactor bij een automatische regeling nemen toe naarmate men dichter bij het eindpunt komt door de niet-lineaire schaal.

Bij de vloeistof-gevulde systemen is het gehele reservoir gevuld met vloeistof. Door een temperatuurverhoging zal de vloeistof willen uitzetten, de stugheid van de Bourdonveer stelt echter een bepaalde relatie tussen drukstijging en volumevermeerdering. De schaalverdeling is ten naaste bij evenredig met de temperatuur doordat de coëfficiënten β en γ in de formule voor de kubieke uitzetting

$$V_t = V_0 \{ 1 + \alpha \Delta t + \beta (\Delta t)^2 + \gamma (\Delta t)^3 \}$$

klein zijn ten opzichte van α en doordat de Bourdonveer in het meetgebied en nagenoeg lineair verband vertoont tussen uitslag en druk.

- Meetbereik circa -40 tot +650°C (voor kwik, voor andere vloeistoffen circa +450°C). Het kookpunt van kwik ligt onder atmosferische condities op 375°C. De hoge vuldruk van circa 170 ato levert echter een grote kookpunt-verhoging waardoor kwik-in-staal tot 650°C gebruikt kan worden.
- Nauwkeurigheid circa 0,5% van het meetbereik.
- De omgevingstemperatuur heeft een invloed via inwerking op

capillair en Bourdonveer, indien het volume van beide laatste niet verwaarloosbaar is ten opzichte van het meetreservoir. Compensatie is in dat geval nodig, bijvoorbeeld door een invar draad in capillair en Bourdonveer op te nemen.

- Robuust gebouwd instrument dat een korte responsietijd heeft indien een klein reservoir wordt gebruikt.

WEERSTANDSTHERMOMETERS

Gebruik wordt hier gemaakt van feit dat de Ohmse weerstand van een materiaal afhankelijk is van de temperatuur.

Voor standaardbepalingen en voor nauwkeurige metingen wordt gebruik gemaakt van platina als meetweerstand. In grote gebieden is dit materiaal bruikbaar terwijl de weerstand zeer regelmatig toeneemt volgens

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

α en β zijn in het temperatuurbereik van -30 tot 1000°C nagenoeg constant en hangen slechts af van de zuiverheid van het materiaal.

Daar bij metalen de weerstand met circa 1/2% per graad toeneemt, ligt een brugmeting voor de hand indien nauwkeurige resultaten gewenst zijn. In de brug van Wheatstone vloeit door de weerstand echter een stroom zodat zelfopwarming niet is uitgesloten. Voor metingen, waarbij grote nauwkeurigheid wordt vereist (metingen bij kamertemperatuur zijn mogelijk op circa 1.10⁻³°C) wordt geeëxtrapolleerd naar stroomloze condities.

Door de wens naar een niet te lage weerstand bij 0°C, een geschikte specifieke weerstand van het gebruikte materiaal, een minimum draaddikte in verband met mechanische sterkte en corrosiebestendigheid treedt een selectie van bruikbare materialen op. Hoofdzakelijk worden de metalen platina en nikkel gebruikt en soms wolfram.

- Meetbereik van circa -200 tot +1000°C (nikkel tot circa 200°C, platina tot circa 750°C en wolfram tot circa 1000°C).
- Klein, thermische responsiesnelheid sterk bepaald door constructie en beschermmaterialen.

Tegenwoordig worden ook veel halfgeleiders, meestal de NTC-weerstanden (NCT = negatieve temperatuurscoëfficiënt) of thermistors gebruikt die een weerstand als functie van de temperatuur vertonen in de gedaante

$$R = A e^{B/T}$$

waarbij de constante B in de orde van grootte van 2000 tot 4000 K ligt.

De fabricage-toleranties liggen in de orde van grootte van circa 20%, zodat individuele calibratie ter bepaling van de constante A noodzakelijk is. Door de grote weerstandsvariatie als functie van de temperatuur is het mogelijk om eventueel direct met spanningsbron en mV-meter te meten zonder brugschakeling.

- Toepassing tot circa 150°C als indicatie en regeling.

THERMO-ELEKTRISCHE EFFECTEN

In 1821 ontdekte Seebeck dat in een gesloten keten, gevormd door twee draden van verschillende metalen een stroom loopt indien de twee verbindingplaatsen (de zogenaamde lassen) op verschillende temperatuur zijn. (Afb. 5). Het blijkt dat de EMK die aldus wordt afgewerkt alleen afhankelijk is van de temperaturen van de lassen en van materiaalkeuze, echter niet van de draaddimensies, enzovoort.

Dit zogenaamde Seebeck-effect is samengesteld uit het Peltier en het Thomson-effect. Het Peltier-effect is een omkeerbaar effect waarbij een stroom die over een las van twee ongelijke materialen vloeit, deze las opwarmt als de stromen de ene richting heen loopt en de las afkoelt bij de tegenovergestelde stroomrichting. Er bestaat een lineair verband tussen stroomsterkte en warmte-ontwikkeling bij het Peltier-effect. Aangezien het verband tussen het temperatuurverschil tussen de warme en de koude las en de opgewekte EMK bij een thermokoppel niet lineair is, treedt nog een tweede effect op, namelijk het Thomson-effect veroorzaakt door de temperatuurgradiënt in het materiaal. De criteria voor de keuze van thermokoppelmaterialen zijn onder

Temperatuurmetingen

meer chemische bestendigheid, mechanische sterkte, reproduceerbaarheid, grote EMK per graad, kostprijs, enzovoort. Hierdoor hebben een beperkt aantal materiaalcombinaties algemeen ingang gevonden, zoals:

- ijzer-constantaan 0 - 600°C goedkoop, grote gevoeligheid
- chromel-alumel 300 - 1000°C vrij grote gevoeligheid
- koper-constantaan - 200 - 400°C hoge gevoeligheid
- platina-platina-rhodium (10%) 0 - 1600°C kleine gevoeligheid, chemisch bestendig
- platina-rhodium (10%) 0 - 1750°C hoge temperatuur
- platina-rhodium (13%) 0 - 1750°C hoge temperatuur

Hogere temperaturen zijn haalbaar met speciale combinaties uit wolfram, wolframlegeringen, tantaal, molybdeen enzovoort.

- Aflezing, registratie en regeling op afstand mogelijk.
- Kleine constructie mogelijk waardoor aan kleine objecten gemeten kan worden.
- Thermisch snelle constructies mogelijk.
- Goede nauwkeurigheid bij hoge temperatuur (0,5 tot 0,75% van de gemeten waarde zonder ijking. Bij individuele ijking van de thermokoppels zijn grotere nauwkeurigheiden bereikbaar).
- Goed bekende referentietemperatuur nodig (koude las).
- Instrument met hoge ingangsimpedantie of compensatie meetmethode. In andere opstellingen moet de combinatie thermokoppel plus meter afzonderlijk worden geijkt.

STRALINGS-PYROMETERS ***)

Ieder voorwerp zendt continue energie uit in de vorm van straling. Uiteraard zal ook uit de omgeving energie naar dit voorwerp toe worden uitgestraald. Hiermee kunnen drie dingen gebeuren:

Een deel van deze straling wordt door het voorwerp geabsorbeerd = a; een deel van de opvallende straling wordt gereflecteerd = r; en een deel van de straling wordt doorgelaten = d. Hieruit volgt: $a + r + d = 1$ (afb. 6).

Een voorwerp dat alle opvallende straling absorbeert ($a = 1$, $r = d = 0$) wordt een zwart voorwerp genoemd (het laatste in analogie met een voorwerp dat alle zichtbare licht absorbeert en daardoor zwart is). Voor een dergelijk zwart voorwerp is de uitgezonden straling verdeelt over de verschillende golflengten, afhankelijk van de temperatuur. Het verband wordt gegeven door de Wet van Planck

$$dE_{\lambda T} = C_1 \frac{\lambda^{-5}}{C_2 / \lambda T - 1} d\lambda$$

waarin:

$dE_{\lambda T}$ = de energie die per eenheid van tijd en oppervlak loodrecht op de straling wordt uitgezonden in het golflengtegebied $d\lambda$.

C_1 en C_2 zijn constanten

λ = golflengte

T = absolute temperatuur

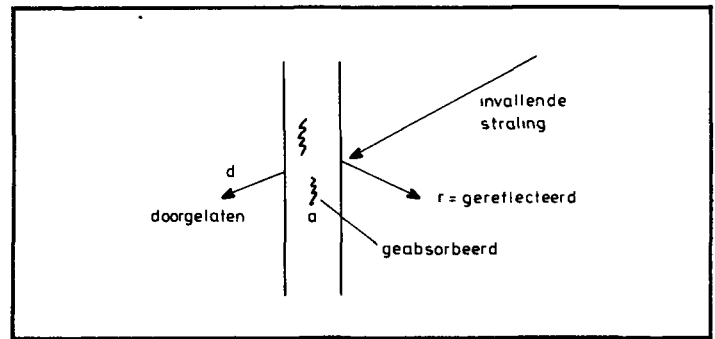
Zoals te zien is in **afb. 7** verandert bij temperatuurverandering zowel de totale hoeveelheid straling als de verdeling over de golflengten. Door integratie van de Wet van Planck wordt de empirisch reeds bekende „Wet van Stefan-Boltzmann“ gevonden, namelijk

$$E_T = \sigma T^4$$

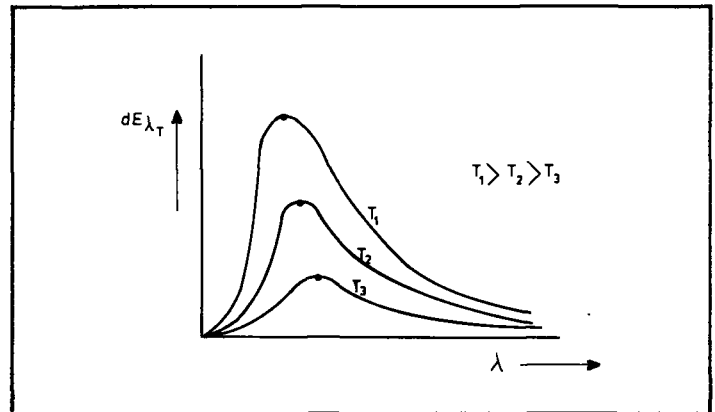
die aangeeft dat de totale hoeveelheid uitgezonden straling recht evenredig is met de vierde macht van de absolute temperatuur. Door differentiatie kan de „Verschuivingswet van Wien“ worden geverifieerd, die luidt

$$\lambda_m T = C_3$$

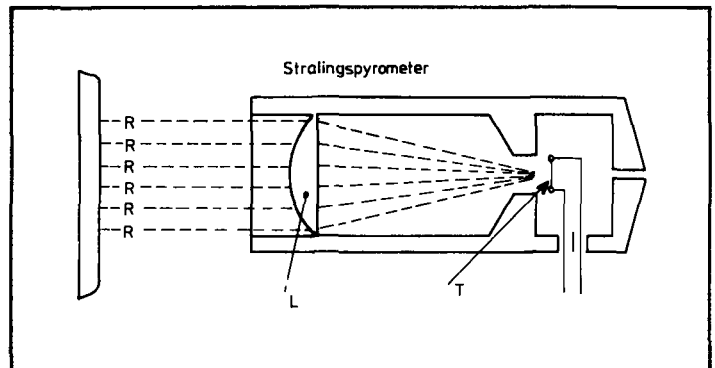
in woorden: het produkt van de golflengte waarbij de maximale



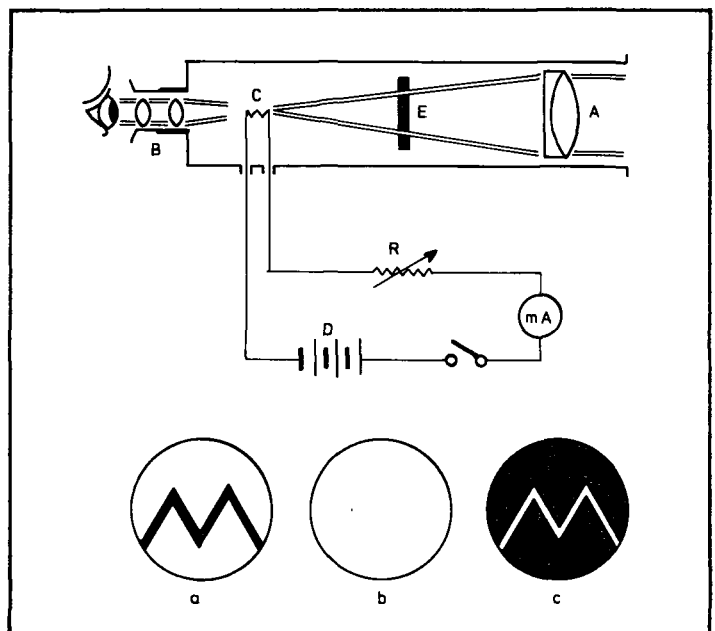
6. Voorwerp en er op vallende straling



7. Verdeling van de stralingsintensiteit (zwarte straler)



8. Principe totaalstralingspyrometer



9. Principe „Verdwijnde gloeidraad“ pyrometer

***) In het hoge temperatuurgebied waar gebruik gemaakt wordt van de straling, wordt meestal over pyrometers in plaats van over thermometers gesproken.

hoeveelheid straling wordt uitgezonden en de absolute temperatuur in constant.

Het begrip zwarte straler dat tot nu toe is gebruikt, sluit echter nauwelijks aan op de praktijk. Door vrijwel alle materialen wordt een gedeelte van de opvallende straling gereflecteerd en soms doorgelaten. Indien de geabsorbeerde fractie echter constant is en niet afhankelijk van golflengte of temperatuur, spreekt men van een grijze (of grauwe) straler. Het is nu op grond van de tweede hoofdwet van de thermodynamica noodzakelijk dat ook de uitgezonden straling niet gelijk is aan de maximale druk doch een deel ϵ hiervan en dat $\epsilon = a$ (emissiecoëfficiënt = absorptiecoëfficiënt). Thermisch gezien zijn de meeste voorwerpen grijs of kunnen in een beperkt temperatuurgebied met behulp van een gemiddelde ϵ -waarde worden behandeld. Enige stoffen echter en vooral gassen hebben absorptiecoëfficiënten die zeer sterk golflengte-afhankelijk zijn; in dat geval spreken we van selectieve stralers.

Voor de grijze stralers kan de Wet van Wien onveranderd gebruikt worden; de wetten van Planck en Stefan-Boltzmann moeten in het rechterlid vermenigvuldigd worden met de emissiecoëfficiënt ϵ . Voor de selectieve straler kan ook de Wet van Planck gebruikt worden met $\epsilon = f(\lambda, T)$, de Wet van Stefan-Boltzmann alleen met een gemiddelde waarde voor ϵ die een rekengrootheid is, terwijl de Wet van Wien niet meer bruikbaar is.

We kunnen de volgende stralingspyrometers onderscheiden, namelijk totaalstralingspyrometers, deelstralingspyrometers en kleurpyrometers.

De totaalstralingspyrometer meet de straling die door het voorwerp wordt uitgezonden in het gehele stralingsspectrum. Een uitvoering is weergegeven in **afb. 8**. In dit instrument wordt de door het voorwerp uitgezonden straling gebundeld door lens L en op het meetpunt gefocuseerd. Dit meetpunt wordt meestal gevormd door een thermozuil T, een serie-schakeling van thermokoppels (soms wordt één thermokoppel, een fotoweerstand of een fotocel gebruikt).

De zwarte straler wordt als ijkbron gebruikt voor deze pyrometer en er is derhalve een temperatuur van de zwarte straler T_{ZW} te vinden waarbij de stralingsintensiteit gelijk is aan die van het voorwerp op de temperatuur T_V .

Met Stefan-Boltzmann volgt nu:

$$\sigma T_{ZW}^4 = \epsilon \sigma_V^4 \quad \text{of} \quad T_V = \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon}} T_{ZW}$$

zodat de aldus bepaalde temperatuur $\sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon}}$ te klein is. Is ϵ bekend dan kan hiervoor uiteraard gecorrigeerd worden, zie **tabel I**.

Bij de deelstralingspyrometer wordt het meetsignaal slechts op een deel van het spectrum betrokken. In principe is de genoemde totaalstralingspyrometer, echter uitgerust met optische filters, hiervoor geschikt.

Ook hier wordt een vergelijking gemaakt met de stralingsintensiteit uitgezonden door de zwarte straler.

Gebruik van de Wet van Planck, met verwaarlozing van de term -1 levert

$$\frac{C_2/\lambda T_V}{C_2/\lambda T_{ZW}} = \epsilon \quad \text{of} \quad \frac{1}{T_V} - \frac{1}{T_{ZW}} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \epsilon$$

ook hier is in principe voor ϵ te corrigeren.

Een voorbeeld van een pyrometer waarbij slechts een gedeelte van het spectrum wordt gemeten is de pyrometer met de verdwijnende gloeidraad, (**afb. 9**). In de pyrometer is een gloeidraad C, waarvan de afbeelding samenvalt met de afbeelding van het voorwerp in de meter, na bundeling door lens A en filter E. De spanning over de gloeidraad en daarmee de temperatuur ervan is in te stellen met een potentiometer (R). Is de temperatuur van het voorwerp hoger dan die van de gloeidraad, dan zal de gloei-

TABEL I Correctiefactor voor de emissiecoëfficiënt
Afgelezen temperatuur $T_{ZW} = 1800$ K; $C_2 = 0,01432$ m. graad.

ϵ	T_V bij totaalstraling	T_V bij deelstraling ($\lambda = 600$ nm)
1	1800	1800
0,9	1848	1814
0,8	1903	1831
0,6	2045	1872

draad zich donker aftekenen (a), in het tegenovergestelde geval licht de gloeidraad op (c). Als bij het instellen de gloeidraadtemperatuur gelijk is aan de deelstralingstemperatuur van het voorwerp verdwijnt de afbeelding ervan in de afbeelding van het voorwerp (b).

Opmerking:

Het zal duidelijk zijn dat de totaalstralingspyrometer in het algemeen niet het gehele spectrum zal bestrijken, daar lenzen of afbeeldingen moeten worden gebruikt, die een gedeelte van het spectrum niet zullen doorlaten. Anderzijds is de besproken deelstralingspyrometer ook slechts een benadering omdat een spectrumdeel wordt gebruikt en niet één golflengte.

Een zuivere deelstralingspyrometer op hetzelfde principe van helderheidsvergelijking is de Natrium-D-lijn omkeermethode bij vlamtemperatuurmetingen, waarbij gebruik gemaakt wordt van één lijn in het spectrum.

Tenslotte maakt de kleurpyrometer een vergelijking tussen de verhouding van de stralingsintensiteit bij twee golflengten (**afb. 10**). De kleurtemperatuur is die temperatuur van de zwarte straler T_{ZW} , waarbij de verhouding van de stralingsintensiteit bij dezelfde golflengten gelijk is aan die van het voorwerp bij T_V . Uitgedrukt in de formule van Planck volgt na uitwerking:

$$\frac{1}{T_{ZW}} - \frac{1}{T_V} = \frac{1}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \ln \frac{\epsilon \lambda_1}{\epsilon \lambda_2}$$

waaruit blijkt dat bij grijze straler, waarvoor dus geldt $\epsilon \neq f(\lambda, T)$, de juiste temperatuur wordt gevonden.

In een uitvoering van de kleurtemperatuurpyrometer wordt door filtering twee golflengte-gebiedjes, meestal een in het rode en een in het groene deel van het spectrum doorgelaten en met elkaar gemengd. Hetzelfde gebeurt met straling uitgezonden door een ingebouwde standaardbron. De groene component van de voorwerpstraling kan door middel van een optische wig verzwakt worden, zodat de mengkleur varieert (als functie van de voorwerpstraling en de stand van de wig). Deze mengkleur kan gelijk gemaakt worden aan de mengkleur van de standaardstraler waarbij de maat van de wig gecalibreerd kan worden in kleurtemperatuur. De straling van voorwerp en standaard valt hier beurte- lings op de beide luchtgevoelige elementen. Omdat bij kleurvergelijking met het oog de intensiteit een belangrijke rol speelt is daarbij veelal een tweede optische wig aanwezig om de stralingsintensiteit van voorwerp en standaard gelijk te maken. De werking van deze wig is enigszins te vergelijken met het principe van de verdwijnende gloeidraad pyrometer. De stand van deze wig, geplaatst tussen voorwerp en filters, is daarom eveneens een maat voor de temperatuur. In **afb. 11** is een elektronische uitvoering van een kleurpyrometer weergegeven.

MEETFOUTEN

De fouten die bij een meting kunnen optreden zijn op verschillende manieren in groepen in te delen; hier wordt de volgende indeling gekozen:

- Instrumentfouten,
- Waarnemings- en verwerkingsfouten
- Instrumentatiefouten
- Dynamische fouten

Instrumentfouten

Hieronder vallen de fouten die met het gebruikte instrument samenhangen zoals: calibratiefouten, hysteresis, aanspreekgevoeligheid, reproduceerbaarheid, veroudering, etcetera. Gedeeltelijk zijn dit zogenaamde **systematische fouten**.

Een voorbeeld hiervan is een calibratiefout waardoor de thermometer gemiddeld 81,3°C aanwijst bij een badtemperatuur van 80°C. Daar deze fouten, hier 1,3 K, constant zijn naar grootte en teken kunnen ze worden opgeheven door het instrument te ijken en de aldus bepaalde correctiewaarden toe te passen.

Het andere deel zijn echter **toevallige fouten**, waarvan bij voorbaat noch de grootte noch het teken vaststaat. Deze fouten ontstaan door hysteresis, beperkte aanspreekgevoeligheid enzovoort. Het bovengenoemde instrument zal daardoor bij 80°C aflezingen opleveren die bijvoorbeeld liggen tussen 80,7 en 81,9°C, namelijk een systematische fout van 1,3 K en een toevallige fout variërend van -0,6 K en +0,6 K (afb. 12). De toevallige fouten zijn niet door correcties weg te werken, de grootte ervan is een kwaliteitskenmerk van het gebruikte instrument. De fabrikant behoort de grootte ervan op te geven in de specificaties; vervuiling en veroudering kunnen deze waarden echter sterk doen toenemen.

Waarnemings- en verwerkingsfouten

Dit type fouten ontstaat buiten het instrument en omvat onder meer afleesfouten, fouten gemaakt bij het noteren van een afgelezen waarde en fouten veroorzaakt door achtergeschakelde apparatuur.

Bij de afleesfouten die praktisch steeds tot de toevallige fouten behoren, kan de oorzaak zowel gelegen zijn bij de constructie van het instrument, (bijvoorbeeld parallax, schaalindeling, wijzerconstructie etcetera) als bij de plaatsing van het instrument (moeilijke toegankelijkheid) en bij menselijke handelingen. Deze fouten zijn te reduceren door zowel bij het ontwerp van het instrument als bij de bouw van de meetopstelling hierop te anticiperen (ergonomie), bijvoorbeeld door over te gaan van analoge op numerieke indicatie.

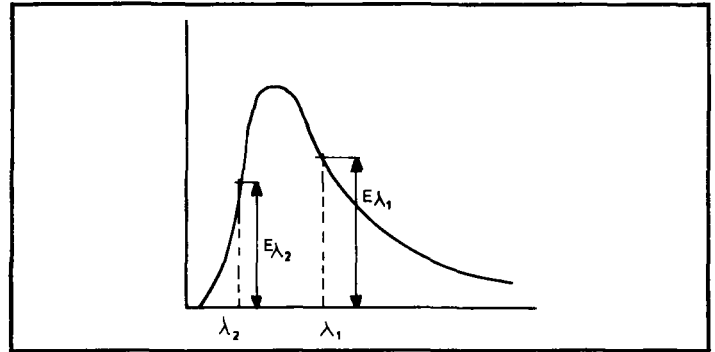
De fouten veroorzaakt door achtergeschakelde apparatuur vallen uiteen in een deel instrumentfouten, en een deel instrumentatiefouten van deze apparatuur.

Instrumentatiefouten

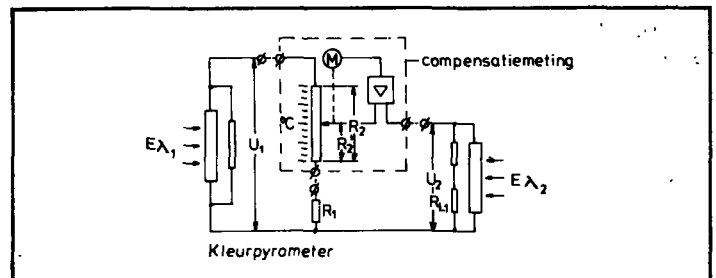
Onder instrumentatiefouten zullen we hier verstaan fouten die ontstaan door het gebruik van op zichzelf goede apparatuur onder verkeerde omstandigheden.

Een overdreven voorbeeld hiervan is het meten van de temperatuur van een vingerhoed vol water met een kwik-in-glas thermometer. De warmtecapaciteit van de thermometer is van dezelfde orde van grootte als die van het water zodat de aangegeven temperatuur bepaald wordt zowel door de aanvangstemperatuur van het water als door die van de thermometer. Minder duidelijk, althans voor de niet-elektrotechnicus, is de fout die gemaakt kan worden bij het aanschakelen van elektrische- of elektronische meetapparatuur door het niet aangepast zijn van impedanties. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is het thermokoppel. De EMK-temperatuur verhouding wordt opgegeven bij meting in een stroomloos circuit, zoals bij gebruik van een compensatiemethode. Bij gebruik van een voltmeter met hoge ingangsimpedantie (bijvoorbeeld 10⁶Ω) kan deze EMK-temperatuur grafiek gewoon gebruikt worden, bij het gebruik van voltmeters met relatief lage weerstand ontstaan echter belangrijke afwijkingen en is ijking van de combinatie thermokoppel, uitwendige bedrading en voltmeter noodzakelijk.

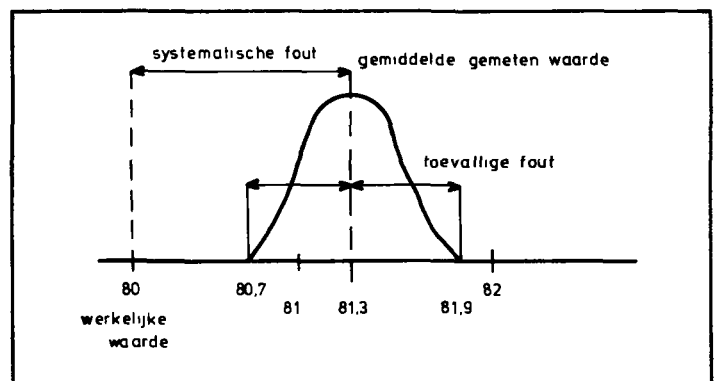
Een illustratief voorbeeld uit het vakgebied van de warmtetechnologie is dat van het meten van temperaturen van gas en stoom in leidingen en dergelijke. Voorbeelden hiervan zijn onder meer de bepaling van de temperatuur van verbrandingsprodukten in een schoorsteen ten behoeve van de berekening van het rendement van een installatie en van de bepaling van de temperatuur van de gassen in de vuurhaard van een ketel ten behoeve van de bepaling van de warmtebelasting van een wand of pijpplaat. Het is juist bij deze problemen; waar grote financiële belangen



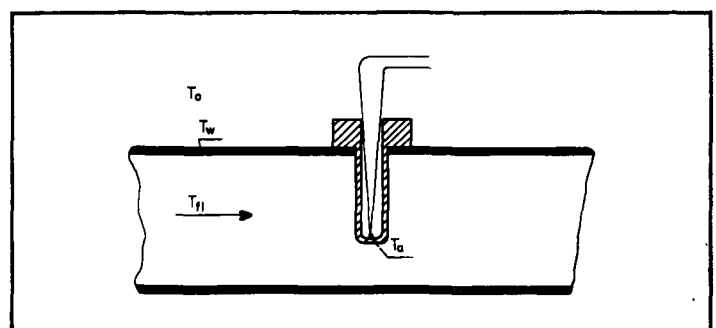
10. Toelichting definitie van kleurtemperatuur



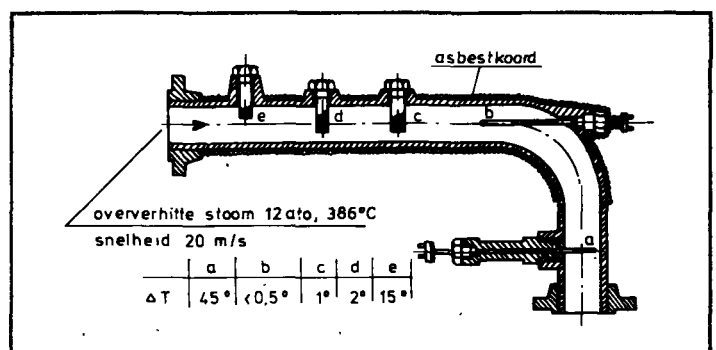
11. Principe van een kleurtemperatuurpyrometer



12. Illustratie van instrumentfouten



13. Bepaling van instrumentatiefouten



14. Grootte van instrumentatiefouten

op het spel kunnen staan zowel voor de fabrikant als voor de afnemer, dat aanzienlijke fouten gemaakt kunnen worden.

We zullen de oorzaken illustreren aan de hand van een sterk vereenvoudigd voorbeeld (afb. 13), waarbij een medium met temperatuur T_{fl} stroomt langs wanden met temperatuur T_w . Deze temperatuur T_w is lager dan T_{fl} door warmte-afgifte van de wand naar een omgeving die op temperatuur T_o is. Een thermokoppel, gemonteerd in een beschermhuls, geeft een temperatuur T_a weer, die overeenkomt met die van de bodem van de beschermhuls. De temperatuur T_a zal zich als evenwichtstemperatuur instellen tussen T_{fl} en T_w zodanig dat de toegevoerde warmtestroom naar het meetpunt gelijk is aan de van het meetpunt naar de wand afgevoerde warmtestroom.

De warmte-toevoer vindt hoofdzakelijk plaats door convectie met als drijvende kracht $(T_{fl} - T_a)$, zodat wordt toegevoerd: $\alpha(T_{fl} - T_a)C_1$, waarin: α = de warmteoverdrachtscoëfficiënt en C_1 is de constante voor de constructieve dimensies.

De warmteafvoer vindt gedeeltelijk plaats door geleiding via de beschermhuls en de koppeldraden met als drijvende kracht $(T_a - T_w)$ zodat wordt afgevoerd door convectie

$$\lambda(T_a - T_w)F_d \cdot C_2 \cdot \frac{1}{L}$$

waarin λ = de warmtegeleidingscoëfficiënt, F_d = het oppervlak van de doorsnede van de huls in geleidingsrichting, C_2 = een constructieconstante en L = de insteeklengte van de beschermhuls. Een ander deel van de warmte zal worden afgevoerd door straling indien het fluidum geheel of gedeeltelijk diathermaan is (doorlatend voor warmtestraling), hetgeen bij gassen in het algemeen het geval is. De drijvende kracht is in dit geval $(T_a^4 - T_w^4)$, zodat wordt afgevoerd door straling:

$$\epsilon \cdot \sigma (T_a^4 - T_w^4) C_3$$

Waarin ϵ = de emissiecoëfficiënt, σ = de stralingsconstante van Stephan-Boltzmann, en C_3 = een constructieconstante. Voor evenwicht geldt nu:

$$\alpha(T_{fl} - T_a)C_1 = \lambda(T_a - T_w) \cdot F_d \cdot C_2 \cdot \frac{1}{L} + \epsilon \cdot \sigma (T_a^4 - T_w^4) C_3$$

In de eerder genoemde gevallen waarbij een niet geïsoleerde stalen schoorsteen en watergekoelde ketelvlakken grenzen aan hete verbrandingsproducten zal de stralingsterm door het vierdegraads karakter een zeer sterke invloed hebben.

In het geval dat we vrij zijn in de keuze van de maatregelen om de miswijzing $(T_{fl} - T_a)$ te verkleinen ligt het voor de hand om:

- de drijvende krachten $T_a - T_w$ en $T_a^4 - T_w^4$ te verkleinen door het toepassen van een isolatie om de pijp waardoor $T_{fl} - T_w$ afneemt en omdat $T_{fl} > T_a > T_w$ ook $T_a - T_w$ afneemt.
- Zorgvuldige keuze van de beschermhuls zodat F_d kleiner is, hierin zijn we begrensd door sterkte-overwegingen; het kiezen van een kleine λ is niet aantrekkelijk in verband met de warmte-toevoer naar de warme las, terwijl de keuze van een lage ϵ , gepolijste huls, etcetera, veelal niet zinvol is doordat vervuiling het effect snel ongedaan kan maken. De insteeklengte kan veelal wel groot gekozen worden, bij meting in pijpen van kleine diameter bijvoorbeeld door niet loodrecht maar schuin op de lengte van de pijp in te steken.
- Tenslotte zal een grote warmteoverdrachtscoëfficiënt eveneens een gunstige invloed op de miswijzing hebben, zodat plaatsing achter een stromingsverstoring of in een bocht een gunstige invloed hebben.

De invloed van de besproken maatregelen op de grootte van de meetfout is te zien in afb. 14. Vooral de grote invloed van de wandisolatie valt op.

Juist bij het eerder genoemde voorbeeld van temperatuurmeting van verbrandingsproducten in een vuurhaard wordt, ter beperking van de keteldimensies, een groot temperatuurverschil tussen gas en wand gewenst, zodat de meetfout groot zal zijn.

Bij metingen in de schoorsteenintrede zal ook dikwijls een aanzienlijk temperatuurverschil tussen gas en wand ontstaan omdat isolatie hier zichzelf niet meer betaald door verhoging van het rendement van de installatie. Hier diende dus een andere oplossing te worden gekozen, die geleid heeft tot de ontwikkeling van de zuigpyrometer (afb. 15).

De temperatuurmeting geschiedt met behulp van een thermokoppel dat is omgeven door één, twee en soms zelfs drie coaxiale stralingsschermen. De hete gassen worden met grote snelheid axiaal langs het thermokoppel geleid, waardoor zowel een grote α -waarde als een kleine temperatuurgradiënt bij de meetplaats (grote L) worden bereikt. Door het aanbrenge van een scherm „ziet“ het koppel niet langer de koude wand doch een scherm dat op lagere temperatuur is dan het gas, doch aanzienlijk warmer dan de wand. Dit afschermeffect kan geoptimaliseerd worden door een goede constructie, namelijk door een schermmateriaal met lage emissiecoëfficiënt en lage warmtegeleiding te kiezen en door de warmteoverdracht naar de schermen groot te maken door de geforceerde gasstroming erlangs te leiden. De snelheid van de gasstroom wordt bereikt door de gassen af te zuigen met behulp van perslucht en een ejecteur.

Dynamische fouten
Dynamische fouten ontstaan doordat een meetsysteem een zekere traagheid bezit in het aanpassen aan veranderende situaties. Is de grootte die gemeten moet worden niet constant dan zal het meetinstrument een foutieve aanwijzing moeten geven.

Dynamische fouten

Het duidelijkst is dit te demonstreren met behulp van een zogenaamde stapvormige verstoring. Brengt men een thermometer vanuit een bad met temperatuur T plotseling in een bad met temperatuur $T + \Delta T$, dan zal er een miswijzing ontstaan van $\Delta T e^{-t/\tau}$, waarbij t de tijd is die verstreken is na het overbrengen en τ de zogenaamde tijdconstante van de meter****). De miswijzing neemt af met de tijd. Als illustratie kan de koortsthermometer dienen, die aan een temperatuursprong van bijvoorbeeld 20 graden wordt blootgesteld. Indien men de temperatuur met een onnauwkeurigheid van 0,1 graad wil weten moet derhalve de tijd zo gekozen worden dat:

$$\Delta T e^{-t/\tau} = 20 e^{-t/\tau} \leq 0,1 \quad \text{of}$$

$$e^{-t/\tau} \leq 0,005 \quad \text{waaruit volgt}$$

$$t/\tau \geq 5,2$$

Stellen wij de tijdconstante van een dergelijke thermometer op circa 15 seconden dan blijkt dat een wachttijd van tenminste circa 1,5 minuut nodig is om de invloed van de traagheid redelijkerwijze te elimineren.

In het geval dat een temperatuur a graden per seconde verandert, blijkt de foutwijzing $a\tau$ graden te bedragen. Bij veel processen waarbij vloeistoftemperaturen worden gemeten zal de waarde van a niet zo groot zijn, bijvoorbeeld $\frac{1}{60}$ (1°C verandering per minuut), zodat een tijdconstante van 15 seconden aanleiding geeft tot 0,25 graad fout. Bij het meten van gastemperaturen zijn veel grotere a -waarden aanwezig en is de tijdconstante veelal aanzienlijk groter door de minder goede warmteoverdracht, zodat de fout niet te verwaarlozen is. Ook bij ijking dient op dit verschijnsel te worden gelet, omdat een kleine waterwaarde van de ijkopstelling aantrekkelijk is in verband met snel werken.

APPENDIX I
Dynamisch gedrag van een meetsysteem
We beschouwen het systeem zoals in afb. 16 weergegeven, waarbij:

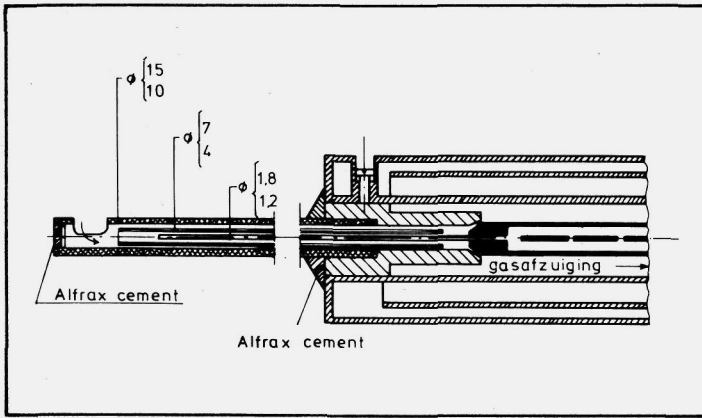
APPENDIX I

Dynamisch gedrag van een meetsysteem

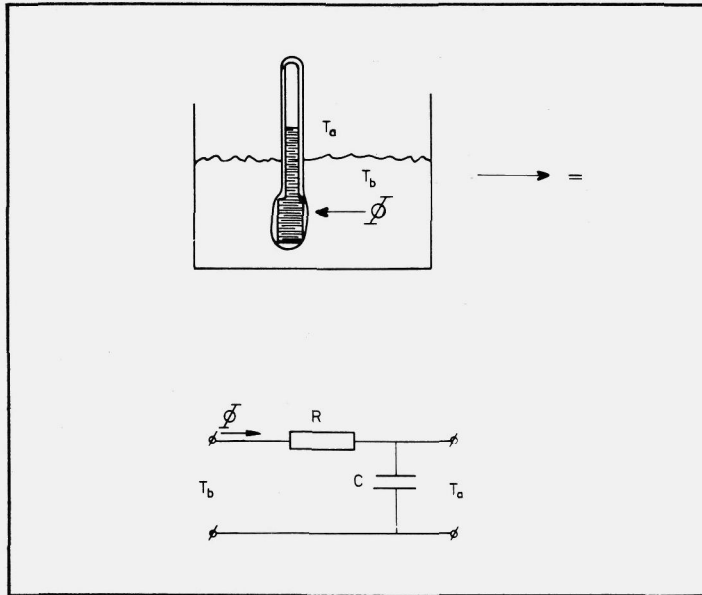
We beschouwen het systeem zoals in afb. 16 weergegeven, waarbij:

T_a = de temperatuur van het meetsysteem	[K]
T_b = de temperatuur van het bad	[K]
R = de warmteovergangswaarde	[K.J ⁻¹ s]
(deze grootte is omgekeerd evenredig met de warmteoverdrachtscoëfficiënt α)	
C = de warmtecapaciteit van het meetsysteem	[J.K ⁻¹]
ϕ = de warmtestroom tussen bad en systeem	[J.s ⁻¹]

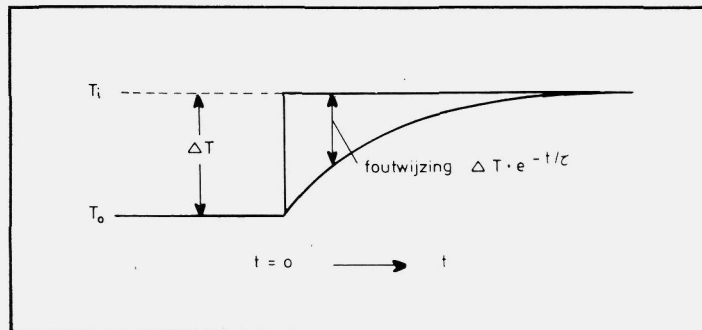
****) Het eenvoudigste geval, namelijk dat van een eerste-ordessysteem is hier aangenomen. Voor de uitwerking hiervan wordt verwezen naar Appendix 1.



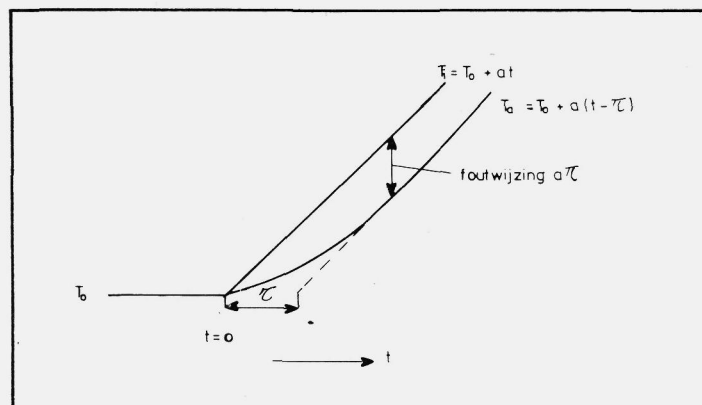
15. Kop van een zuigpyrometer (Int. Flame Research IJmuiden)



16. Definitie van het systeem



17. Responsie op een stapverstooring



18. Responsie op een continu stijgend ingangssignaal

Uit $T_b - T_a = R \cdot \dot{\theta}$ (1) en $\dot{\theta} = C \frac{dT_a}{dt}$ (2) volgt:

$$T_b - T_a = R \cdot C \cdot \frac{dT_a}{dt} = \tau \frac{dT_a}{dt} \quad (3)$$

(We noemen het produkt van R en C, dat de dimensie van een tijd heeft, de tijdconstante τ).

Voor het geval dat wij een stapvormige verstooring aanbieden aan de thermometer, namelijk $T_b = T_0$ voor $t < 0$ en $T_b = T_1$ voor $t \geq 0$ volgt als oplossing voor de differentiaalvergelijking (3)

$$T_1 - T_a = C \cdot e^{-t/\tau}$$

en na invulling van de grenswaarden:

$$T_a = T_1 - (T_1 - T_0) e^{-t/\tau} = T_1 - \Delta T \cdot e^{-t/\tau} \quad (4)$$

Deze responsie is in **afb. 17** weergegeven. De grootte van de fout is $\Delta T \cdot e^{-t/\tau}$ en is derhalve tijdsafhankelijk.

t/τ	fout in % van ΔT
0	100
5	60,7
1	36,8
2	13,5
3	5,0
~	0

Indien de ingangsgrootheid continu met de tijd toeneemt bijvoorbeeld:

$$T_1 = T_0 + a \cdot t \quad (t \geq 0)$$

is de oplossing van de differentiaalvergelijking (3)

$$T_a = T_0 + a(t - \tau) + a\tau e^{-t/\tau} \quad (5)$$

Het laatste deel is een inschakelverschijnsel dat voor toenevende t steeds kleiner wordt. De foutwijzing bedraagt $a\tau$ en is derhalve recht evenredig met de tijdconstante van het meetsysteem en met de snelheid van temperatuurverandering.

De evenwichtsvergelijkingen zijn gebaseerd op de veronderstelling dat voor het beschouwde systeem de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan het binnenoppervlak van de huls zeer groot en de warmtecapaciteit van deze huls zeer klein is. Wordt aan deze voorwaarden niet voldaan dan zal de differentiaalvergelijking (3) van een hogere orde zijn. Men spreekt dan van tweede- en hogere ordedystemen, in tegenstelling tot het eerste-ordedysteem van **afb. 16**.

De effecten van veranderingen in het ingangssignaal zijn op analoge wijze af te leiden, de uitdrukkingen voor de numerieke waarde van de foutwijzingen is bij hogere ordedystemen echter gecompliceerder dan bij eerste-ordedystemen.

Snelheidsmetingen en hoeveelheidsbepalingen in luchtinstallaties

door ing. G. van Winkoop*)

1. INLEIDING

Om na te gaan of een luchttechnische installatie aan haar ontwerp-eisen voldoet zou men in een vrij groot aantal gevallen kunnen volstaan met het meten van ruimte condities (o.a. temperatuur en relatieve vochtigheid).

Immers in veel gevallen is het ontwerp van de installatie er in hoofdzaak op gericht deze van te voren vastgestelde ruimtecondities te realiseren.

Zou men voor die gevallen waar dit gewenst is de hoeveelheid toegevoerde verse lucht nog meten dan zou verder onderzoek overbodig zijn ware het niet dat de ontwerpvoorwaarden als buitentemperatuur en relatieve vochtigheid, voldoende zoninstraling en ook interne belasting veelal niet voorhanden zijn.

Veel gestelde uitgangscondities zijn bijv.:

in de winter: -12°C bij een windsnelheid van 5 m/sec.

in de zomer: 28°C en 50% R.V.

Het ene komt helaas, het andere gelukkig niet al te vaak in ons land voor. Bedenkt men dat veel installaties aan beide eisen moeten voldoen dan zal het duidelijk zijn dat hierop veelal niet kan worden gewacht met de ingebruikname van het gebouw respectievelijk de installatie. Er zullen dus in veel gevallen andere hulpmiddelen gezocht moeten worden om te kunnen voorspellen of de installatie onder extreme buitencondities aan de verwachtingen zal voldoen.

Daar de lucht in airconditioning installaties als primaire drager van warmte en vocht fungeert ligt het voor de hand dat een juist inzicht in de luchthoeveelheden in dezen een belangrijk hulpmiddel vormt. De beoordeling van veel industriële afzuiginstallaties wordt uitsluitend gebaseerd op de hier behandelde metingen.

Het zal duidelijk zijn dat in het voorgaande op een wat wij zouden willen noemen afnamebeproeving werd gedoeld.

Bij het aan deze afnamebeproeving voorafgaande inregelen van een installatie kunnen in wezen dezelfde meetinstrumenten en meetmethoden gebruikt worden. Ten onrechte worden de hierboven bedoelde afnamebeproevingen nogal eens aangeduid als garantiemetingen.

Voor het uitvoeren van echte garantiemetingen zijn echter genormaliseerde en erkende meetmethoden maar vooral ook meetplaatsen noodzakelijk zoals die bijvoorbeeld voor de luchtverplaatsing van ventilatoren zijn vastgelegd in het normblad NEN 1048-II. De in dit normblad beschreven meetplaatsen ten opzichte van de ventilatoren zijn veelal in een installatie niet te realiseren. Rijst bij de afnamebeproeving twijfel over de opbrengst en/of opvoerhoogte van een ventilator dan zal het in bepaalde gevallen nodig zijn deze te beproeven overeenkomstig de in genoemd normblad beschreven of op een andere wijze overeengekomen methode.

In veel bestekken van luchttechnische installatie ontbreekt elke omschrijving van de bij de afnamebeproeving te volgen meetmethode, meetinstrumenten en toelaatbaar geachte afwijkingen. Niet zelden wordt deze zaak afgedaan met zinsneden als: „betaling van de termijn na goedkeuring door de directie” of „ten genoegen van de directie dient te worden aangetoond”

Als men het hiervoor aangehaalde normblad, waarin uitsluitend het beproeven van ventilatoren is beschreven, beziet dan zal het

duidelijk zijn dat in elk bestek op verantwoorde wijze vastleggen van de te volgen meetmethoden zodanig dat van een echte garantiemeting gesproken kan worden een vrijwel onmogelijke zaak is.

Toch zouden wij een lans willen breken om in bestekken de te volgen meetmethoden en vooral de plaats van de meetpunten te beschrijven en op de tekeningen te vermelden, ook al zal dit wetenschappelijk niet altijd volledig verantwoord kunnen zijn.

Men bereikt hiermee in elk geval dat eventuele discussie over dit punt tijdig kan worden gevoerd en niet nadat het meetrapport is uitgebracht. Bovendien, en dit is misschien nog wel belangrijker zal hierdoor de ontwerper genoodzaakt zijn zich af te vragen hoe hij aangetoond wil en kan zien dat hetgeen hij in zijn specificaties eist ook met redelijke zekerheid gerealiseerd wordt.

Door het aangeven van de meetplaatsen op de tekeningen bereikt men bovendien dat men bij de uitvoering de verkregen meetmogelijkheden niet onbewust te niet doet door kleine wijzigingen.

2. MEETINSTRUMENTEN

De werking van voor het meten van luchtsnelheden verkrijgbare meetinstrumenten berust in het algemeen op één van de volgende vier principes.

De pitotbuis

De dynamische druk wordt gemeten en uit het verband tussen deze druk en de luchtsnelheid wordt laatstgenoemde afgeleid.

De Vleugelradanemometer

De luchtstroom brengt een propeller in beweging waardoor een telwerk in beweging wordt gezet.

De Windvaan-anemometer

Met de dynamische druk als aandrijvende kracht wordt een deel van de luchtstroom door een meetinstrument geleid waarin zich een door een spiraalveer tegengehouden draaibare klep bevindt. Tussen klep en huis of via ingebouwde nozzles kan de lucht passeren en aan de andere kant het instrument weer verlaten.

De Thermo-anemometer

De lucht wordt langs een elektrisch verhitte draad geleid. De afkoeling ten gevolge van de luchtstroming en de weerstandsverandering wordt gemeten en direct op een snelheidsschaal afgelezen.

Een korte toelichting op de meters met genoemde meetprincipes met hun specifieke toepassing, meetbereiken en andere eigenschappen lijkt ons gewenst.

a. De Pitot-buis, (afb. 1 en 2)

De pitot-buis in het algemeen gecombineerd met een vloeistofmanometer is naar wij menen de meest bekende en wordt binnen zijn meetbereik ook als de meest nauwkeurige en vooral betrouwbare luchtsnelheidsmeter gezien. De toepassingsmogelijkheden zijn globaal gesteld, beperkt tot metingen in kanalen bij luchtsnelheden groter dan 4 m/sec. Meestal liggen de gemiddelde snelheden in luchtssystemen boven deze 4m/sec, doch vooral in aftakkingen naar roosters komen nogal eens lagere snelheden voor, ook al is de gemiddelde snelheid hoger. Een praktisch bezwaar voor de toepassing voor metingen in installaties is het feit dat veelal een groot aantal metingen op verschillende plaatsen moet worden verricht zodat het apparaat steeds opnieuw horizontaal moet worden opgesteld.

*) Vereniging van Krachtwerktuigen, Amersfoort

Snelheidsmetingen en hoeveelheidsbepalingen in luchtinstallaties

Voor elk meetpunt moet de snelheid worden berekend uit de gemeten dynamische druk volgens de formule:

$$V = \sqrt{\frac{2gPd}{\gamma}}$$

waarin:

V = de luchtsnelheid in m/sec.

γ = het soortelijk gewicht van de lucht in kg/m³

g = de versnelling van de zwaartekracht in m/sec.²

Op zichzelf een eenvoudige berekening doch het grote aantal keren dat deze moet worden uitgevoerd maakt dit toch bezwaarlijk. Om dit bezwaar te ondervangen zijn schuine trekmanometers in de handel gebracht met schaalverdelingen zodanig dat voor een s.g. van 1,2 kg/m³ de luchtsnelheid direct kan worden afgelezen. Meestal wijkt het s.g. van de lucht slechts weinig van deze waarde af zodat veel gemak van dit praktische hulpmiddel wordt ondervonden. De meest opvallende positieve eigenschappen zijn wel de grote nauwkeurigheid en vooral de bedrijfszekerheid. Beschadigingen aan het instrument zullen normaal gesproken niet gemakkelijk optreden en anderszids meestal gemakkelijk waarneembaar zijn behalve wanneer het een klein lekje in een van de slangen betreft. Desondanks wordt het gebruik veelal beperkt tot het verrichten van controlemetingen terwijl de rest van de metingen zo mogelijk wordt uitgevoerd met meer praktisch hanteerbare instrumenten.

Wanneer het om een echte garantiemeting van een ventilator gaat is de pitot-buis vrijwel het enige aangewezen instrument, voor zover een dergelijke meting tenminste in de installatie kan worden uitgevoerd.

b. De vleugelradanemometer, (afb. 3)

De vleugelradanemometer, in de wandeling vaak het molentje genoemd, is in verschillende uitvoeringen verkrijgbaar.

In sommige gevallen wordt een kleine dynamo aangedreven waardoor met behulp van een galvanometer de luchtsnelheid direct afleesbaar wordt. Het meest gebruikt wordt echter het model waarmee gedurende een bepaalde tijd de passerende lucht eenvoudig in meters wordt opgeteld met het ingebouwde telwerk.

Veelal is een uurwerk ingebouwd dat na een minuut automatisch wordt uitgeschakeld.

Het meetbereik is ongeveer 0,5 tot 20 m/sec.

Ook uitvoeringen welke reeds bij snelheden van 0,2 m/sec. redelijke resultaten opleveren zijn verkrijgbaar.

Onder redelijk wordt hier verstaan een verschil van 10 à 15% ten opzichte van een meting met een pitot-buis elders in het systeem. Gedacht is hier aan metingen in de aanzuigopening van bijv. een spuitcabine of zuurkast vergeleken met metingen in het afvoerkanaal. Bij snelheden boven 1 m/sec. ligt de afwijking op ca. 5% ten opzichte van een pitot-buismeting.

In beide gevallen aangenomen dat een goede ijkgrafiek bij het instrument aanwezig is.

Het toepassingsgebied ligt voornamelijk bij metingen aan grotere luchtverhitters, luchtfilters, aanzuig- en inblaasroosters.

Opgemerkt zij dat in aanzuigopeningen doorgaans een te lage en bij uitblaasroosters een te hoge snelheid wordt verkregen.

De afwijkingen kunnen hier bij snelheden in de orde van grootte van 2 tot 5 m/sec. wel oplopen tot ± 25% ten opzichte van goede pitot-buismeting.

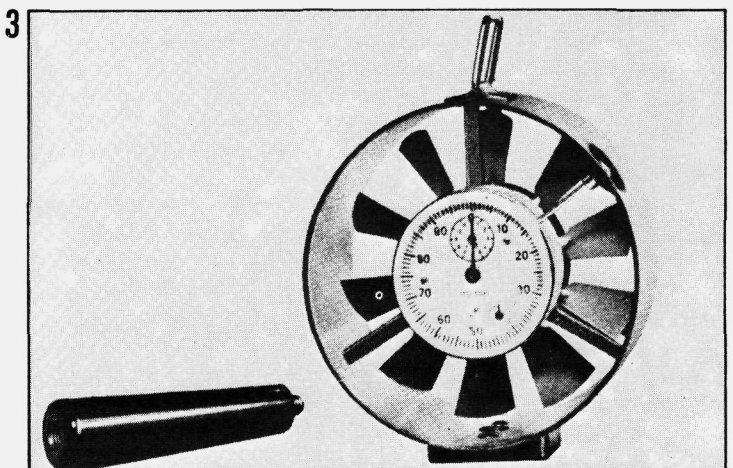
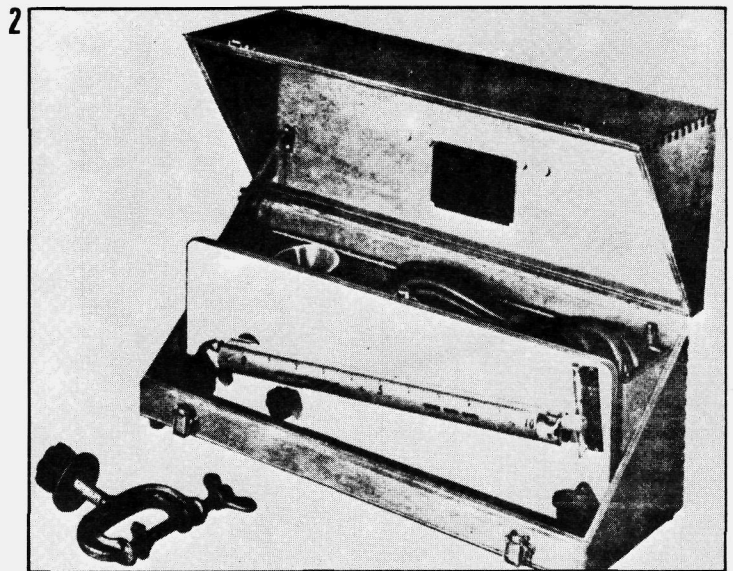
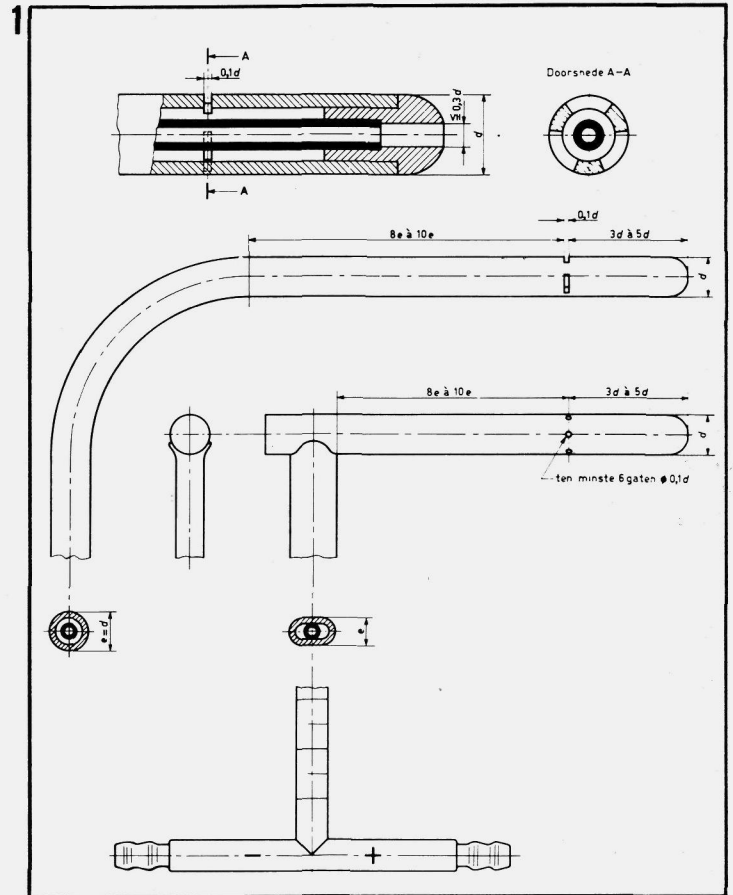
De oorzaak van de te lage aanwijzing bij aanzuigopeningen menen wij te moeten zoeken in het feit dat de luchtsnelheid vooral in de randgebieden te sterk van de axiale stroming afwijkt.

De te hoge aanwijzing bij de uitblaasroosters wordt veroorzaakt door het feit dat de snelheidsverdeling over het rooster vaak zeer onregelmatig is waarbij de snelheid van de vleugel het meest wordt bepaald door de hoogste snelheid.

Eenzelfde afwijking verkrijgt men wanneer men meet aan de uit-treestzijde van een luchtverwarmer indien men het apparaat te dicht tegen de luchtverwarmer houdt.

De invloed van de buisjes van de verwarmer op het snelheidsprofiel is dan nog te groot.

Een afstand van ca. 5 cm is in het algemeen voldoende.



Doorgaans wordt de meting verricht door de meter gedurende de meet periode zo gelijkmatig mogelijk te bewegen in het gehele meetvlak.

Door deze meting enkele malen te herhalen wordt snel een goede indruk verkregen van de luchtverplaatsing.

Voor metingen in kleinere kanalen en aan kleinere roosters is het apparaat door zijn grote afmetingen minder geschikt.

Bij een ideaal stromingsbeeld zal de meeton nauwkeurigheid max. 2% van het meetbreik (20 m/sec.) bedragen.

Bij snelheden onder 1 m/sec. is dan dus nauwelijks meer van een meting sprake.

Met een goede ijkgrafiek zijn echter ook bij lage snelheden nog redelijke resultaten te bereiken.

Het apparaat is uiteraard vrij gevoelig voor mechanische beschadiging.

c. De windvaananemometer, (afb. 4 en 5)

Dit instrument is in verschillende vormen en met vele hulpstukken verkrijgbaar.

Een vrij veel voorkomende vorm is die waarbij meter en sonde zijn samengebouwd.

De sonde heeft de vorm van een pitot-buis waardoor ten onrechte deze naam nogal eens aan het apparaat wordt verbonden.

Er stroomt namelijk in tegenstelling tot de pitot-buis lucht door de sonde (en het instrument).

Het apparaat is verkrijgbaar met 4 schaalbereiken van 0,2 tot 50 m/sec. welke elkaar overlappen.

De gegarandeerde meetafwijking bedraagt max. 2% van de eindwaarde van de betreffende schaal.

Het apparaat is verkrijgbaar voor verschillende insteeklengten oplopend tot 1 m.

Hierdoor is het apparaat vooral geschikt voor snelle metingen in luchtkanalen.

Een tweede vorm is die waarbij sonde en apparaat met elkaar verbonden zijn middels rubber slangen.

Hulpstukken voor verschillende schaalbereiken voor het meten aan aanzuig- en inblaas roosters als in kanalen en zelfs voor het meten van statische drukken.

Geschikt voor snelheden van ca. 0,1 tot 20 m/sec.

Bij snelheden rond 0,2 m/sec. wordt het apparaat gebruikt zonder voeler, het apparaat wordt dan dus zelf in de luchtstroom gehouden. Door de vrij grote afmetingen van het apparaat (ca. 20 x 15 x 8 cm) treden uiteraard verstoringen van het stromingsbeeld op en dus meetafwijkingen.

De apparaten zijn bestemd voor metingen bij een bepaalde luchtdichtheid en wel voor lucht van 20°C en 760 mmHg. Voor afwijkende dichtheden wordt een correctiegrafiek meegeleverd. Door de vele hulpstukken is het apparaat vrij universeel bruikbaar. De meet onnauwkeurigheid zonder ijkgrafiek is ongeveer 2% van de schaalendwaarde.

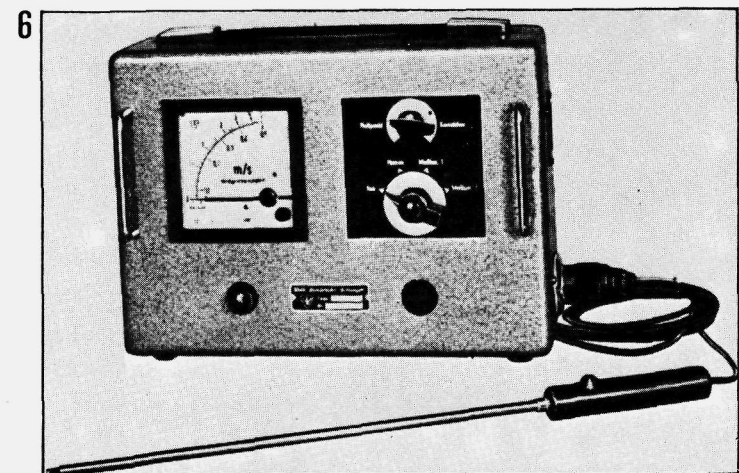
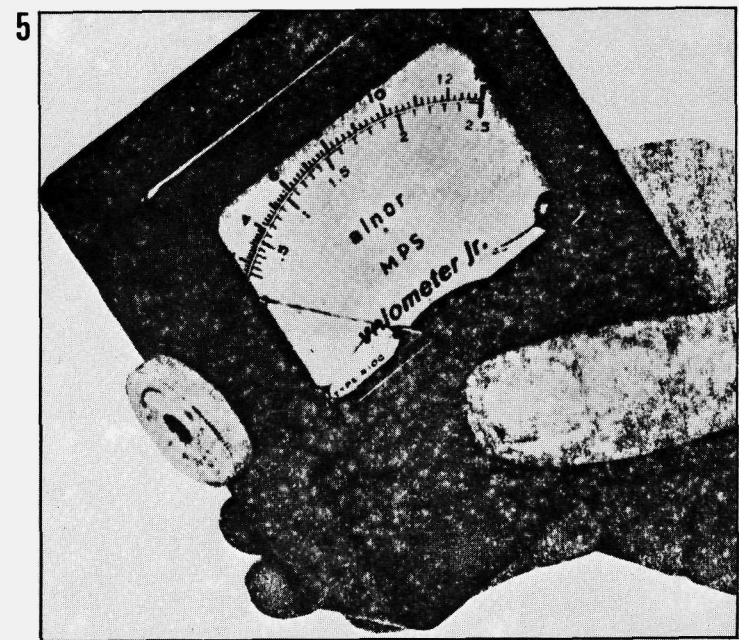
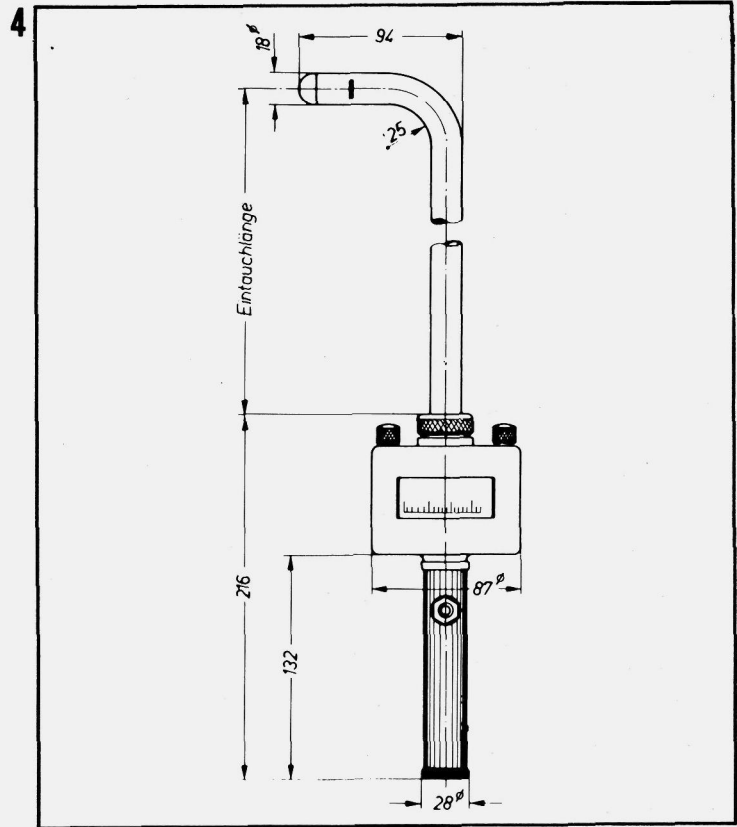
Door het vrij grote aantal schalen is dit nog een vrij grote nauwkeurigheid.

De lagering van de meter is voorzien van een vastzetinrichting waardoor de schokbestendigheid wordt vergroot.

d. De thermo-anemometer, (afb. 6)

Zoals vermeld berusten deze meters op de relatie tussen de luchtsnelheid en de afkoeling van de elektrisch verhitte draad of weerstand.

De verhitte draad wordt in een brug van Wheatstone geschakeld. Met de afkoeling ontstaat een weerstandsverandering waardoor in de brug een stroom gaat lopen welke een maat is voor de luchtsnelheid. Een ingebouwde ampèremeter is voorzien van een snelheidsschaal. Door inschakelen van verschillende weerstanden worden verschillende schaalbereiken verkregen. Door uitschakelen van de verwarming kunnen sommige apparaten ook als thermometer worden gebruikt. Soms wordt ook een hulpstuk meegeleverd waardoor het meten van statische drukken mogelijk is. Afhankelijk van de statische druk in het kanaal stroomt de lucht met een bepaalde snelheid door het hulpstuk. Deze snelheid wordt gemeten en op de schaal wordt direkt de statische druk afgelezen.



Een andere uitvoering is die waarbij de afkoeling met een thermokoppel wordt gemeten. De spanningsverandering wordt gemeten en als luchtsnelheid weergegeven. Bij hogere snelheidsbereiken wordt over de sonde bij deze instrumenten veelal een gaashulsje geschoven. Meetbereik: ongeveer 0 - 15 m/sec. De instrumenten zijn in het algemeen vooral geschikt voor het meten van luchtsnelheden in ruimten doordat de snelheid wordt gemeten vrijwel onafhankelijk van de richting t.o.v. de voeler. Bij metingen in kanalen is dit bezwaarlijk daar ook snelheidscomponenten welke afwijken van de hoofdrichting worden meegemeten.

Voor hogere snelheden (boven 2 à 3 m/sec.) worden deze instrumenten minder geschikt geacht o.a. doordat de schaalverdeling bij hogere snelheden vaak sterk ineengedrongen is, maar ook doordat de fijne gaasjes de sonde nogal stofgevoelig maken. Te verwachten meetfouten tot 10% van de eindwaarde betreffende schaal. De meters zijn doorgaans geijkt op een bepaalde temperatuur. Voor metingen bij afwijkende temperaturen wordt dan een correctiegrafiek meegeleverd.

Ook moet het nulpunt voor elke meting worden ingesteld bij de meettemperatuur. Bij temperatuurveranderingen tijdens de meting moet dit dus opnieuw gebeuren.

3. PLAATS VAN DE METING

Bij de behandeling van de meetinstrumenten zijn terloops reeds enkele meetplaatsen genoemd.

De plaats of plaatsen welke men kiest of liever gedwongen wordt te kiezen, is uiteraard geheel afhankelijk van de installatie en soms ook van de nauwkeurigheid welke men verlangt. De volgende meetplaatsen komen min of meer in aanmerking.

a. Meting in een kanaaldoorsnede

Het Duitse DIN-blad 1946 geeft hierover enige aanwijzingen. Bij rechthoekige kanalen wordt de doorsnede verdeeld in een aantal gelijke velden afhankelijk van de grootte van het kanaal en zo mogelijk van de steekproefgewijs vastgestelde snelheidsverdeling over de doorsnede.

In het hart van elk veld wordt met de gekozen meter de snelheid gemeten en de gemiddelde waarde wordt hieruit berekend. Als minimum aantal wordt door ons doorgaans 9 meetpunten per doorsnede aangehouden bij een snelheidsverhouding tussen hoogste en laagste snelheid van niet meer dan 1,5 en tot een maximum kanaalmaat van 1 m. Wordt een van de kanaalmaten groter dan 1 m dan wordt het aantal meetpunten evenredig vergroot terwijl hetzelfde het geval is bij vergroting van de snelheidsverhouding.

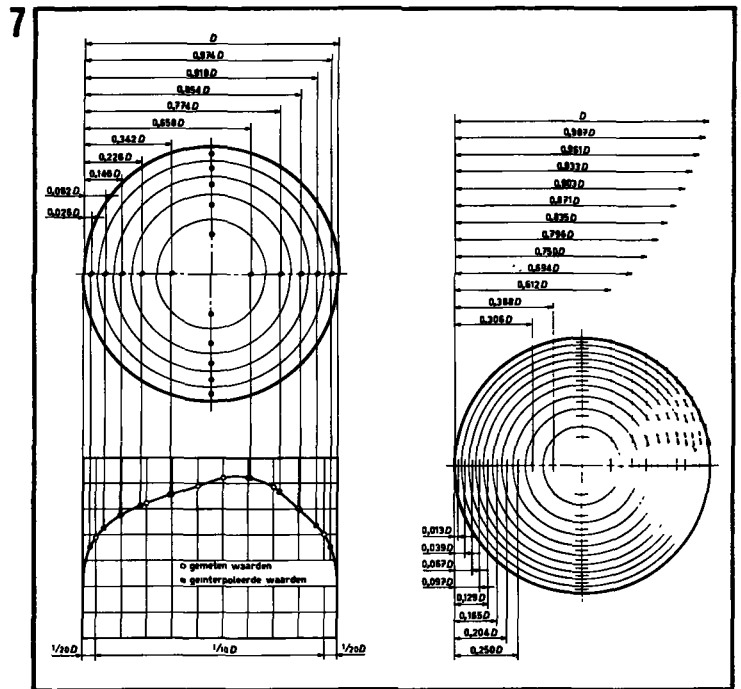
Dit is overigens slechts een globale benadering.

Wanneer het om een groot aantal min of meer gelijkvormige kleine aftakkingen gaat dan wordt niet zelden na enige steekproeven met 4 meetpunten volstaan. Bij cirkelvormige doorsneden wordt doorgaans de doorsnede verdeeld in een aantal ringen met gelijk oppervlak. In de zwaartepuntscirkel van elke ring in twee loodrecht op elkaar staande vlakken de snelheden gemeten. (afb. 7)

Metingen direkt in de omgeving van bochten, plotselinge vormveranderingen en ventilatoren dienen te worden vermeden omdat hier die snelheidscomponenten welke afwijken van de hoofdstromingsrichting een te grote invloed krijgen. Vooral bij metingen met hittedraadmeters geeft dit een te hoge uitkomst.

Na een bocht dient een afstand in acht te worden genomen van minstens vijf maal de diameter (of de gelijkwaardige diameter). Na het meetvlak dient nog een rechte lengte van minstens tweemaal de diameter aanwezig te zijn om een verantwoorde meting uit te kunnen voeren. Afhankelijk van de vereiste nauwkeurigheid zijn de meest geschikte instrumenten de pitobuis met schuine trekmetre en de windvaan-anemometer. Mits aan de hierboven geschetste voorwaarden wordt voldaan kunnen op deze wijze de meest nauwkeurige meetresultaten worden verkregen.

Veelal kan echter in de praktijk niet aan deze voorwaarden worden voldaan.



b. Meting aan filters luchtverhitters en koelers

Bij grote installaties waar men zich in de luchtcentrale kan begeven kunnen op deze plaatsen redelijk goede hoeveelheidsbepalingen worden uitgevoerd mits de snelheidsverdeling redelijk is en mits degene die de meting verricht een zodanige positie kan innemen dat niet een deel van de doorlaat door zijn aanwezigheid wordt afgedekt.

De snelheden liggen in het algemeen in de orde van grootte van 2 à 3 meter/sec.

De meest geschikte instrumenten zijn de vleugelrad anemometer, de windvaan-anemometer en de hittedraadmeter.

Zoals reeds vermeld dient de afstand tussen de anemometer en een verhitter of koeler liefst 5 à 10 cm te bedragen daar anders de meetuitkomst te hoog is. Hetzelfde geldt voor de andere meters echter met als verschil dat hier de uitkomst afhankelijk is van het feit of men meet juist tussen of juist achter de pijpjes. Voor de vlakverdeling geldt hetzelfde als voor metingen in kanalen.

c. Metingen aan aanzuigopeningen en roosters

Veel aanzuigroosters zijn voorzien van regeninslagvrije schoepen waardoor het stromingsprofiel zodanig wordt dat van een hoeveelheidsbepaling moeilijk sprake kan zijn. Ook aan een aanzuigopening met een gaasrooster kan doorgaans geen betrouwbare meting worden uitgevoerd doordat de snelheden niet loodrecht op het meetvlak zijn gericht. Als het minst ongeschikte instrument noemen wij de windvaan-anemometer met hulpstuk voor zuigsnelheidsmetingen. Ook de vleugelradanemometer wordt wel gebruikt. De meetuitkomsten zijn dan zoals reeds genoemd doorgaans te laag.

d. Metingen aan inblaasornamenten

Niet zelden is men aangewezen op het verrichten van metingen aan inblaasornamenten doordat andere meetpunten niet aanwezig of niet bereikbaar zijn.

Het merendeel van de inblaasornamenten is echter ongeschikt voor het verrichten van hoeveelheidsmetingen. De roosters met evenwijdige luchtlederschoepen welke nog het minst ongeschikt zijn worden veelal voorzien van een volumeregeling waardoor de snelheidsverdeling zodanig wordt dat van een behoorlijke meting geen sprake kan zijn.

Wanneer de snelheid in het hoofdkanaal hoog is t.o.v. de gemiddelde uitblaassnelheid en wanneer het rooster dicht bij of in het hoofdkanaal is gemonteerd treden over een deel van het rooster vaak zuigsnelheden op. Hetzelfde is het geval wanneer zich juist

voor het rooster een bocht bevindt. Luchtleidschoepen kunnen hier vaak verbetering brengen. Vaak worden hulpkokers gemaakt met een lengte zodanig dat het snelheidsprofiel enigszins wordt geëgaliseerd. Vooral bij anemostaten blijft de luchtstroom echter aan de wand van de koker kleven. Bij sommige anemostaten wordt door een fabrikant een grafiek of tabel verstrekt waarin het verband tussen een op een punt en op een bepaalde manier gemeten snelheid of druk en de luchtdoorlaat in m³/h is vastgelegd. Op zichzelf kan dit hulpmiddel bruikbaar zijn doch ook hier kan de situatie vlak achter het rooster de uitkomst sterk beïnvloeden.

Veelal kunnen hoeveelheidsmetingen aan roosters slechts worden gezien als hulpmiddel om een globale indicatie te verkrijgen van de luchtverdeling. Verschillen van 25% t.o.v. een meer betrouwbare centrale meting zijn geen uitzondering! De minst ongeschikte meters zijn naar wij menen de windvaananemometer mits voorzien van de juiste hulpstukken en in sommige gevallen de hittedraadanemometer.

4. AFGELEIDE HOEVEELHEIDSBEPALINGEN

In sommige gevallen kan of moet men zijn toevlucht nemen tot afgeleide hoeveelheidsbepalingen. Een dergelijke methode wordt reeds genoemd bij de inblaasroosters waar slechts uit een meting met behulp van een grafiek de luchthoeveelheid werd afgeleid. Bij het bepalen van de primaire luchthoeveelheid aan inductie-units is men veelal aangewezen op het meten van de druk op de nozzles. Uit de door de fabrikant verstrekte relatie tussen druk en luchtdoorlaat kan de laatste worden afgelezen.

Daar de drukken in het algemeen hoger zijn dan 10 mmWK kan de meting op zichzelf nauwkeurig en snel worden uitgevoerd.

De nauwkeurigheid van het totale resultaat is echter geheel afhankelijk van de door de fabrikant verstrekte gegevens en van de fabrikagenauwkeurigheid. Mits men een goede meting van de totale luchthoeveelheid of beter nog per hoofdgroep kan uitvoeren is hiertegen naar wij menen weinig bezwaar. Een andere afgeleide hoeveelheidsbepaling kan worden uitgevoerd door de warmtebalans van bijvoorbeeld een luchtverhitter te bepalen door hoeveelheids- en temperatuurverschil metingen van de waterzijde en uitsluitend temperatuurverschilmetingen aan de luchtzijde. Uit deze gegevens kan de luchthoeveelheid worden bepaald uit: $G_w \cdot \Delta t_w = 0,24 \cdot G_l \cdot \Delta t_l$ waarin G en Δt resp. de hoeveelheden temperatuurverschillen zijn voor water en lucht.

De nauwkeurigheid hangt behalve van de watermeting vooral af van de grootte van de temperatuurverschillen.

Het zal duidelijk zijn dat bij kleinere temperatuurverschillen de onnauwkeurigheid groter wordt. De methode is vrij omslachtig en dus kostbaar.

Mits men over een betrouwbare karakteristiek van de ventilator beschikt en mits er in het werkgebied voldoende verloop is tussen opbrengst en opvoerhoogte kan uit laatstgenoemde eveneens een goede indicatie voor de opbrengst worden verkregen door de opvoerhoogte te meten.

5. KOSTEN

Hieronder eerst enkele uiteraard zeer globale kostenindicatie's van de besproken apparatuur.

<i>Instrument</i>	<i>Prijsindicatie</i>
1. Pitot-buis met eenvoudige schuine trekmeter	f 300,- – f 400,-
2. Idem, met verstelbare meter in koffer	f 1000,- à f 1500,-
3. Vleugelradanemometer	f 750,- à f 1000,-
4. Windvaananemometer met aangebouwde sonde	f 1000,-
5. Idem met diverse hulpstukken in koffer	f 1500,- à f 2000,-
6. Hittedraad meters	f 2000,- à f 3000,-

Uit deze gegevens zal het duidelijk zijn dat de prijs van het instru-

ment hoegenaamd niet van betekenis is voor de kosten van de meting. Immers de kosten van degene die de metingen uitvoert zullen al gauw f 300,- per dag bedragen. Wanneer we hier iets zeggen over de meetkosten dan is dit gebaseerd op totale kosten van afnamebeproevingen waarbij uiteraard ook andere dan alleen luchtmetingen zijn verricht. Uiteraard worden de kosten in hoge mate bepaald behalve door de meetmogelijkheden ook door de resultaten.

De praktijk leert n.l. dat het gemakkelijker is een installatie te accepteren dan af te keuren voor zover daar al sprake van kan zijn. In het laatste geval immers zullen eerst metingen worden herhaald, andere meetmethoden worden gezocht en uitgevoerd met alle hierbij behorende besprekingen en eventueel worden wijzigingen aan de installatie doorgevoerd.

Aan de hand van enkele n.a.c.a.l.c.u.l.a.t.i.e.s menen we globaal te mogen stellen dat voor installaties tussen f 500.000,- en f 2.000.00,- de kosten voor een complete meting 1,5% afnemend tot 0,75% van de installatiekosten zullen bedragen. Het laagste percentage uiteraard voor het hoogste investeringsbedrag en omgekeerd. Wanneer door de installateur een overzichtelijk inregelrapport wordt meegeleverd dan kunnen de kosten veelal tot een fractie van deze percentages worden teruggebracht.

6. SLOT

De te bereiken meetresultaten zijn in de meeste gevallen meer afhankelijk van de meetsituatie dan van het meetapparaat. Het eerder vermelde DIN blad 1946 geeft aan dat onder gunstige omstandigheden met een pitotbuis de meetfout kan worden beperkt tot ± 3%, terwijl bij elk der overige besproken instrumenten gerekend moet worden met meetfouten in de orde van grootte van ± 10%.

Het NEN blad 1048-II voor garantiemetingen aan ventilatoren kent aan metingen met anemometers slechts een oriënterende waarde toe. We zien dan ook ondanks de bezwaren vrijwel bij elke meting van enige omvang de pitot-buis op de achtergrond voor het meten van luchthoeveelheden op enkele centrale punten terwijl de verdere luchtverdeling met andere instrumenten wordt gemeten.

In niet alle gevallen is het echter mogelijk een dergelijke meting uit te voeren en het komt niet zelden voor dat het door de vorm van de installatie überhaupt niet mogelijk is een enigszins verantwoorde meting te verrichten.

Keren we tenslotte even terug naar het in de aanvang gestelde doel dan menen we te mogen stellen dat de mate waarin het gelukt aan de hand van de metingen te voorspellen of de installatie aan haar ontwerpeisen voldoet in niet onbelangrijke mate afhangt van de constructeur en wat misschien nog belangrijker is de mogelijkheden die hem worden gelaten.

Emissiemetingen aan verbrandingsinstallaties

door ing. M. Kiel en ing. W.F.M. Hesseling *)

SAMENVATTING

Emissiemetingen worden uitgevoerd met het doel de luchtverontreiniging bij de bron te kwantificeren. Zowel voor het meten van vlieggas en roet als voor gasvormige verontreinigingen wordt een aantal meetmethoden beschreven. Enige mogelijkheden worden genoemd om te komen tot een uniforme weergave van de meetresultaten zodat deze onderling vergelijkbaar zijn. Tenslotte wordt aandacht geschonken aan de maximaal toelaatbare emissies.

I. INLEIDING

Luchtverontreiniging door verbrandingsinstallaties is reeds jarenlang een onderwerp van studie en onderzoek binnen het Centraal Technisch Instituut TNO. Al enige tientallen jaren geleden werd meegedaan aan het opstellen van „Voorlopige aanbevelingen inzake de beperking van vliegashinder uit fabrieksschoorstenen”. Sindsdien werden regelmatig metingen op dit gebied uitgevoerd en daarbij werd voortdurend getracht de meetapparatuur aan te passen aan de veranderende omstandigheden, hetgeen vooral in de laatste jaren bij de toenemende belangstelling voor de milieuverontreiniging heeft geleid tot een aanzienlijke uitbreiding van het instrumentarium.

In deze voordracht zullen over de thans beschikbare instrumenten enige informatie worden gegeven. Vooraf is het echter goed aan te geven met welk doel deze metingen worden uitgevoerd. Bij het bestrijden van de luchtverontreiniging is het in de eerste plaats gewenst deze te kwantificeren. Dit kan op twee manieren gebeuren, namelijk ten eerste door middel van metingen in de buitenlucht, zogenaamde immissiemetingen en ten tweede door middel van metingen aan de toestellen die de luchtverontreiniging veroorzaken, de zogenaamde emissiemetingen. Immissiemetingen geven een beeld van de omvang en de ernst van de luchtverontreiniging, hetgeen onder andere van belang is voor bestuurlijke aangelegenheden. Een nadeel van deze aanpak is dat het vaak nagenoeg onmogelijk is om uit de op een bepaalde plaats waargenomen concentratie eenduidig af te leiden door welke bron de verontreiniging is veroorzaakt. Bovendien zal bij gebruik van een aantal gelijktijdig werkende en geautomatiseerde meetpunten het aantal te meten verontreinigingen beperkt zijn. Met de emissiemetingen kan de luchtverontreiniging bij de bron worden gekwantificeerd en kan worden getracht aan de hand daarvan maatregelen ter beperking te nemen. Bij dit type metingen hebben we te maken met veel hogere concentraties dan bij metingen in de buitenlucht. Daarbij worden de monstername en de analyse aanzienlijk bemoeilijkt doordat bij verbrandingsinstallaties de kans groot is dat waterdamp- en zuurcondensatie, alsmede verstoppingen in de meetapparatuur plaatsvinden, waardoor meetfouten kunnen ontstaan. Zowel voor de uitvoering van deze metingen als voor het vaak gewenste aansluitende overleg over de te nemen maatregelen is het noodzakelijk dat zij die de metingen uitvoeren bekend zijn met het proces waarvan de emissie wordt onderzocht.

In het hierna volgende zullen enige meetmethoden worden beschouwd die bij emissiemetingen worden toegepast. Vervolgens zullen enige meetresultaten worden gegeven en zal aandacht

worden geschonken aan de voorschriften of normen waarmee de emissie moet worden beoordeeld.

2. MEETMETHODEN

Te onderscheiden zijn meetmethoden voor stof, zoals vlieggas en roet, en voor gasvormige componenten, zoals CO_2 , NO_x en O_2 .

2.1 VLEGAS EN ROET

De uitwerp van vlieggas en roet komt voor bij verbrandingsinstallaties waarin vaste brandstoffen worden gestookt, zoals verbrandingsinstallaties voor huisvuil. De uitwerp van roet kan zich bij alle soorten verbrandingsinstallaties voordoen, maar meestal wordt er van roetuitwerp gesproken bij met vloeibare brandstoffen gestookte installaties.

2.1.1. Monsterafname

Voor de kwantitatieve bepaling van de hoeveelheid vlieggas en roet in rookgassen is het noodzakelijk dat representatieve monsters uit de gasstroom worden afgescheiden. Dit wordt bereikt door het gasmonster isokinetisch af te zuigen, dat wil zeggen, bij een snelheid van de rookgassen in de aanzuigkop die gelijk is aan die van de snelheid van de rookgassen in het rookgaskanaal. Door isokinetisch af te zuigen wordt voorkomen, dat ten gevolge van het verschil in traagheid tussen lichte en zware deeltjes de stofsamenstelling in de aangezogen stroom (de deelstroom) afwijkt van die in de hoofdstroom. Bij een te hoge afzuigsnelheid zullen de zware deeltjes worden afgescheiden van de aangezogen rookgassen door de verandering van de stroomrichting direct voor de aanzuigopening. Bij een kleine afzuigsnelheid gebeurt het omgekeerde. Zie *afb. 1*.

Meestal zal het nodig zijn op een aantal punten van het kanaaloppervlak het stofgehalte van de rookgassen te bepalen, omdat het allerm minst zeker is dat het stof gelijkmatig in de rookgasstroom en dus over de kanaaldoorsnede is verdeeld. Het aantal meetpunten wordt mede bepaald door de toegankelijkheid van het rookkanaal. Bij grote kanalen, met een doorsnede van enige vierkante meters, moet gedacht worden aan circa 16 meetpunten om een betrouwbaar eindresultaat te verkrijgen.

Steeds is het noodzakelijk naast de stofmetingen snelheidsmetingen en dus ook temperatuurmetingen te verrichten. In de eerste plaats in verband met het isokinetisch afzuigen; in de tweede plaats, in verband met de berekening van het gemiddelde stofgehalte. Dit gemiddelde wordt namelijk verkregen door van ieder meetsegment van de kanaaldoorsnede het doorgestroomde rookgasvolume en de daarbij behorende stofhoeveelheid te bepalen. Door de totalen daarvan op elkaar te delen ontstaat het gemiddelde stofgehalte per volume-eenheid. Dit komt erop neer dat de gemeten stofgehalten gemiddeld worden in evenredigheid met de snelheden ter plaatse.

Bij de stofmetingen moet er op gelet worden dat de gassnelheid in de aanzuigbuis voldoende hoog is om stofafzettingen te voorkomen. Indien het aangezogen rookgasvolume daardoor groter is, dan nodig is voor het meetinstrument, zal de deelstroom voor het instrument weer isokinetisch uit de afzuigbuis moeten worden aangezogen. Ook vraagt het vaak veel zorg de temperatuur van de aanzuigbuis zo hoog te houden dat geen condensatie optreedt, waardoor meetfouten zouden kunnen ontstaan. Naast een isolatie kan het soms nodig zijn een hulpverwarming toe te passen. Een elektrische hulpverwarming is niet altijd mogelijk wegens het op de meetplaats beperkt beschikbare elektrische

*) Centraal Technisch Instituut TNO, Apeldoorn

vermogen. In die gevallen kan de aanzuigbuis worden verwarmd met een afzonderlijk aangezogen rookgasstroom, bij gebruikmaking van een dubbelwandige aanzuigbuis. Het streven om aan de hiervoor genoemde eisen te voldoen, leidt snel tot een omvangrijke meetinstallatie.

2.1.2 Meetcyclonen

Bij gebruikmaking van een meetcycloon wordt een deelstroom van de rookgassen door de cycloon gezogen waarin het stof wordt afgescheiden en opgevangen. Na afloop worden de stofmonsters gedroogd en gewogen. Omdat bij de volumemeting de hoeveelheid vochtige rookgassen wordt bepaald, is het noodzakelijk de temperatuur in de cycloon hoger dan het dauwpunt te houden. Aangezien de volumemeting even belangrijk is als de bepaling van het stofgewicht dient hieraan regelmatig aandacht te worden besteed en zijn herijkingen noodzakelijk. (Afb. 2).

Het meten met meetcyclonen heeft het voordeel van een snelle werkwijze. De metingen kunnen plaatsvinden met slechts enige minuten tussentijd en op verschillende punten tegelijk. Voorts is het doorgezogen rookgasvolume ten opzichte van enige andere methoden vrij groot, namelijk circa $15 \text{ nm}^3/\text{h}$. Een nadeel is dat het vangstrendement afhankelijk is van de deeltjesgrootte. Het vangstrendement bedraagt bij de door ons gebruikte cyclonen meer dan 95% voor deeltjes groter dan 7 micron.

Bij stookinstallaties blijkt het stof meestal van een zodanig samenstelling te zijn dat redelijk met meetcyclonen kan worden gemeten.

2.1.3 Filters

In de gevallen waarin het stof veel kleine deeltjes bevat, moet een meetmethode worden gekozen met een hoog vangstrendement voor zeer kleine deeltjes. Dit wordt bereikt met filters. In verband met de te verwachten temperaturen worden daarvoor glasvezelfilters gebruikt. Deze methode heeft het bezwaar tamelijk arbeidsintensief te zijn. Na iedere meting moet het filter uit het huis worden verwijderd en een nieuw filter worden geplaatst. Dit vraagt enige zorgvuldige en voorzichtige handelingen bij nogal hoge materiaaltemperaturen. Daardoor kunnen met filters in een bepaalde tijd minder metingen worden gedaan met cyclonen.

2.1.4 Beta-stofmeter [1]

Behalve de bepaling van het gemiddelde stofgehalte is het ook van belang gegevens te verkrijgen over het verloop van het stofgehalte in een bepaalde tijd. Dit kan worden gemeten met de zogenaamde Beta-stralings-stofmeter. (Afb. 3). Met deze automatisch werkende meter wordt met een bepaald tijdsinterval het stofgehalte gemeten, waarbij het resultaat weergegeven wordt als een stofgewicht per volume-eenheid. Dit instrument kan in principe ook gebruikt worden in plaats van de hiervoor genoemde methoden.

Het meetprincipe berust op de verzwakking van beta-straling door op een filter neergeslagen stof. De verzwakking van de straling wordt gegeven door de vergelijking

$$\ln \left(\frac{n_0}{n} \right) = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \bar{d}$$

waarin

$$d = \text{mg stof per cm}^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{A}} \right)$$

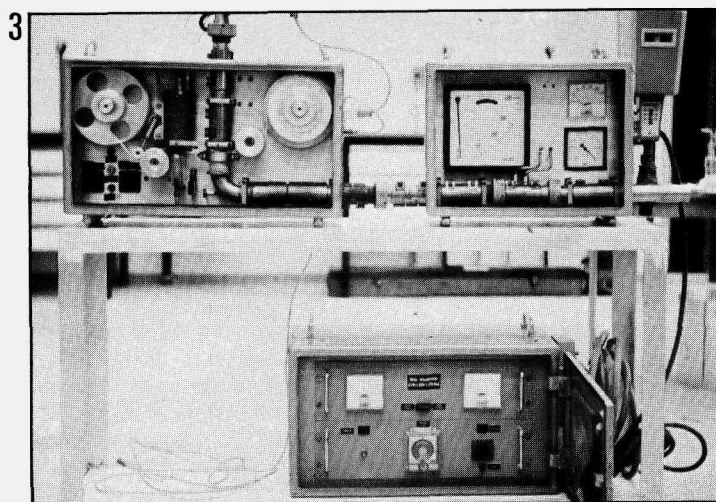
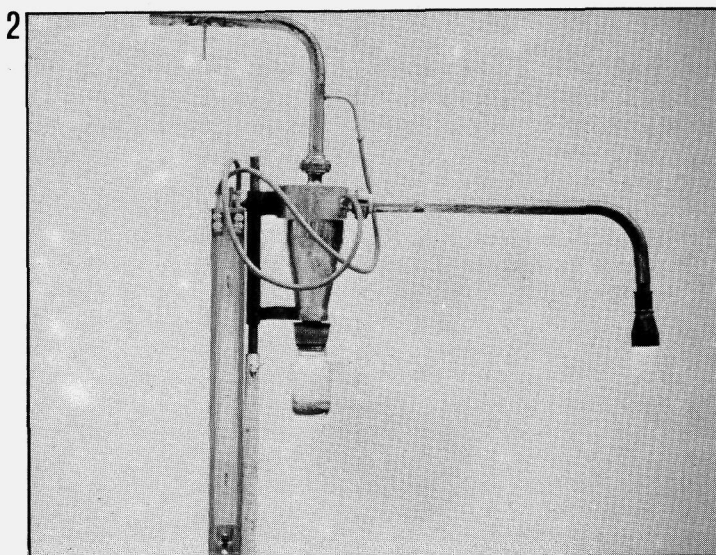
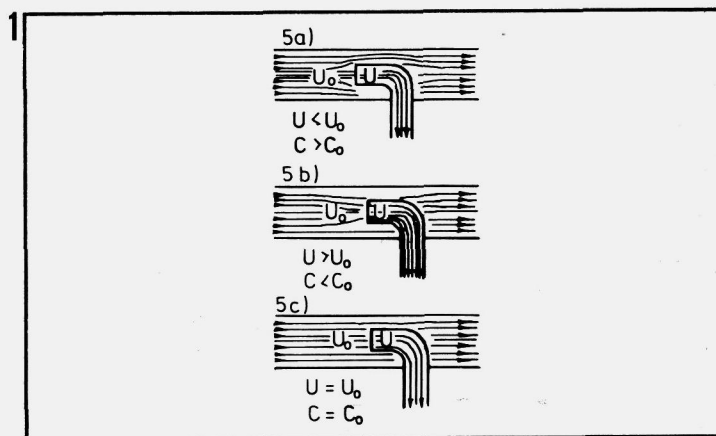
μ = lineaire verzwakkingcoëfficiënt in cm^{-1}

ρ = dichtheid van het doorstraalde materiaal in g/cm^3

n_0 en n zijn de aantallen gemeten impulsen per tijdseenheid zonder en met stofneerslag.

De verhouding $\frac{\mu}{\rho}$ in cm^2/g is de massaverzwakkingcoëfficiënt die nagenoeg onafhankelijk zou zijn van de chemische samenstelling van het stof. De waarde $\ln \left(\frac{n_0}{n} \right)$ wordt door de meter lineair weergegeven.

Het filter materiaal is in de meter aanwezig als een opgerolde strook. Per meetcyclus wordt het daarbij te gebruiken gedeelte van de filterstrook onder de beta-straler gebracht en de stralingsdoorlaatbaarheid in blanco toestand gemeten. Vervolgens wordt dit gedeelte in de aanzuigleiding geklemd en wordt gedurende



een in te stellen tijd rookgas door het filter aangezogen. Het filtergedeelte waarop het stof is neergeslagen wordt weer onder de beta-straler gebracht, waarna de doorlaatbaarheid in stofbeladen toestand wordt gemeten. De meetgegevens worden elektronisch verwerkt en het resultaat wordt weergegeven als een stroomsterkte die wordt geregistreerd. Het verband tussen het stofgewicht en de stroomsterkte wordt vooraf of naderhand via een ijking bepaald.

Het doorgezogen rookgasvolume wordt gemeten met een meetflens en automatisch constant gehouden door een by-pass-regeling. In het instrument is de rookgasweg geheel elektrisch verwarmd.

Een duidelijk voordeel van deze stofmeter is dat in verhouding met de hiervoor genoemde meetmethoden een groter aantal metingen in een bepaalde tijd kan worden gedaan en bovendien is.

het met dit meetinstrument mogelijk om direct het stofgehalte af te lezen. Indien metingen op verschillende plaatsen moeten worden verricht, is het gewicht van de onderdelen wegens het transporteren een nadeel. De opstelling geeft soms moeilijkheden door de omvang van het instrument. Lange aanzuigleidingen zijn nodig in die gevallen waarin de meter door omvang en gewicht niet direct bij het afzuigpunt kan worden geplaatst. Hoewel de meter is geautomatiseerd, is een regelmatig toezicht noodzakelijk, voornamelijk in verband met het filtertransport en de sterkte van het filtermateriaal. Met wat inspanning en zorg zijn de gebruiksmogelijkheden echter zodanig dat de toepassing van dit instrument ruimschoots wordt gemotiveerd door de informatie die daarmee wordt verkregen.

Een voorbeeld van een serie metingen met de beta-stofmeter wordt gegeven in **afb. 4**. Het betreft metingen aan een grote waterpijpketel die met zware olie werd gestookt. Duidelijk blijkt dat een enkelvoudige meting op een bepaald tijdstip een onjuist beeld zou kunnen geven. Voor een verantwoorde beoordeling lijkt daarom een continue waarneming gedurende een bepaalde tijd onmisbaar.

2.1.5 Optische rookdichtheidsmeters

In vaste opstellingen kan gebruik gemaakt worden van optische rookdichtheidsmeters. De werking berust op de lichtsterktevermindering van een lichtstraal door stofdeeltjes in de rookgassen. Deze lichtsterktevermindering wordt behalve door het stofgehalte ook bepaald door de lengte van de lichtstraal en de verdeling van de deeltjesgrootte. Vandaar dat deze instrumenten alleen bruikbaar zijn in een vaste opstelling bij een constante verdeling van de deeltjesgrootte. Om met behulp van een rookdichtheidsmeter de stofconcentratie in mg/nm^3 te weten te komen, moet een ijking plaatsvinden.

De instrumenten zijn geschikt voor controledoelinden, aangezien de werking continu is en het meetresultaat kan worden geregistreerd. Problemen ontstaan soms door condensatie en vervuiling in het optische gedeelte. Daarbij is het wel noodzakelijk dat regelmatig controles en ijkingen worden uitgevoerd.

2.1.6 Meettoestel volgens V.D.I.-Richtlijnen 2066 [2]

Dit toestel kan worden gezien als een combinatie van een cycloon en een filter. De rookgassen stromen tangential in een bus waardoor een eerste stofafscheiding plaatsvindt. In de bus bevindt zich een filterzak waarop het resterende stof wordt afgescheiden. Het rookgasvolume wordt gemeten met een meetflens die zich in de aanzuigpijp in de bus bevindt. Door een elektrisch element wordt het toestel verwarmd.

De bedoeling is dat met dit meettoestel op de afzuigpunten in de doorsnede van het rookkanaal achter elkaar wordt gemeten, dus zonder dat tussentijds de hoeveelheid afgescheiden stof wordt bepaald. Door op ieder afzuigpunt gedurende een zelfde tijd met een zelfde afzuigkop isokinetisch af te zuigen, wordt als eindresultaat direct het gemiddelde stofgehalte verkregen. Op deze wijze kan met dit toestel snel worden gewerkt. (**Afb. 5**).

Voordelig is ook het in verhouding grote rookgasvolume dat per tijdseenheid wordt afgezogen. Indien het gewenst is het stofgehalte op ieder afzuigpunt te kennen, is dit toestel minder geschikt. Veranderingen in de tijd zijn niet waarneembaar. Verder is het moeilijk om aan het begin van de meting condensatie in het toestel te voorkomen.

2.1.7 Bacharach-roetpomp

In deze opsomming mag de Bacharach-roetpomp niet ontbreken, zeker niet als wordt uitgegaan van de gebruiksfrequentie en als wordt gelet op het Handboek Hinderwet, waarin de Bacharach-filtermethode wordt genoemd in verband met het beoordelen van de roetemissie bij oliegestookte installaties. De methode is bij velen bekend. Een afgemeten hoeveelheid rookgas wordt door filtreerpapier gezogen en de daarbij verkregen zwarting van het papier wordt vergeleken met een vergelijkingsschaal waarop een toenemende zwarting is gewaardeerd met cijfers van nul tot en met negen. Een Bacharach-waarde van 3 wordt als nog toelaatbaar aangenomen.

Ongetwijfeld is de Bacharach-methode een bruikbaar hulpmiddel bij het afstellen van branders. Voor het vaststellen van de roetemissie moet deze methode echter ongeschikt worden geacht. Vooral bij met zware olie gestookte ketels is deze methode niet voldoende betrouwbaar. In de literatuur [3] zijn onderzoeken beschreven waarmee dit wordt aangetoond en ook eigen ervaringen in het laboratorium en bij praktijkmetingen stemmen hiermee overeen. Enige jaren geleden voerden wij aan verschillende installaties in de praktijk metingen uit waarbij zowel met de Bacharachroetpomp werd gemeten als met meetcyclonen. De resultaten zijn weergegeven in **afb. 6**.

Nog minder bruikbaar voor het gestelde doel is de zogenaamde Ringelmannschaal die nog zo nu en dan bij het stellen van voorwaarden genoemd wordt. Hierbij wordt de kleur van de rookpluim vergeleken met een kleurschaal. Het resultaat is afhankelijk van de belichting en de dikte van de rookpluim in de kijkrichting.

Als men zich realiseert dat aan meetresultaten vaak belangrijke consequenties zijn verbonden is het duidelijk dat gestreefd moet worden naar zo betrouwbaar mogelijke metingen. De conclusie moet zijn dat de Bacharach-methode en de Ringelmann-methode voor het beoordelen van de roetemissie niet bruikbaar zijn.

2.1.8 De keuze van de meetmethode

Zoals uit voorgaande opsomming is gebleken, bestaan er verschillende meetmethoden om het stofgehalte te kunnen bepalen. Voor het uitvoeren van een stofmeting is zeker niet iedere methode geschikt. De keuze van een meetmethode of combinatie van meetmethoden wordt meestal door de volgende factoren bepaald:

1. Het doel van de meting en de aard van de installatie.
2. De deeltjesgrootte van het te meten stof.
3. De toegankelijkheid van de meetplaats en hanteerbaarheid van het instrument.
4. Het meetbereik van het betreffende instrument.

Een vaak voorkomende combinatie van meetmethoden is die van meetcyclonen met glasvezelfilters. Deze methode wordt bij ons toegepast, indien te verwachten is, dat in het te meten stof zeer kleine stofdeeltjes aanwezig zullen zijn, terwijl om andere redenen toch de voorkeur wordt gegeven aan een meetcycloon. In zo'n geval wordt het glasvezelfilter achter de cycloon geplaatst, waardoor het vangstrendement van de cycloon kan worden bepaald. Naderhand kan men, indien nodig, hiermee de resultaten van de meetcyclonen corrigeren.

2.2 GASVORMIGE COMPONENTEN

2.2.1 Monstername

Evenals bij stofmetingen moet ook hier aan de monstername veel aandacht worden geschonken.

In de eerste plaats moet de temperatuur van de aanzuigbuis doelbewust worden gekozen. In sommige gevallen moet de temperatuur zo hoog zijn dat condensatie in de aanzuigleiding wordt verhinderd. Vele gascomponenten zoals SO_3 , NO_x en HCl zouden door het condensaat worden opgenomen waardoor een meetfout zou worden veroorzaakt. In andere gevallen moeten de rookgassen juist zo snel mogelijk worden gekoeld om reacties die de concentratie van de te meten component zouden veranderen, te vermijden.

In de tweede plaats mag het materiaal van de afzuigleiding niet reageren met de te meten gascomponent. SO_3 bijvoorbeeld moet worden aangezogen in een kwarts-aanzuigbuis en bij NO_x wordt bij voorkeur teflon gebruikt.

In de derde plaats kunnen meetfouten ontstaan door lekkages. Wanneer de afzuigpomp aan het einde van de meetopstelling is geplaatst, ontstaan daarin vaak vrij hoge onderdrukken door de te overwinnen weerstanden van filters, wasflesjes en dergelijke. Om de hiervoor genoemde mogelijke meetfouten te voorkomen, zou de pomp aan het begin van de meetopstelling kunnen worden geplaatst om zodoende de opstelling onder overdruk te houden. Deze oplossing is echter niet altijd mogelijk. Indien rookgasmonsters worden getrokken waarin de absolute

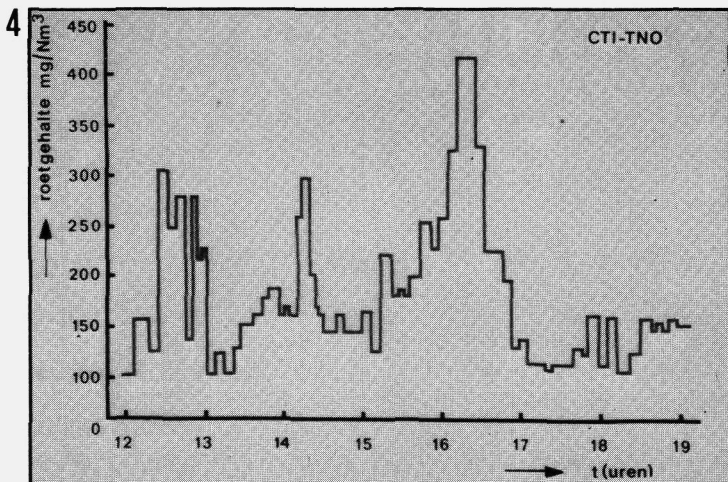
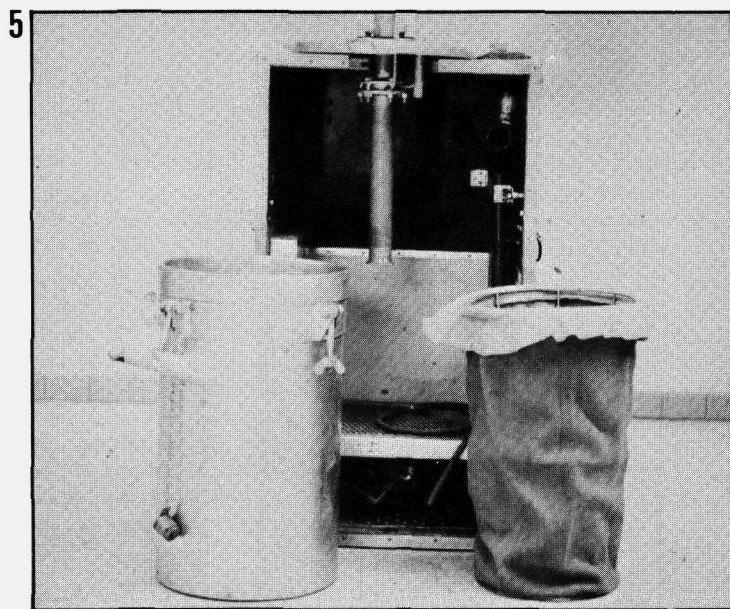


fig.1: variatie in de roetuitwerp van een industriële verbrandingsinstallatie



6

CTI-TNO

Ketel nr.	Type brander	Ketel belasting in %	Temperatuur rookgassen in °C	Perc. CO ₂ rookgas in %	Roetuitwerp		
					mg/nm ³ rookgas	g/kg brandstof	Bacharach waarde
1	roterend	59	231	7,2	144	3,2	2
		100	272	12,5	329	4,2	3
2	roterend	33	186	12,3	39	0,5	1
		44	202	13,0	106	1,3	1
		68	230	14,4	350	3,9	1
		100	232	14,3	560	6,3	1
3	drukverst.	100	197	14,7	28	0,3	1
		60	172	12,6	70	0,9	3
4	"	100	233	13,7	17	0,2	0
		50	140	12,8	120	1,5	2
		100	240	14,1	193	2,2	3
5	"	100	273	12,0	225	3,0	3
6	"	100	240	9,6	204	3,4	5
7	"	100	212	12,9	170	2,1	4
8	"	70	212	12,9	170	2,1	4

Vergelijking werkelijk roetgehalte en Bacharach_waarde

hoeveelheid van een bepaalde gascomponent wordt gemeten, is het noodzakelijk het volume van het rookgasmonster te kennen. Dit kan op verschillende manieren geschieden.

Met een droge gasmeter kan het doorgezogen volume rechtstreeks worden gemeten. Aangezien echter de gassen agressief kunnen zijn, is het mogelijk dat onjuiste aanwijzingen ontstaan. Daarom is een regelmatige controle bij het gebruik van een droge gasmeter nodig.

Met een rotameter kan op ieder moment de doorstromingsnelheid worden waargenomen. Een bezwaar is dat bij kleine rotameters de drijver soms vstraakt door vervuiling of condensatie. Het plaatsen van een filter en/of een droogtoeren voor de rotameter leidt in de praktijk niet altijd tot het gewenste resultaat. Bij toepassing van een rotameter is voorts een regelmatige waarneming noodzakelijk.

De bezwaren van een rotameter worden gedeeltelijk ondervangen door het toepassen van een meetflens of een restrictie. Vervuiling en corrosie zijn ook hier bronnen van meetfouten, zodat een regelmatige controle en ijking onmisbaar zijn.

Steeds is het nodig bij de volumemeting ook de temperatuur en de druk te meten om het gemeten volume te kunnen omrekenen naar normaalomstandigheden.

Bij het gebruik van automatisch werkende analyse-apparatuur is het meestal noodzakelijk de rookgassen vooraf te drogen. Dit kan worden uitgevoerd door de rookgassen te koelen in een koelkast of in een peltierkoeler. Het gebruik van droogmiddelen is in dit geval gevaarlijk, aangezien de te meten gascomponent door het droogmiddel zou kunnen worden geabsorbeerd. Ook bij koeling moet erop gelet worden dat geen meetfout ontstaat doordat de te meten gascomponent in het condensaat oplost.

2.2.2 Zwaveloxyden

Bij oliegestookte installaties kan de emissie van zwaveloxyden het eenvoudigst worden bepaald door het analyseren van de brandstof. De hoeveelheid zwavel die door corrosie in de ketel achterblijft, is te verwaarlozen ten opzichte van de emissie.

In sommige gevallen is het echter gewenst de hoeveelheid zwaveloxyden in de rookgassen te bepalen. Dit is het geval als de brandstofsamenstelling onbekend is, zoals bij vuilverbranding. Een niet-automatische methode daarvoor is door Hissink beschreven in „the Journal of the Institute of Fuel” van september 1963 [4]. Deze methode is nog steeds in gebruik, voornamelijk voor de bepaling van SO₃, waarvoor geen automatisch werkende apparatuur beschikbaar is. (Afb. 7).

Het meetprincipe berust op een gecontroleerde afkoeling van de rookgassen. De temperatuurregeling wordt zo ingesteld dat het zuurdauwpunt juist wordt bereikt ter plaatse van een G4-filter. Het is gebleken dat op deze wijze het SO₃ als H₂SO₄ kwantitatief wordt gevangen. Direct na het afzuigen van de rookgassen wordt het filter uitgespoeld met gedistilleerd water, waarin met behulp van titratie het H₂SO₄-gehalte wordt bepaald.

In hetzelfde toestel wordt aansluitend het SO₂ geabsorbeerd door de rookgassen te leiden door een oplossing van waterstofperoxyde. Ook het SO₂ wordt door middel van titratie als H₂SO₄ bepaald.

Met deze meetmethode zijn goede resultaten bereikt. In gevallen waarin het zwavelgehalte van de brandstof bekend was, kwam de rookgasanalyse daarmee nauwkeurig overeen.

Het meetresultaat wordt beïnvloed door de aanwezigheid van andere zure componenten. Door later in het laboratorium het zwavelgehalte te bepalen in de getitreerde oplossingen is dit bezwaar enigszins te ondervangen. Bij oliegestookte ketels zijn overigens geen andere zuren dan H₂SO₄ te verwachten.

2.2.3 Diverse gascomponenten (onder andere fluor, chloor, metaaloxiden)

Op ongeveer dezelfde wijze als SO₂ kunnen verschillende gascomponenten worden gemeten. Het komt er op neer dat een deelstroom van de rookgassen door een of meer wasflessen wordt geleid die gevuld zijn met een absorptievloeistof. In deze absorptieoplossing wordt later in het laboratorium de totale hoeveelheid van het gezochte element bepaald.

Op deze wijze kunnen bijvoorbeeld chloor en enige metalen worden gemeten. De bepaling van metalen in rookgassen komt overigens nog in aanmerking voor verdere ontwikkeling. Met name moet nog verder aandacht worden besteed aan de monstertechniek. De analyse in het laboratorium geeft weinig moeilijkheden. Met behulp van atomaire absorptie kunnen in de verkregen oplossingen vele metalen betrouwbaar worden gemeten.

2.2.4 Stikstofoxyden

In de laatste jaren zijn de stikstof-oxyden sterk in de belangstelling gekomen. Door het Centraal Technisch Instituut TNO werden aanvankelijk metingen verricht met het zogenaamde Saltzman-reagens. De meting berust op een verkleuring van het reagens door NO_2 , waarna de extinctie wordt gemeten. Een ijking wordt uitgevoerd met natriumnitriet. De moeilijkheid is dat deze methode is ontwikkeld voor metingen in de buitenlucht. Bij het analyseren van rookgassen moeten deze eerst sterk worden verdund alvorens de meting kan worden uitgevoerd. Dit geeft extra complicaties. Bovendien blijkt de betrouwbaarheid twijfelachtig te zijn. Behalve dat namelijk het vangstrendement lager is dan 100%, ondanks het gebruik van een speciale absorptiekolom, ontstaat ook een afwijking doordat de ijking wordt uitgevoerd met NaNO_2 . Een correctie op de meetresultaten van 30% behoort tot de mogelijkheden [5,6]. Met deze methode werden enige metingen uitgevoerd aan een met aardgas gestookte proefvuurhaard. De resultaten daarvan worden on gecorrigeerd weergegeven in **afb. 8**.

Een meer betrouwbare methode is die welke berust op de chemiluminiscentie bij de oxydatie van NO tot NO_2 . Daarmee kunnen de metingen bovendien continu en registrerend worden uitgevoerd.

Een instrument volgens dit principe werd gezamenlijk gebouwd door de T.H.-Delft en het Centraal Technisch Instituut TNO. Aan de reactiekamer wordt een ozon-bevattende zuurstofstroom toegevoerd. De ozon wordt geproduceerd in een zich in het instrument bevindende ozonisator. Deze ozonisator werd speciaal voor dit doel ontwikkeld, aangezien aan de stabiliteit hoge eisen worden gesteld. Verder werd een kleine ozonisator verlangd met een hoge ozonproductie (circa 3% of 60 mg/liter). Aan de reactiekamer wordt tevens de te analyseren gasstroom toegevoerd. De straling die vrijkomt bij de oxydatie van NO tot NO_2 wordt via een filter waargenomen met een photomultiplier. Na verdere elektronisch verwerking wordt het meetresultaat lineair weergegeven in volts, desgewenst met gebruik van een recorder (het meetbereik is 0,01 - 1000 ppm).

NO_2 kan worden gemeten door de rookgasstroom eerst door een converter te leiden, waarin bij een temperatuur van circa 800°C NO_2 wordt omgezet in NO .

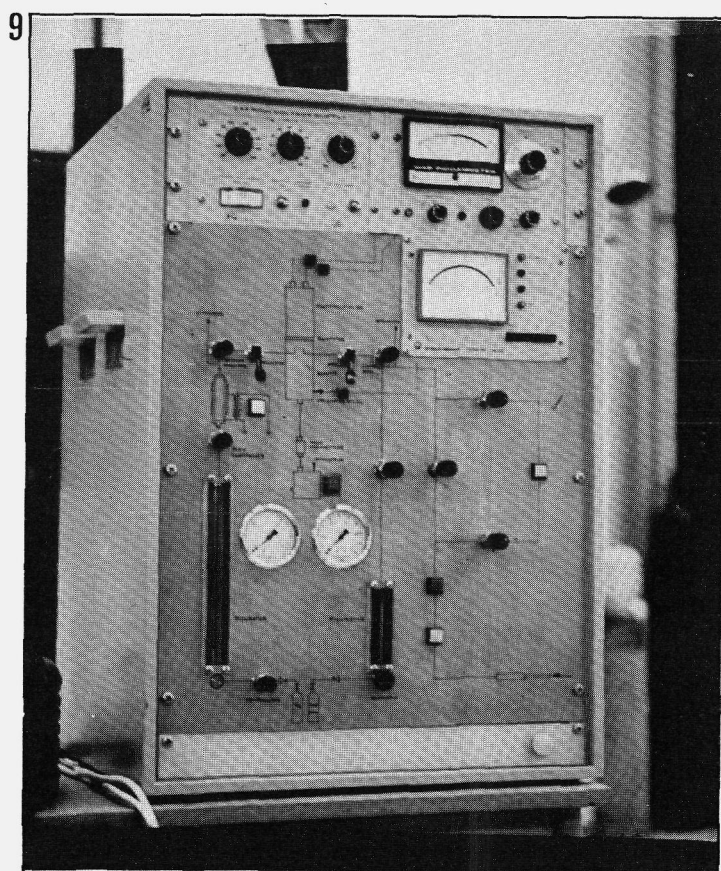
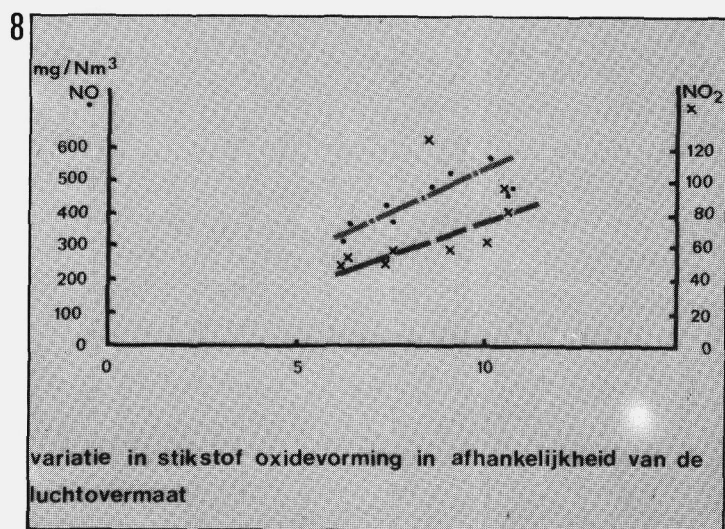
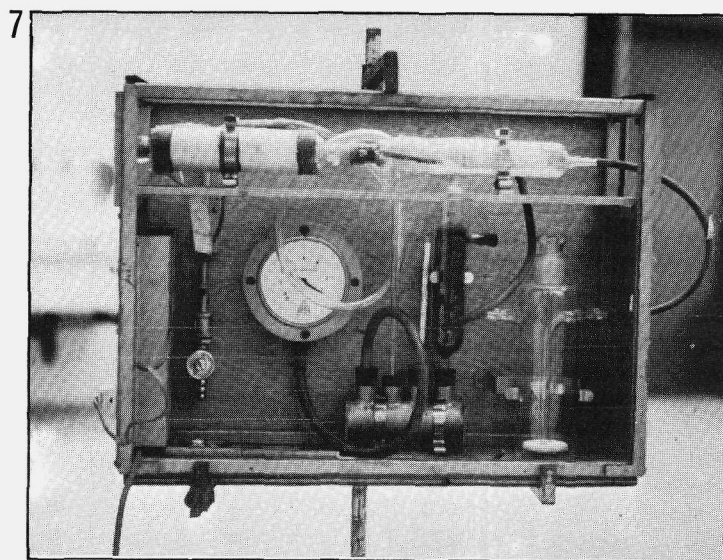
Het instrument wordt geijkt met ijk-gassen. Bij het meten van NO_2 moet er op worden toegezien dat geen condensatie in de aanzuigleiding voor de converter plaatsvindt. Daarom is het gewenst de converter zo dicht mogelijk bij het rookkanaal aan te brengen.

Voordelen van dit instrument zijn de stabiliteit en de eenvoudige bediening. Verder blijkt de meting in hoge mate specifiek te zijn, dus ongevoelig voor andere componenten. (**Afb. 9 en 10**).

2.2.5 Automatische gasanalyse-apparatuur

Voor enige gassen, zoals CO_2 , CO en O_2 is automatische analyseapparatuur beschikbaar. De aard van de installatie bepaalt of het gewenst is om de emissie registrerend te meten of niet. Bij een installatie waarvan het verbrandingsproces niet constant is, zoals bij een vuilverbrandingsinstallatie, waarbij de vuilsamenstelling varieert, valt de keuze bij voorkeur op een registrerend meetinstrument. Door bij een emissiemeting deze apparatuur in te zetten, kan een indruk van de emissie worden verkregen gedurende een bepaalde tijd. Hierdoor is onder andere rechtstreeks de invloed van een bepaald ingrijpen in het proces op de emissie van verontreinigende deeltjes of gassen te bepalen.

Veel wordt momenteel gebruik gemaakt van infraroodapparatuur, waarvan een foto met twee van deze toestellen is afgedrukt in **afb. 11**. In deze instrumenten wordt de stralingsabsorptie door de te meten gascomponent in het infrarode gebied gemeten. Ook SO_2 blijkt thans op deze wijze te kunnen worden gemeten. Voor iedere gascomponent is een afzonderlijk instrument noodzakelijk. Regelmatig moeten de instrumenten met ijk-gassen worden geijkt. Naast het voordeel van de continue registratie vraagt de opstelling weinig toezicht en is de bediening eenvoudig. Wel moet zorg worden besteed aan het verwijderen van waterdamp uit de rookgassen voordat deze door het meetinstru-



ment worden geleid. Gelet moet worden op meetfouten die daarbij kunnen ontstaan indien een gascomponent wordt gemeten die in water oplosbaar is.

Voor zuurstofmetingen worden meestal meetinstrumenten gebruikt, waarvan de werking gebaseerd is op de paramagnetische eigenschappen van zuurstof. Zuurstofmeters worden geijkt met stikstof en buitenlucht.

2.2.6 Waterdamp

Voor de presentatie van de meetresultaten is het noodzakelijk de waterdampconcentratie in de rookgassen te kennen. Indien deze niet berekend kan worden uit de brandstofsamenstelling is het nodig het watergehalte van de rookgassen te meten. Daartoe wordt gebruik gemaakt van een zelfgebouwd toestel, bestaande uit een kleine koelmachine, een condensvat en een meetburet. In het toestel zijn tevens een rotameter, een drukmeter en een thermometer aangebracht ten behoeve van de volumemeting. In dit toestel wordt de waterdamp in de rookgassen gecondenseerd en de hoeveelheid daarvan gemeten in een meetburet. De bediening en opstelling zijn eenvoudig. (Afb. 12).

2.2.7 Absorptiebuisjes

Vele gassen kunnen met absorptiebuisjes worden gemeten. Deze metingen zijn zeer eenvoudig uitvoerbaar en de resultaten zijn onmiddellijk bekend. Deze methode wordt dan ook veel toegepast.

Vooraf wanneer een indruk moet worden verkregen van de gas-samenstelling, of wanneer het gewenst is te weten welke gassen in een bepaalde gasstroom aanwezig zijn, kan van absorptiebuisjes een nuttig gebruik worden gemaakt. De beperking is gelegen in de soms geringe afleesnauwkeurigheid. Verder kunnen verstoringen worden veroorzaakt door andere gascomponenten. Daarom is deze methode minder geschikt als de emissie moet worden beoordeeld, in verband met eventueel te nemen maatregelen en de daaruit voortkomende financiële consequenties.

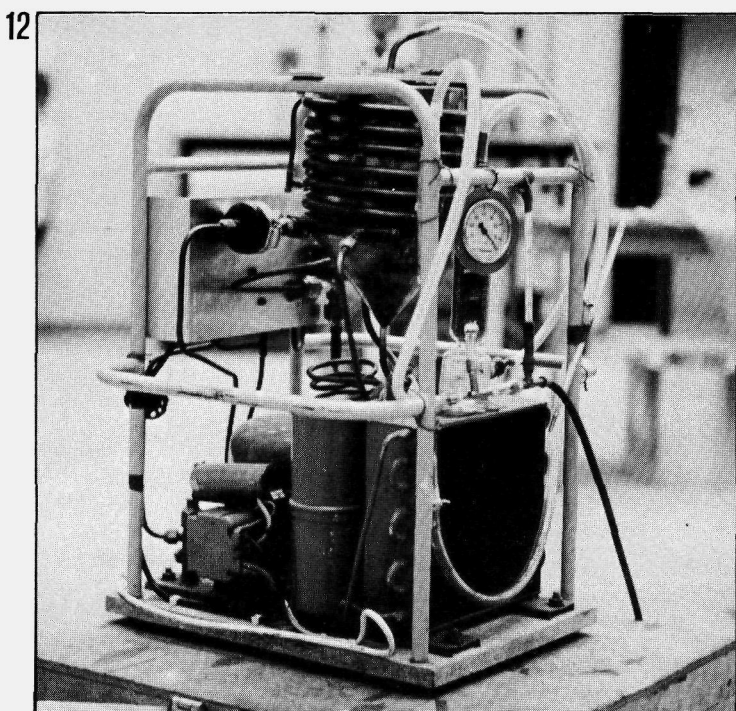
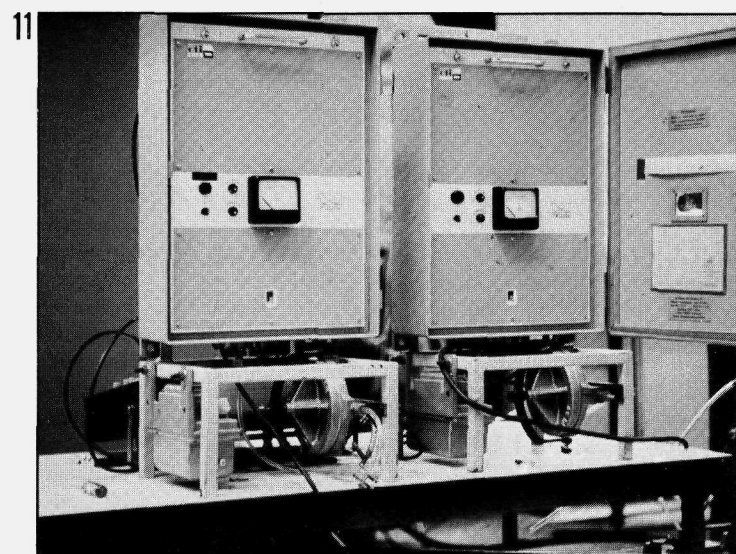
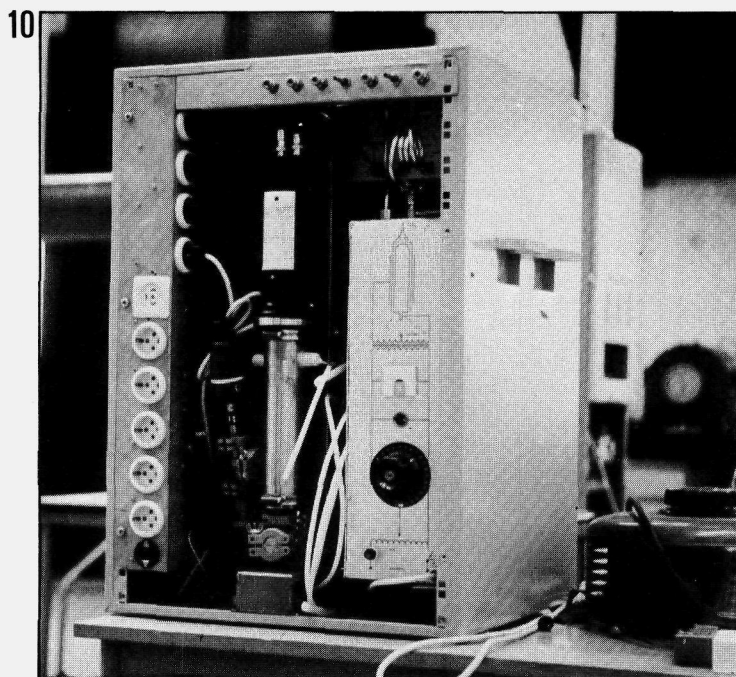
2.2.8 Toekomstige ontwikkelingen

Een gascomponent die bij vuilverbranding de aandacht vraagt, is zoutzuur. Niet alleen in verband met de luchtverontreiniging is het van belang deze component te meten maar ook in verband met de corrosie in vuilverbrandingsinstallaties. Bij een verdergaand onderzoek is het gewenst te beschikken over een registrerend meetinstrument voor HCl, maar een dergelijk instrument is, voor zover ons bekend, nog niet verkrijgbaar. Vandaar dat de ontwikkeling van een registrerende HCl-meter bij het Centraal Technisch Instituut TNO is gestart. Daarbij zal gebruik worden gemaakt van een iongevoelige elektrode. Het is te verwachten dat met hetzelfde instrument ook andere gascomponenten op gelijke wijze kunnen worden gemeten door verwisseling van elektrode. In dit verband wordt momenteel gedacht aan fluor.

Een andere ontwikkeling betreft de verwerking van meetresultaten. Het toepassen van registrerende apparatuur geeft namelijk een zodanig aantal gegevens dat een visuele verwerking aan de hand van de recorderstroken veel tijd vergt. Daardoor blijven bewerkingen achterwege die een waardevolle informatie zouden kunnen geven. Daarom gaan de gedachten momenteel uit naar een zodanige opslag van de meetresultaten dat een verdere bewerking later langs elektronische weg mogelijk is. Het lijkt op deze wijze eenvoudig mogelijk correlaties te bepalen of frequentieverdelingen op te stellen. Het ligt in de bedoeling deze mogelijkheden in de naast toekomst te onderzoeken.

3. PRESENTATIE VAN MEETRESULTATEN

In de presentatie van meetresultaten bestaat momenteel nog weinig eenheid. Een gasconcentratie wordt soms gegeven in procenten, soms in ppm, soms in mg/nm^3 . Vaak is niet aangegeven of een concentratie is opgegeven ten opzichte van droge of van natte rookgassen. Verwarring geeft voorts de luchtvermaat waardoor de rookgassen meer of minder worden verdund en de meetresultaten worden beïnvloed. Zonder de totale uitworp te verminderen, zou men beneden een bepaalde grenswaarde kunnen komen door de luchtvermaat te vergroten.



Om uniformiteit te bereiken in de eenheden waarin de gasconcentraties worden uitgedrukt moet een keus gemaakt worden uit de hiervoor genoemde eenheden.

Een weergave in mg/nm³ heeft het voordeel dat hierin zowel een stof- als een gasconcentratie kan worden uitgedrukt. Ook is hiermee op eenvoudige wijze mogelijk de totale emissie te berekenen als een gewicht per tijdseenheid, hetgeen de gebruikelijke weergave is.

Een presentatie in volumedelen geeft direct een indruk van de samenstelling van de rookgassen; 1 ppm = 1 cm³ per m³ en 1% = 10 liter per m³. Een CO₂-, een CO- en een O₂- gehalte worden nooit anders opgegeven dan in %, aangezien het gebruikelijk is hiermee de verbranding te beoordelen en omdat hiermee de lucht-overmaat langs de kortste weg kan worden berekend.

De voordelen van de beschouwde eenheden overziende, verdient het ons inziens de voorkeur de concentraties van de luchtverontreinigende stoffen uit te drukken in mg per nm³. De gascomponenten CO₂ en O₂ blijven in procenten uitgedrukt. CO zou zowel in mg/nm³ als in % moeten worden gegeven.

Het watergehalte van de rookgassen kan onafhankelijk van de overige gascomponenten variëren, zoals bij vuilverbranding en bij waterinspuiting in de rookgassen. Daarom ligt het voor de hand de concentraties op te geven ten opzichte van droog rookgas. Om dit te kunnen doen, is het noodzakelijk het watergehalte van de rookgassen te kennen. Het is daarom dat in sommige gevallen het water-gehalte van de rookgassen moet worden gemeten.

De invloed van de luchtvermaat wordt gewoonlijk geëlimineerd door de gemeten concentraties weer te geven ten opzichte van rookgassen met een bepaald CO₂-gehalte. Het CO₂-gehalte wordt echter niet alleen bepaald door de luchtvermaat, maar ook door het koolstofgehalte van de brandstof. Deze weergave is dus alleen betrouwbaar als het koolstofgehalte van de brandstof bekend en onveranderlijk is. Beter zou het zijn het zuurstofgehalte van de rookgassen te gebruiken als een maat voor de lucht-overmaat. Bij alle brandstoffen zouden de resultaten van de emissiemetingen weergegeven kunnen worden ten opzichte van rookgassen met bijvoorbeeld 7,5% O₂, overeenkomende met een luchtvermaat van ca. 50%.

Indien de meetresultaten kunnen worden uitgedrukt in mg per kg brandstof doet de luchtvermaat in het geheel niet meer ter zake. Deze weergave geeft rechtstreeks het verband tussen de totale emissie en het brandstofverbruik.

Resumerend zij gesteld dat het aanbeveling verdient alle emissies van luchtverontreinigende stoffen uit te drukken in mg per kg droge brandstof of indien dit niet kan worden berekend in mg per nm³ droog rookgas met 7,5% O₂.

De nauwkeurigheid van de emissiemetingen wordt voornamelijk bepaald door de omstandigheden die bij de metingen worden aangetroffen. De nauwkeurigheid van de meetmethoden op zichzelf is zodanig dat de totale fout daardoor nauwelijks wordt beïnvloed. De fouten die ontstaan, worden veroorzaakt door de concentratieverdeling in het rookkanaal, hetgeen vooral bij stof een rol speelt, variaties van de te meten component in de tijd en variaties van de bedrijfsomstandigheden, zoals bijvoorbeeld de druk, de temperatuur en het watergehalte van de rookgassen. Verder kunnen ook de weersgesteldheid en opstelling van de meetapparatuur de nauwkeurigheid beïnvloeden.

4. MAXIMAAL TOELAATBARE EMISSIE

Wanneer metingen zijn verricht, ligt het voor de hand aansluitend de vraag te stellen welke emissies toelaatbaar worden geacht. Hierover bestaat nog niet in alle gevallen duidelijkheid. Wat betreft de uitworp van stof wordt in het algemeen de grenswaarde van 150 mg/nm³ aangehouden. Ook in het „Handboek Hinderwet“ [7] wordt dit getal genoemd, maar niettemin moeten kolengestookte installaties volgens dit Handboek worden beoordeeld met de Ringelmannschaal en olie-gestookte met de Bacharach-roetpomp. De bezwaren van deze laatste methoden zijn hiervoor uitgezet. Er zijn ons inziens geen redenen aanwezig om stookinstallaties anders te beoordelen dan andere installaties.

Daarbij is het de vraag of voor verschillende brandstoffen verschillende grenswaarden moeten gelden. Gedacht zou kunnen worden aan een voor alle stookinstallaties geldende grenswaarde van 150 mg/nm³ droog rookgas bij 7,5% zuurstof. Bij olie-gestookte installaties komt dit overeen met circa 2,3 g per kg brandstof. Volgens de eerder gegeven onderzoekresultaten moet dit redelijk haalbaar worden geacht.

De emissie van gasvormige verontreinigingen is voor zover ons bekend nog niet aan uniforme grenswaarden gebonden. De moeilijkheid is dat bij het stellen van grenswaarden het ook mogelijk moet zijn maatregelen te nemen om aan die grenswaarden te voldoen. De concentraties van sommige schadelijke gascomponenten kunnen worden verminderd door eisen te stellen aan de brandstofsamenstelling. Dit gebeurt soms reeds ten aanzien van het zwavelgehalte van stookolie.

Ook bij afvalverbranding is een dergelijke procedure denkbaar. Betreft het gascomponenten die door verbranding onschadelijk kunnen worden gemaakt, dan zal het vaak mogelijk zijn maatregelen ter beperking aan te geven. De vorming van stikstofoxyden zou kunnen worden tegengegaan door het aanbrengen van wijzigingen in het verbrandingsproces. Het onderzoek op dit gebied is gaande, maar de situatie is nog niet zo dat het eenvoudig is in voorkomende gevallen de juiste maatregelen te treffen.

Er blijft een aantal gevallen over waarin de gasvormige emissie slechts beperkt kan worden door rookgasreiniging. De hiervoor ontwikkelde processen vinden echter nog weinig toepassing. Bovendien bestaat hierbij de kans dat de luchtverontreiniging wordt omgezet in een bodem- of waterverontreiniging.

De conclusie is dat de beperking van schadelijke gasvormige emissie thans begrensd wordt door de technische stand van zaken. Bij het vaststellen van eisen zal daarmee rekening moeten worden gehouden.

Het is trouwens goed in het oog te houden dat de door een bepaalde installatie veroorzaakte hinder bepaald wordt door de totale emissie. De concentratie van een emissiecomponent in de rookgassen geeft alleen de gelegenheid eisen te stellen met het oog op de technische mogelijkheden. Dit zou ertoe kunnen leiden dat aan een grote installatie hogere eisen worden gesteld dan aan een kleine installatie.

5. SLOTBESCHOUWING

In het voorgaande zijn enige beschouwingen gegeven over de mogelijkheden en de problemen die zich voordoen bij emissiemetingen aan verbrandingsinstallaties. De beschrijving van de meetmethoden werd voor een groot deel bepaald door de thans bij het Centraal Technisch Instituut TNO aanwezige meetapparatuur. Deze opzet houdt een zekere beperking in en op volledigheid kan deze beschrijving dan ook geen aanspraak maken.

Getracht werd in het kader van het behandelde onderwerp enige informatie te geven in de hoop daarmee een bijdrage te leveren aan de behandeling van luchtverontreinigingsproblemen.

6. LITERATUUR

- [1] H. Dresia, F. Spohr „Erfahrungen mit dem radiometrischen Staubmessgerät ‚Beta-Staubmeter‘“ Staub – juni 1971, p. 243-249.
- [2] „Leistungsmessungen an Entstaubern“ VDI-Richtlinien 2066.
- [3] O. Olson „Kritik der Rusziffermessung“ öl- und Gasfeuerung, Okt. 1965, p. 1113-1116.
- [4] M. Hissink „An Instrument for Determining Sulphur oxydes in flue Gases“ Journal Institute of Fuel, sept. 1963 p. 372-376.
- [5] B.E. Saltzmann „Modified nitrogen dioxide reagent for recording air-analysers“ Anal. Chem., Jan. 1960, p. 135-136.
- [6] M. Buck, H. Stratmann „Die Messung von Stickstoffmonoxid neben Stickstoffdioxid in der Atmosphäre“ Staub. Juni 1967, p. 265-268.
- [7] „Handboek Hinderwet“ N. Samson N.V.

Behaaglijkheidsmetingen

door ing. H. Ph. L. den Ouden

INLEIDING

Hoewel het onderwerp „behaaglijkheidsmetingen“ op het eerste gezicht goed past in het thema van deze 35e Vakantieleergang valt bij nadere beschouwing dit onderwerp toch wat uit de toon. De reeds behandelde onderwerpen: temperatuurmetingen, snelheidsmetingen en hoeveelheidsbepalingen in luchtinstallaties, betreffen steeds de objectieve bepaling van fysische grootheden. Het begrip „behaaglijkheid“ omvat echter een duidelijk subjectief element.

HET BEGRIIP BEHAAGLIJKHEID

In het algemeen is een juiste definitie van het begrip behaaglijkheid nauwelijks te geven. Duidelijk is dat het te maken heeft met het zich op zijn gemak voelen, met het ontbreken van negatieve waarden van de omgeving als geheel.

Als getracht wordt het begrip nader te ontleden kan onderscheid gemaakt worden tussen

- het psychische aspect en
- het fysische aspect.

Het onderwerp van deze voordracht beperkt zich tot dit laatste, hoe belangrijk, ja doorslaggevend, het psychische aspect ook is voor het bestaan van een zekere mate van behaaglijkheid.

Bezien we nader de fysische voorwaarden om aan een zekere mate van behaaglijkheid te kunnen voldoen, dan blijken deze te betreffen:

- de verlichting
- het geluid
- het binnenklimaat.

Bij de waardering van verlichting en geluid is het psychische aspect in het algemeen wat duidelijker aanwezig dan bij het binnenklimaat. Kleuren bijv. zijn wat betreft helderheid en verzadiging goed meetbaar maar worden in het dagelijks leven meer tot die elementen gerekend die de subjectieve sfeer bepalen.

Voor warmtetechnici is het moeilijk om deze subjectieve elementen in de waardering te betrekken. Onderzoekresultaten hieromtrent zijn bovendien schaars.

Op de jaarvergadering van de Nederlandse Technische Vereniging voor Verwarming en Luchtbehandeling (TVVL) in mei jl., deelde de Deense hoogleraar Fanger mede, dat hij zijn onderzoek naar de thermische behaaglijkheid heeft uitgebreid door ook de kleur van de proefruimten hierin te betrekken.

De eerste resultaten waren tot dan toe negatief; daar tegenover worden in ons spraakgebruik wel degelijk de woorden „warm“ en „koel“ ten aanzien van kleuren gebruikt, waarbij wij echter wat minder aan thermische begrippen moeten denken.

Wat verlichting betreft heb ik in een bepaald geval met vrij grote zekerheid kunnen vaststellen dat klachten over het binnenklimaat althans voor een belangrijk deel terug te voeren waren op extreem grote helderheidsverschillen op de verticale wanden. In het navolgende zullen wij ons echter beperken tot de strikt fysische aspecten en dan alleen voorzover deze het binnenklimaat betreffen.

HET BINNENKLIMAAT

Het gewenste binnenklimaat kan teruggebracht worden tot de thermische omgevingstoestand die het de mens mogelijk maakt zo goed mogelijk zijn normale levensverrichtingen te vervullen. Onder het binnenklimaat wordt daarbij verstaan een combinatie van een viertal klimaatfactoren, die betreffen:

- de luchttemperatuur
- de stralingstemperatuur
- de luchtvochtigheid
- de luchtbeweging

Deze combinatie van factoren bepaalt de *thermische behaaglijkheid*.

Daarnaast worden eisen gesteld aan de zuiverheid of frisheid van de lucht. Voor omsloten ruimten betekent dit een eis betreffende de ventilatie of luchtverversing.

DE THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID

Een eerste voorwaarde om thermische behaaglijkheid te bereiken is de aanwezigheid van een thermisch evenwicht, de toestand waarbij evenveel warmte wordt afgegeven als het menselijk lichaam over heeft. Deze afgegeven warmte is de hoeveelheid via de stofwisseling ontstane energie (het metabolisme) verminderd met de verrichte uitwendige arbeid. De overtollige energie wordt als warmte via de bloedsomloop naar de huid getransporteerd en daar afgestaan. Deze afgifte vindt plaats door:

- convectie aan de omgevingslucht
- straling naar de omgevende wanden
- verdamping via de huid en de longen, waarbij het vochtgehalte van de lucht toeneemt.

Bij ontbreken van evenwicht kan gedurende beperkte tijd een eventueel overschot als warmtestuwing in het lichaam worden opgeslagen, respectievelijk in een beperkte hoeveelheid hieraan worden onttrokken. Hoewel in het algemeen de warmte-overdracht door convectie en straling een warmte-afgifte betreft, is onder wat minder gebruikelijke omstandigheden een warmte-opname mogelijk. Dit wordt in de formule aangegeven door het plus- of minteken:

$$M - A = + C + S + E (+\Delta H)$$

waarin:

- M = metabolisme
- A = uitwendige arbeid
- C = afgifte door convectie
- S = afgifte door straling
- E = afgifte door verdamping

ΔH = warmtestuwing

Voor talrijke activiteiten zijn de gemiddelde waarden van het verschil (M - A) bepaald.

Het verschil M-A, ten onrechte soms als (netto-) metabolisme aangeduid, bedraagt voor volwassenen van gemiddelde lengte en gewicht bij verschillende activiteiten gemiddeld als volgt:

Activiteit	(M-A) in W
slapend	75
rustig zittend	110
schrijfmachine	100-130
licht machinewerk (bijv. elektrische industrie)	150-180

sjouwen met zakken van 50 kg	430
tennissen	500
basket ball spelen	800

Uit ervaring is bekend, dat in één ruimte met een bepaald binnenklimaat verschillende activiteiten naast elkaar mogelijk zijn, zij het met een geheel verschillend behaaglijkheidsgevoel. Gaan wij na hoe de door convectie, straling en verdamping afgegeven hoeveelheden warmte afhankelijk zijn van het klimaat, dan valt het volgende op te merken. (Afb. 1).

CONVECTIE

De afgifte kan worden beschreven met de formule:

$$C = A \alpha (t_{\text{huid}} - t_{\text{lucht}})$$

α blijkt in een beperkt gebied evenredig met \sqrt{v} . Daar de huidtemperatuur zich relatief slechts in beperkte mate aanpast blijkt de warmte-afgifte door convectie bij een gegeven binnenklimaat en een gegeven kledingtoestand ook relatief weinig door de hoogte van het metabolisme te worden beïnvloed.

STRALING

Eenzelfde conclusie kan worden getrokken ten aanzien van de warmte-uitwisseling door straling. Hier zijn de emissiecoëfficiënten van het lichaamsoppervlak en de omringende vlakken eveneens als constanten te beschouwen, zodat bij gegeven temperaturen van de omringende oppervlakken en een voorlopig als nagenoeg constant te beschouwen huidtemperatuur de stralingsuitwisseling ook hier slechts beperkt beïnvloed wordt door de hoogte van het metabolisme. In formule:

$$S = \sum_{1}^n F \varphi_{FL} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot A_L (T_L^F - T_F^4)$$

waarin:

- F = één der omringende vlakken
- φ = de vorm- of configuratiefactor tussen lichaam L en vlak F
- ϵ = de emissiecoëfficiënt
- σ = de constante van Stefan Boltzmann ($5,76 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

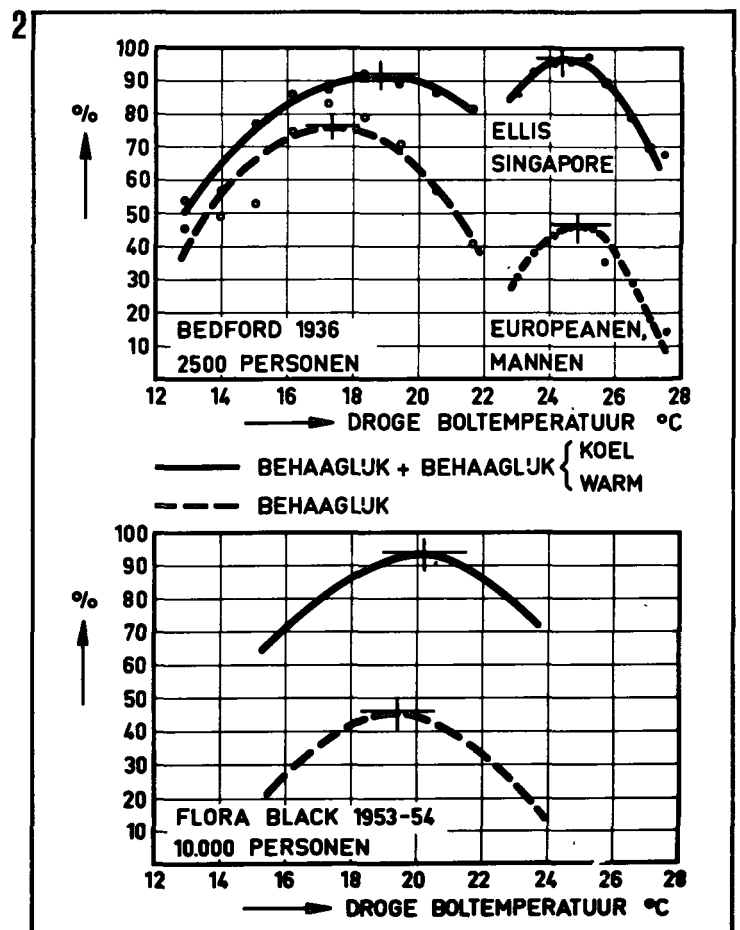
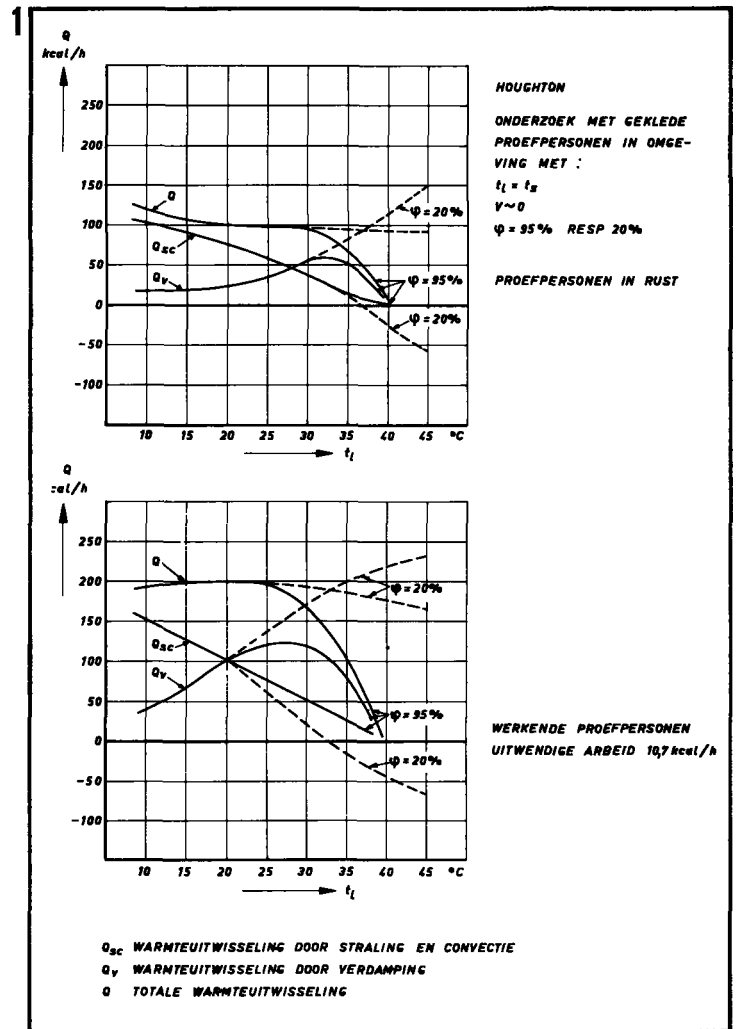
Ter vereenvoudiging wordt het begrip *stralingstemperatuur* gehanteerd. Daaronder wordt verstaan de fictieve, overall gelijke, temperatuur van de als zwart ($\epsilon = 1$) aangenomen omgevende vlakken, die eenzelfde netto-stralingsuitwisseling met de zich in deze omwandeling bevindende mens heeft als in de feitelijke toestand. In de formule wordt bovendien nog een coëfficiënt ingevoerd, waarvan de waarde varieert met de stand van het lichaam.

VERDAMPING

De warmte-afgifte door verdamping kan worden onderscheiden in die

- door diffusie door de huid. Deze is evenredig met het verschil in dampdruk van de verzadigingsdruk bij de huidtemperatuur en die van de omgeving.
- door verdamping in de longen. Deze blijkt evenredig met het metabolisme.
- door actieve zweetafscheiding. Deze vormt het belangrijkste mechanisme van het lichaam om bij hogere metabolismen of ongunstiger (hogere) omgevingstemperaturen het overschot aan warmte af te staan.

Door het warmteregulerend vermogen van het lichaam is over een vrij groot gebied een warmte-evenwicht te bereiken. Weliswaar bezit het lichaam tegen warme omgevingen een wat uitgebreider arsenaal van afweermechanismen (versterkte bloedsomloop door de huid, vaatverwijding, zweetklierwerking) maar tegen koude omgevingen is naast de lichamelijke afweermechanismen (vaatvernauwing, rillen) in de vorm van doelmatige kleding en verwarming een aanpassing betrekkelijk gemakkelijk. Het *behaaglijkheidsgebied* vormt maar een klein gedeelte van het gebied waarbinnen een warmte-evenwicht kan worden bereikt. Welke waarden binnen dit gebied moeten worden toegekend aan de vier klimaatfactoren is uiteraard sterk afhankelijk van de lichamelijke arbeidsinspanning. Deze waarden zijn door verschillende onderzoekers vastgesteld voor een aantal lichame-



lijke activiteiten. Bovendien is de waardering sterk subjectief. Gebleken is verder dat bepaalde combinaties eenzelfde gevoel van behaaglijkheid kunnen oproepen. **Afbeelding 2** geeft een aantal resultaten van onderzoeken naar het verband tussen behaaglijkheid en luchttemperatuur. In de twintiger jaren heeft dit in Amerika geleid tot het ontwikkelen van het begrip „effectieve temperatuur”, dat na een lange aanlooptijd thans vrij algemeen wordt gehanteerd. **Afb. 3** geeft een diagram voor de effectieve temperatuur en in **afb. 4** zijn in een Mollier diagram voor vochtige lucht lijnen van gelijke effectieve temperatuur getrokken. Daaronder wordt verstaan die luchttemperatuur, die bij een relatieve vochtigheid van 100% eenzelfde warmtegevoel heeft als de heersende combinatie van temperatuur en relatieve vochtigheid in de betrokken ruimte. Zonodig worden correcties aangebracht om van de luchttemperatuur sterk afwijkende waarden van de stralingstemperatuur te compenseren, terwijl de luchtsnelheid in beide gevallen ongeveer dezelfde waarde moet hebben. Eigenlijk kan men niet spreken over „de” effectieve temperatuur, daar deze behalve van de luchtsnelheid ook afhankelijk is van bijv. de kleding.

HET METEN VAN DE KLIMAATFACTOREN

Wil men tot een optimale behaaglijkheidssituatie komen dan zal het nodig zijn het klimaat in getalwaarden vast te kunnen leggen. Deze klimaatmetingen, die dan als „behaaglijkheidsmetingen” kunnen worden aangeduid, betreffen de bepaling van de reeds genoemde elementen: luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtvochtigheid en luchtsnelheid.

Daarnaast bestaan instrumenten, waarvan de aanwijzing door meer dan één van deze factoren worden beïnvloed. Met een instrument, dat in de juiste onderlinge verhouding de invloeden van alle vier klimaatfactoren weergeeft, kan men eigenlijk eerst recht van een behaaglijkheidsmeting spreken, voorzover men zich tot het thermische binnenklimaat beperkt.

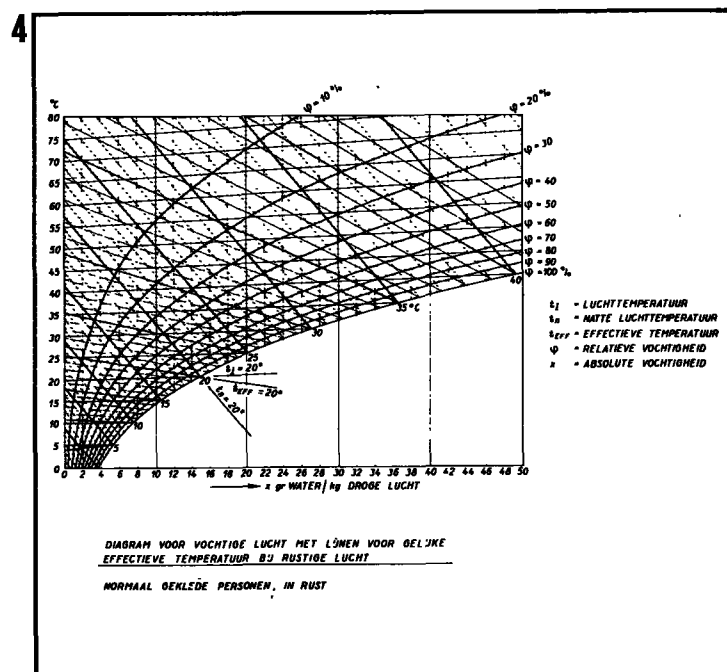
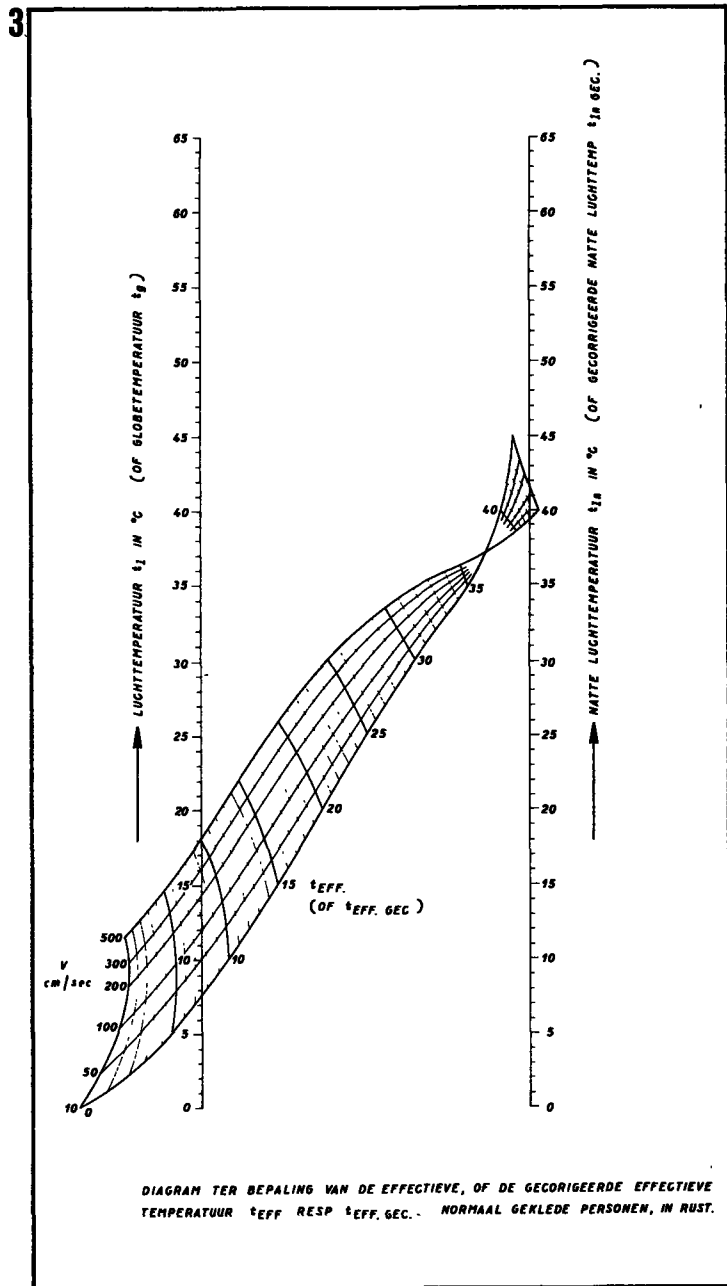
Om tot zulk een instrument te komen werden en worden allerlei pogingen gedaan. Ook bestaan instrumenten die op twee of drie van de vier factoren reageren. In zijn meest volmaakte vorm zou dit instrument een warmteoverdracht moeten bezitten, die zo goed mogelijk vergelijkbaar is met de warmte-afgifte van de mens. Bij de mens is de lichaamstemperatuur van de kern nagenoeg constant, de huidtemperatuur varieert enigszins, het lichaamsoppervlak is vochtig en meestal grotendeels met lucht- en waterdampdoorlatende weefsels bedekt. Houdt men rekening met de afhankelijkheid van de warmte-overdracht van de stand van zo'n instrument, dan blijkt een verticale cylinder de meest aangewezen vorm. Nog wat meer vereenvoudigd komt de bolvorm in aanmerking.

Alvorens een aantal van dit soort instrumenten te bespreken, zij opgemerkt dat in verreweg de meeste gevallen de voorkeur moet worden gegeven aan het bepalen van de waarde van elke klimaatfactor afzonderlijk, hoewel het eenvoudiger lijkt te kunnen volstaan met één, naar men hoopt minder omvangrijk, instrument.

Een aantal redenen kunnen als oorzaak worden genoemd.

1. Ten eerste is het de vraag of bij kwalitatief gelijkwaardige metingen een integraal instrument wel zoveel minder omvangrijk zal zijn.
2. Ten tweede is er het bezwaar, dat het gebruik van zo'n apparaat praktisch alleen neerkomt op het constateren van een afwijking van de als norm gestelde waarde. Een dergelijk instrument is dus nuttig om de klimaatbelasting op een aantal plaatsen te vergelijken. Is er een afwijking geconstateerd, dan moet om deze te kunnen opheffen echter toch worden teruggevallen op de waarde van de afzonderlijke componenten. Een te lage aanwijzing van een integrerend klimaatinstrument betekent in feite alleen een te grote afkoelsnelheid. De oorzaak kan evengoed een te lage luchttemperatuur, een te hoge luchtsnelheid, een te lage wandtemperatuur als een te lage vochtigheid zijn.

Om te kunnen nagaan of de geconstateerde afwijking een bouwkundige oorzaak heeft (bijv. een te geringe isolatie) dan



Om te kunnen nagaan of de geconstateerde afwijking een bouw- wel bijv. aan een onjuist functionerende verwarmings- en/of ventilatievoorziening te wijten is, moet men ook weer de beschikking hebben over de meetwaarden van de afzonderlijke componenten.

3. Een complicatie bij het ontwerp van „klimaatmeters“ is ook dat de invloed van veranderingen van een grootte op het warmtegevoel niet continu is. Dit geldt met name voor de invloed van de relatieve vochtigheid waarvan onder wat men „normale omstandigheden“ noemt volgens de meeste onderzoekers veranderingen tussen 30 en 70% relatieve vochtigheid geen of nauwelijks veranderingen in het warmtegevoel bleken te geven, al zijn de uitkomsten van alle onderzoeken op dit punt niet altijd eensluidend. Algemeen verbreid bij gebruikers is dikwijls nog de onjuiste gedachte dat 50% relatieve vochtigheid beter zou zijn dan bijvoorbeeld 40 of 60%. Het gevolg hiervan is dat de invloed van de relatieve vochtigheid op dit soort gecombineerde instrumenten in meer of mindere mate wordt overschat.

Een recente uitvoering van een dergelijk instrument geeft **afb. 5**, waarmede de afkoelheid (bijv. in W/m^2) kan worden afgelezen. Bovendien kunnen hiermede de waarden van de afzonderlijke klimaatcomponenten worden bepaald. De temperatuur en de vochtigheid worden met temperatuurvoelers voor respectievelijk de droge- en natteboltemperatuur bepaald. Het verschil in vermogen nodig om twee evengrote bollen met verschillende emissiecoëfficiënt op een constante temperatuur te houden geeft de waarde van de stralingstemperatuur en het vermogen nodig om deze bol op een constante temperatuur te houden geeft, samen met de luchttemperatuur, de waarde van de gemiddelde luchtsnelheid.

In feite mag men dit instrument, wat de bepaling van de afkoel-snelheid betreft, vergelijken met de oude bekende katathermo-meter, (**afb. 6**). Deze geeft als aflezing de tijd nodig om af te koe-len van 38 tot $35^\circ C$. De warmte-afgifte vindt daarbij plaats via convectie en straling. Maakt men gebruik van 2 exemplaren (**afb. 6 en 7**), waarvan de reservoirs een onderling verschillende en be-kende emissiecoëfficiënt bezitten en wordt tevens de luchttem-peratuur afzonderlijk bepaald, dan kan zowel de gemiddelde stra-lingstemperatuur als de gemiddelde luchtsnelheid worden bere-kend, juist al bij dit nieuwe instrument.

ENKELE ALGEMENE OPMERKINGEN OVER DE KEUZE VAN DE MEETPLAATS

Met uitzondering van de luchtvochtigheid, die in de vorm van dampdruk of van absolute vochtigheid binnen één ruimte overal vrijwel gelijk is, zijn de overige grootheden binnen één ruimte in waarde van plaats tot plaats verschillend.

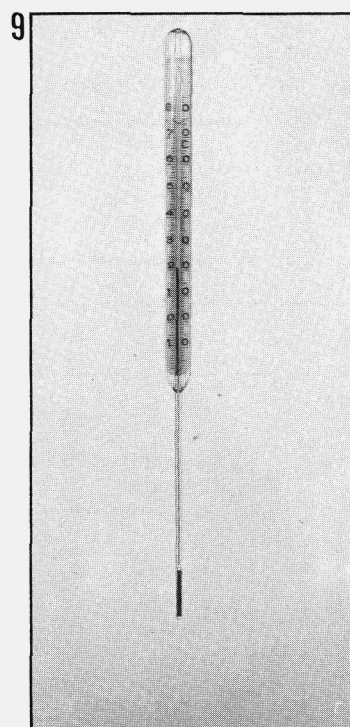
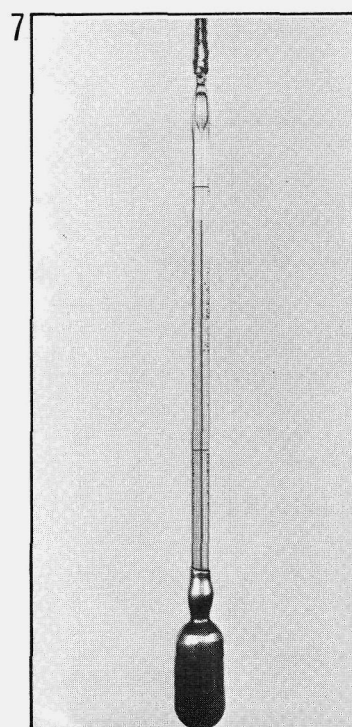
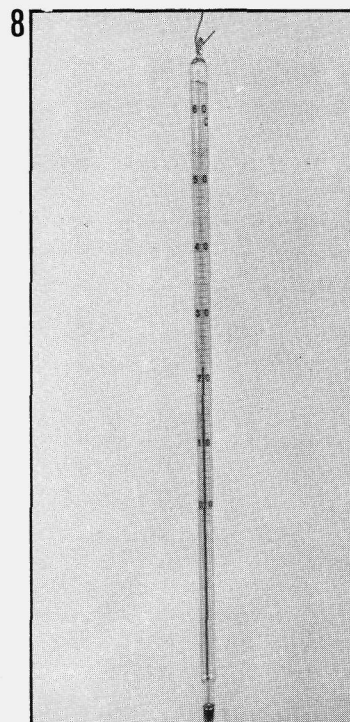
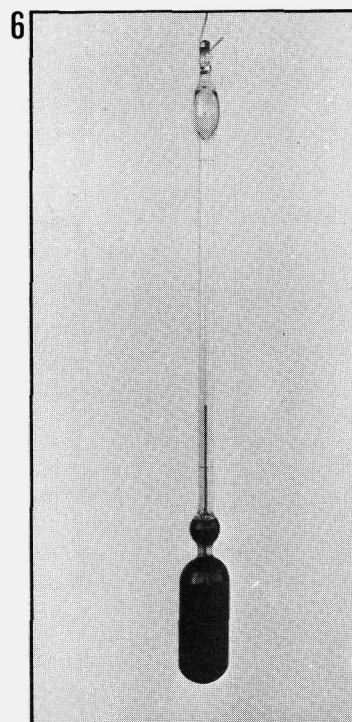
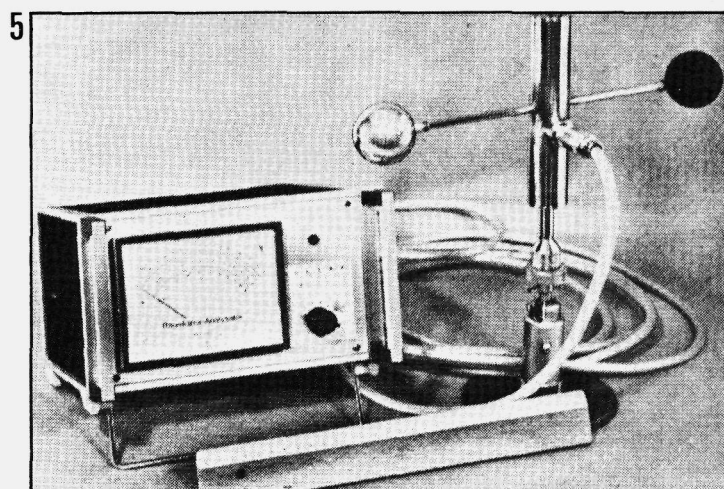
Dit wordt onder meer veroorzaakt door zowel de horizontale als de verticale temperatuurgradiënt wat de luchttemperatuur be-treft, de met name wat de buitenwand betreft van het gemid-delde afwijkende oppervlaktetemperatuur, en de van plaats tot plaats verschillende luchtsnelheden. Met het oog op de behaag-lijkheid mogen deze gradiënten een bepaalde waarde niet overschrijden, bijv. 1 à $1,5^\circ C/m$ voor de verticale temperatuur-gradiënt. Voor zittende personen moet daarom de meting bij voor-keur plaatshebben op $0,6$ à $0,75$ m hoogte; voor staande perso-nen op $1,0$ à $1,5$ m hoogte. Nog beter is uiteraard op een aantal hoogten te meten vanaf even boven de vloer tot ca. $2,0$ m. Doet men dit op verschillende plaatsen in één ruimte, dan is het moge-lijk isotherme vlakken vast te stellen, waar overal dezelfde lucht-temperatuur heerst.

Ook vloer- en plafondtemperaturen zijn aan maxima gebonden wil men een behaaglijke toestand bereiken.

a. Luchttemperatuur

Hoewel de heer Snellink in deze Vakantieleergang de tempera-tuurmetingen reeds uitgebreid behandelde volgt hier nog een kort resumé voor wat klimaatmetingen betreft.

De *kwikthermometer* (figuur 8) is het meest algemene instru-ment voor dit soort metingen. De nauwkeurigheid en lage prijs maken het daarvoor bijzonder geschikt. Behalve de grote tijdcon-



stante, die tot gevolg heeft dat snel wisselende temperaturen hiermee niet kunnen worden gemeten, is een tweede nadeel dat ongewenste stralingsuitwisseling bij een van de luchttemperatuur sterk afwijkende stralingstemperatuur de aanwijzing beïnvloedt. De afgelezen temperatuur ligt dan ergens tussen lucht- en stralingstemperatuur in. Om dit nadeel op te heffen kan het reservoir worden voorzien van een enkel- of nog beter dubbelwandig stralingsscherm. Een tweede methode is het verkleinen van het kwikreservoir.

De Bargeboerthermometer (afb. 9), met een reservoir van slechts 2 mm diameter, is hiervan het voorbeeld. De stralingsuitwisseling wordt zodoende beperkt en de convectie-overdracht verhoogd, zodat de aanwijzing beter de luchttemperatuur benadert. De traagheid neemt door de kleinere afmetingen tevens af. Een zo plaatselijk mogelijke verhoging van de luchtsnelheid draagt eveneens bij tot een kleiner verschil tussen afgelezen temperatuur en luchttemperatuur. Hiervan wordt bijv. bij de psychrometer gebruik gemaakt.

Elektrische temperatuurmetingen hebben een aantal opvallende voordelen. Met een grote nauwkeurigheid kunnen een groot aantal temperaturen eventueel gelijktijdig en op afstand worden afgelezen en indien gewenst geregistreerd.

Thermokoppels, in dit temperatuurgebied meestal ijzer-constantan of koper-constantan, bieden daarbij het grote voordeel van zeer kleine afmetingen en daardoor weinig stralingsinvoer en geringe traagheid. Ook op moeilijk bereikbare plaatsen is eenvoudig de temperatuur te bepalen.

Voor koper-constantan is de e.m.k. 4,16 mV per 100 K en voor ijzer-constantan 5,2 mV per 100 K.

Bij het op compenserende wijze meten van de meetspanningen is het bezwaar van de afhankelijkheid van de aanwijzing van de lengte der thermokoppels vervallen. Om het temperatuurniveau op de meetplaats te kunnen bepalen wordt één der lussen op een constante temperatuur gehouden. Bij niet langdurige metingen is smeltend ijs nog steeds een geschikt middel om een constant vergelijkingsniveau te handhaven.

De Afdeling Binnenklimaat van het Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek TNO heeft reeds jaren geleden voor haar klimaatmetingen zgn. koudelas-thermostaten aangeschaft. De naam „koudelas” wijst er duidelijk op dat bij het vroeger gebruikelijke ijs de temperatuur hiervan vrijwel altijd beneden de te meten temperatuur lag.

Voor normale binnentemperaturen is dit voor deze thermostaten met hun temperatuur van 41 à 43° juist niet het geval. Hoewel geregelde controle nodig is, mogelijk met een eenvoudige kwikthermometer, blijkt de nauwkeurigheid ruim voldoende om de voor dit soort metingen gewenste nauwkeurigheid te bereiken.

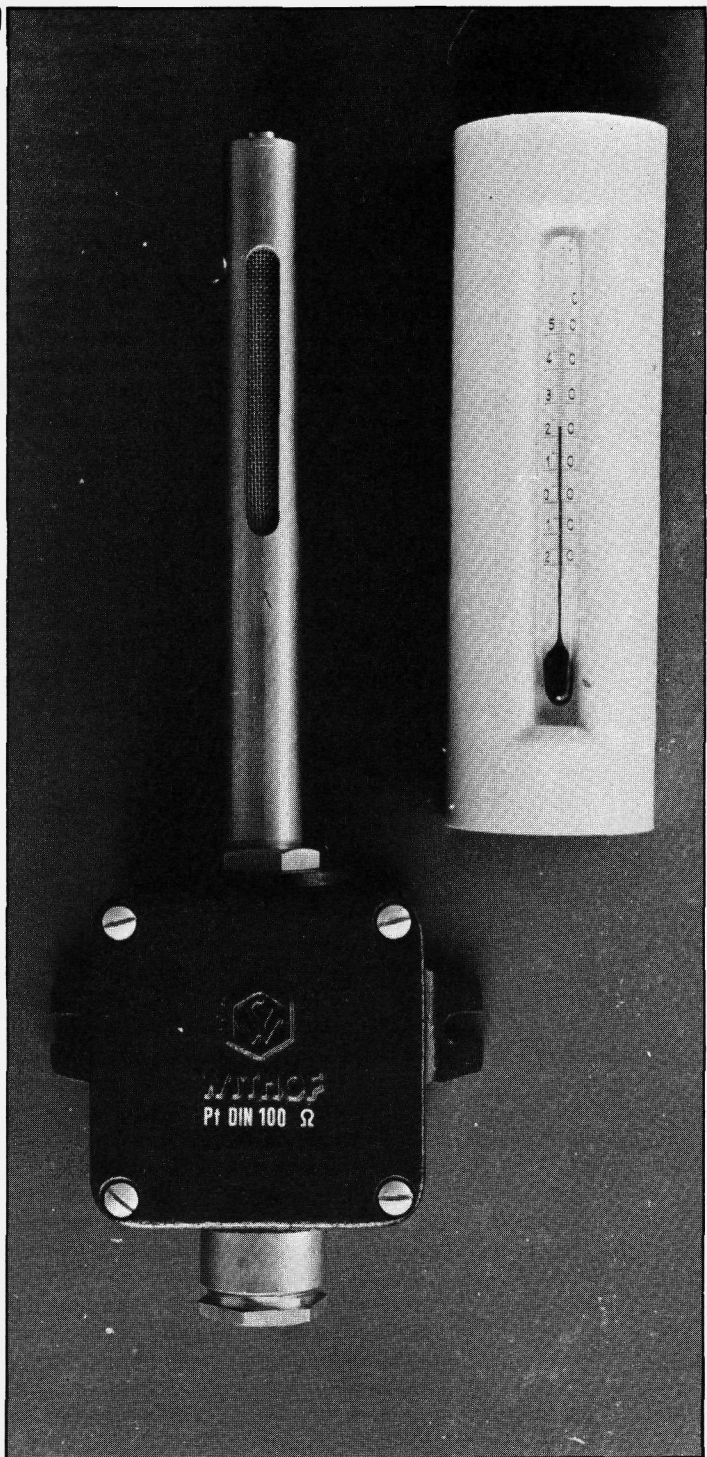
De soms bij thermokoppels wel gebruikte koudelas-compensatieschakeling is over het algemeen wat minder nauwkeurig voor klimaatmetingen.

Wat de praktijk van temperatuurmetingen met thermokoppels betreft kan allereerst gewezen worden op de voor het doel grote nauwkeurigheid die men kan bereiken. Naast de nauwkeurigheid van het afleesinstrument is, daar het een verschilmeting betreft, de nauwkeurigheid van de referentielas bepalend voor de totaal te bereiken nauwkeurigheid. Verder is de tijdconstante gering en is het mogelijk op moeilijk toegankelijke plaatsen te meten.

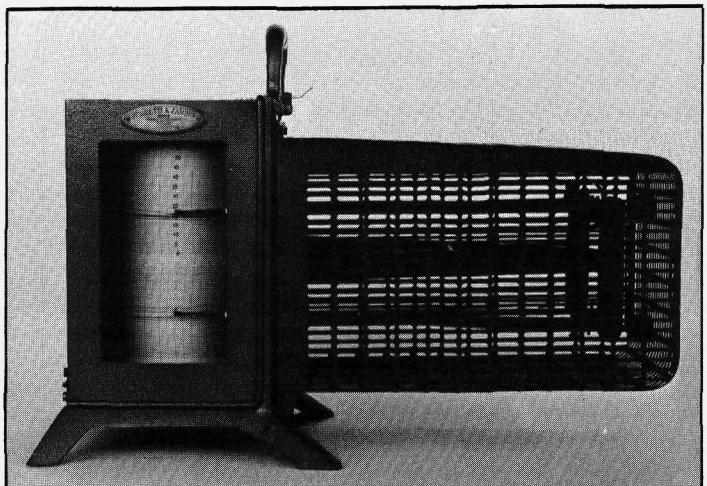
Ook de *elektrische weerstandsthermometers* maken het mogelijk zeer nauwkeurig de temperatuur op afstand te meten (afb. 10).

Te onderscheiden zijn de uitvoeringen van meestal nikkeldraad, die gewoonlijk bij 0°C 100Ω weerstand bezitten en de keramische weerstanden, die een negatieve en relatief hoge weerstandscoefficiënt bezitten. De afmetingen van deze laatste kunnen zeer gering zijn. Het verband tussen temperatuur en weerstand is echter wat minder eenvoudig dan bij de uit metaal draad bestaande weerstandsthermometer. De op de vormverandering tengevolge van temperatuurwijziging berustende strook bimetaal wordt o.a. in de thermograaf voor controlemetingen gebruikt, meestal in combinatie met een hygrograaf (afb. 11).

10



11



b. Oppervlaktetemperatuur

De kleine afmetingen van de thermokoppels maken het mogelijk ook oppervlaktetemperaturen hiermede te bepalen. Dit kan wenselijk zijn als men voor de bepaling van de stralingstemperatuur geen gebruik kan maken van de hierna te noemen globethermometer, wegens te grote verschillen in temperatuur tussen de verschillende deeloppervlakken. Is het meten van de oppervlaktetemperatuur op deze wijze ook niet mogelijk, dan kan gebruik gemaakt worden van op de thermische straling berustende instrumenten.

Bekend is dat de uitgezonden energie voor elk lichaam evenredig is met de vierde macht van de temperatuur in Kelvin, en verder met de emissiecoëfficiënt, waarvan de waarde tussen 0 en 1 ligt. De grootte van deze emissiecoëfficiënt is afhankelijk van het golflengtegebied en daarmee van de temperatuur.

Het maximum van de uitgezonden straling voor de temperaturen in het gebied waar het hier om gaat ligt ongeveer bij golflengten van ca. $10 \mu\text{m}$.

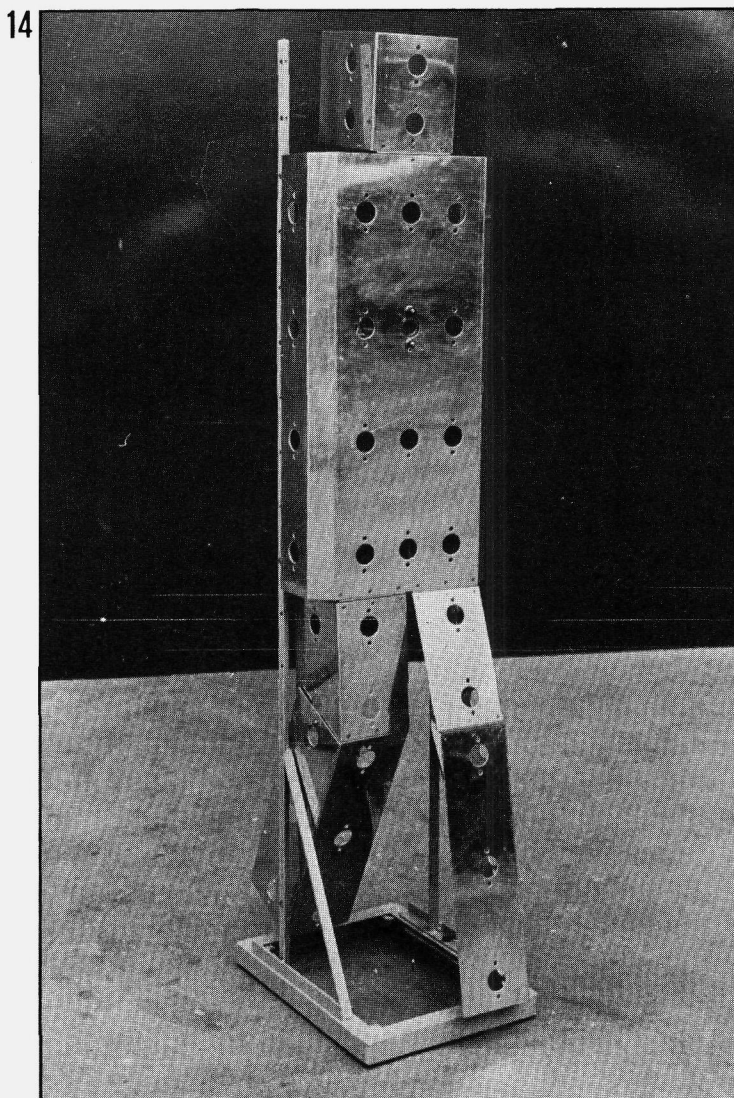
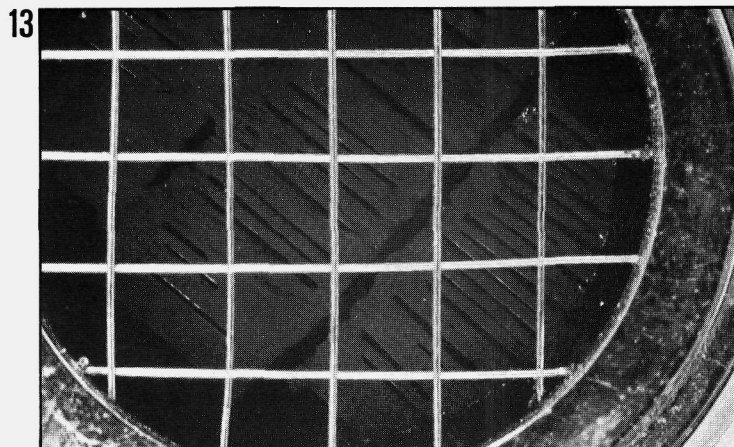
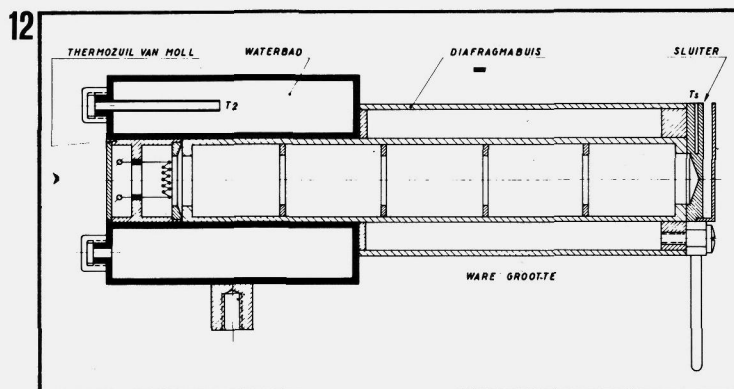
Voor vrijwel alle bouwmaterialen, met uitzondering van metalen, is de emissiecoëfficiënt in dit golflengtegebied hoog (0,90 à 0,95). Bij het bepalen van gemiddelde oppervlaktetemperaturen, zowel als voor het meten van opvallende straling vooral bij werkers in warme industriële omgevingen, maakt de Afdeling Binnenklimaat gebruik van thermozuilen. (afb. 12). De gekozen uitvoering bestaat uit ca. 80 thermokoppels, waarvan de warme lassen dun uitgewalst en met roet bedekt zijn, terwijl de koude lassen omgeven zijn door een in verhouding zwaar messing blokje, om de invloed van een variërende omgevingstemperatuur zo klein mogelijk te houden (afb. 13).

Voor het eerstgenoemde gebruik, dat van de bepaling van de oppervlaktetemperatuur, wordt door het aanbrengen van een conus (met daarin ringen om ongewenste reflecties te belemmeren) een bepaalde ruimtelijke beeldhoek bereikt. Als deze beeldhoek in samenhang met de meetafstand zodanig is, dat uitsluitend straling van het te meten oppervlak op de thermozuil valt, bestaat, afgezien van een meestal te verwaarlozen absorptie, geen afhankelijkheid van de afstand op de aanwijzing. Deze afstand bepaalt uiteraard wel de grootte van het vlak waarvan de gemiddelde temperatuur wordt bepaald.

Volgens eigen ontwerp is om de thermozuilen aan de achterzijde een waterbad aangebracht, waardoor de referentietemperatuur zowel minder door schommelende luchttemperaturen wordt beïnvloed als gemakkelijker kan worden gemeten. Voor nauwkeurige metingen is dit noodzakelijk omdat de aanwijzing evenredig is met het verschil van de vierde macht van de absolute temperaturen van het betreffende oppervlak en het instrument zelf. Bij het gebruik als meetinstrument voor de totale opvallende straling wordt uiteraard geen conus aangebracht. De metingen vinden soms plaats door op de plaats van de betreffende arbeider een dummy te plaatsen. De afmetingen van deze dummy komen wat oppervlakte betreft overeen met die van een volwassen man van gemiddelde afmetingen. De dummy is voorzien van een groot aantal openingen, waarachter bedoelde stralingsmeters kunnen worden aangebracht op de gewenste plaatsen (afb. 14). Een op deze wijze verkregen meetresultaat is hier bijgevoegd. Het betref de stralingsbelasting door glasvlammen bij het monteren van televisiebeeldbuizen. Het resultaat laat zien hoe de gemeten warmtebelasting redelijk overeenstemt met berekende waarden (afb. 15).

Een andere uitvoering van dit soort instrumenten maakt gebruik van een holle spiegel, waardoor de opvallende bundel stralen in één punt geconcentreerd wordt, waar de thermozuil is aangebracht. Compensatie van de invloed van de omgevingstemperatuur wordt hierbij via een elektrische schakeling bereikt met behulp van temperatuurafhankelijke weerstanden.

In de meeste gevallen is het voldoende om in niet-industriële omgevingen de stralingsinvloed te bepalen uit de aflezing van een zgn. globethermometer en een tegen straling afgeschermd thermometer. Is bij de laatste de invloed van opvallende straling zoveel mogelijk geëlimineerd, bij de globethermometer is, door het meetinstrument (kwikthermometer of elektrische opnemer) met



een dofzwarte bol van 150 mm diameter te omgeven, de invloed van de straling op de aflezing juist verhoogd (afb. 16).

Voor lage lichtsnelheden ($< 0,2 \text{ m/s}$) geldt met goede benadering:

$$t_{\text{globe}} = \frac{t_{\text{straling}} + t_{\text{lucht}}}{2}$$

Is de lichtsnelheid hoger of gelijk aan $0,2 \text{ m/s}$, dan zal de globe-temperatuur uiteraard dichter bij de luchttemperatuur liggen. Dan geldt:

$$t_{\text{globe}} = \frac{t_s + 2,4 t_l \sqrt{v}}{1 + 2,4 \sqrt{v}}$$

De betrekkelijk grote massa, zelfs van een dunwandige aluminium bol, maakt het instrument traag, zodat snel fluctuerende omstandigheden hiermede niet kunnen worden onderzocht. In het algemeen is dit geen groot bezwaar. De uitvoering volgens Missenard heeft een cilindrische vorm (afb. 17).

c. Lichtsnelheid

Lichtsnelheidsmetingen zullen in het algemeen lage lichtsnelheden betreffen. Onderscheiden kunnen worden in de eerste plaats de instrumenten die de in dit gebied geringe bewegingsenergie van de lucht gebruiken voor het in draaiing brengen van een lichtlopend schoepenrad. Naast het nadeel dat de richtingsgevoeligheid groot is komt nog de relatief hoge aanloopsnelheid, de tere constructie en de snelle beïnvloeding van de aanwijzing door vervuiling.

Een halfjaarlijkse ijking, zowel in horizontale als in verticale stand is daarom gewenst (afb. 18).

Andere instrumenten berusten op de door de stuwdruk uitgeoefende kracht op bijvoorbeeld een meetvleugel zoals in de Velometer het geval is. Ook hier is grote richtingsgevoeligheid aanwezig, terwijl bovendien het blokkerende effect groot is tengevolge van de afmetingen. Vanaf ca. $0,15 \text{ m/s}$ is dit echter, afgezien van deze nadelen, een bruikbaar oriënterend instrument (afb. 19a en b).

Voor lage lichtsnelheden is bijzonder geschikt het principe van de afkoeling van een verwarmd meetelement. Vele handelsinstrumenten maken hier dan ook gebruik van, daar het betrekkelijk eenvoudig is te realiseren. Reeds werd de katathermometer vermeld, waarbij de katawaarde, eigenlijk de afkoelsnelheid in $\text{mcal/cm}^2\text{s}$ een functie is van de lichtsnelheid en luchttemperatuur. Bij bekende luchttemperatuur kan zodoende de gemiddelde lichtsnelheid over de afkoeltijd (ca. 30 s à 60 s) worden berekend.

Bij de gebruikelijke elektrische anemometers stroomt de lucht langs een verwarmde weerstandsdraad of bijvoorbeeld een verwarmde keramische weerstand.

Twee methoden worden onderscheiden:

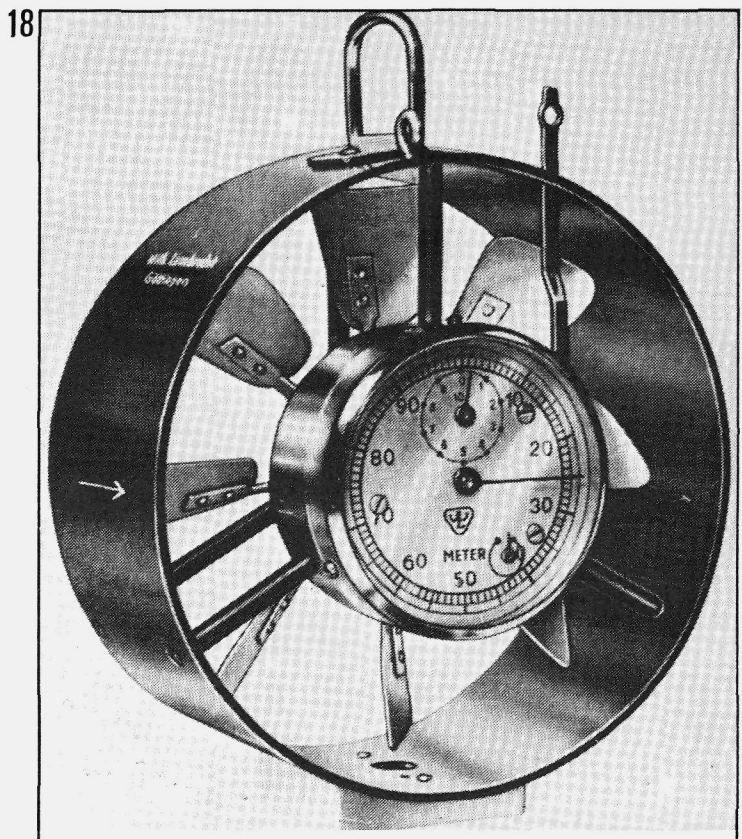
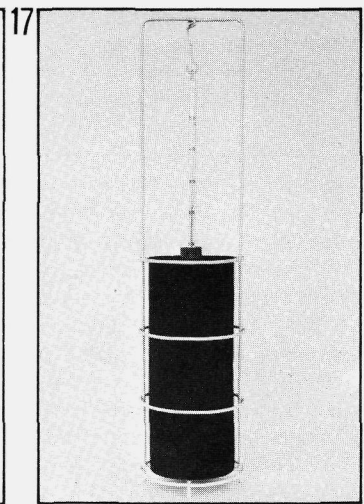
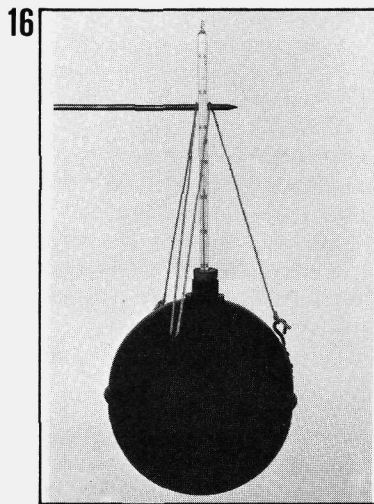
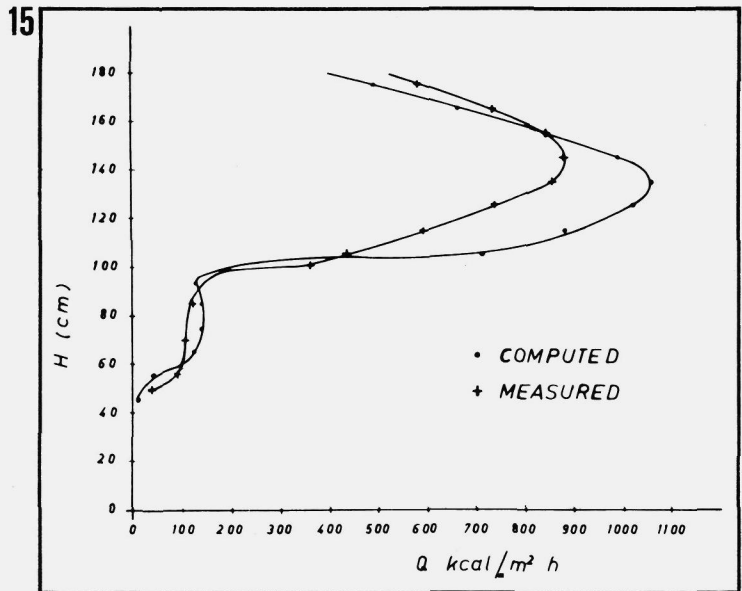
1. de stroomsterkte is constant, en daarmee is de weerstandsverandering, de temperatuur, of de spanning over de weerstand, een functie van de lichtsnelheid.
2. bij de tweede methode wordt de temperatuur van de weerstand constant gehouden en is de stroomsterkte de af te lezen grootte. Omdat zeer dunne draadjes zijn te realiseren zijn zeer snelle schommelingen in de lichtsnelheid vast te stellen.

De praktische uitvoering dient rekening te houden met de volgende nadelen:

- de richtingsgevoeligheid gezien de grote verhouding $\frac{1}{d}$
- de afhankelijkheid van de luchttemperatuur.

Deze laatste is te verminderen door de draadtemperatuur op te voeren.

Daarbij wordt de door de verwarming opgeroepen eigen convec-tie echter versterkt, zodat zeer lage lichtsnelheden dan niet meer zijn te meten. Juist voor klimaatmetingen waar het hoofdzakelijk snelheden $< 0,50 \text{ m/s}$ betreft, is dit een ernstig nadeel. Het laboratorium van de Firma Trox heeft een aantal instrumenten die op dit principe berusten onderzocht. De resultaten, die in



februari van dit jaar gepubliceerd werden, betreffen:

- de thermische anemometer van de firma Lambrecht (afb. 20)
- de Anemotherm (fabrikaat Anemostat)
- de Davimeter (fabrikaat Air Flow)
- de hittedraadanemometer (fabrikaat Fuess)
- de door het IG-TNO indertijd ontwikkelde thermo-elektrische anemometer (afb. 21a).

U zult het mij niet kwalijk nemen de laatste iets uitvoeriger te behandelen. Uitgangspunten bij de constructie waren indertijd:

- zo mogelijk geen richtinggevoeligheid
- lage temperatuur in verband met de eigen convectie
- geen stralingsgevoeligheid
- in verband met de overige meetapparatuur: berustend op het thermoelektrisch principe
- onafhankelijkheid van de luchttemperatuur

De meetsonde kwam er tenslotte als in **afb. 21** uit te zien. Uit het genoemde vergelijkend onderzoek bleek de gekozen bolvorm van de beide thermolassen inderdaad tot een zeer grote ongevoeligheid voor de aanstroomrichting te hebben geleid. Deze is bij klimaatmetingen daarom zo noodzakelijk, omdat de richting van de luchtstromingen vrijwel nooit bekend is. Een onvermijdelijk nadeel ten opzichte van de overige elektrische instrumenten is de relatief grote en constructief onvermijdelijke grote massa van de bolletjes (\varnothing ca. 3 mm).

De traagheid is daarom te groot als men zeer snelle fluctuaties zou willen volgen. Wanneer dit nadeel te groot wordt kan het IG gebruik maken van de Deense DISA-apparatuur, die hierop speciaal is afgestemd. De voordelen zijn niettemin zo groot dat een vrij groot aantal relaties gebruik is gaan maken van het TNO instrument, dat in figuur 21b compleet is afgebeeld. Wat de bepaling van de snelheidsrichting betreft is het gebruik van rook of andere zichtbare deeltjes nog steeds favoriet. Fotografische vastlegging van de resultaten kan hierbij noodzakelijk zijn. Eventueel kan voor een drie-dimensionaal inzicht een stereo-camera zijn dienst bewijzen. Het IG maakt voor routinemetingen echter nog geen gebruik van deze methode.

Uit eigen ervaringen in de loop der jaren is gebleken dat veel luchtsnelheidsinstrumenten bij najiking zeer grote afwijkingen vertoonden. Afwijkingen tot 50% en hoger werden meermalen geconstateerd, terwijl ook de richtinggevoeligheid van een aantal instrumenten niet alleen groot maar soms ook onvoorspelbaar bleek.

d. Luchtvochtigheid

Van belang kunnen zijn zowel:

- de relatieve vochtigheid (in %)
- de absolute vochtigheid (in g/kg)
- het dauwpunt (in °C).

Is tevens de luchttemperatuur bekend, dan kunnen al deze grootheden worden berekend respectievelijk afgelezen in het Mollier-diagram, als één gegeven bekend is.

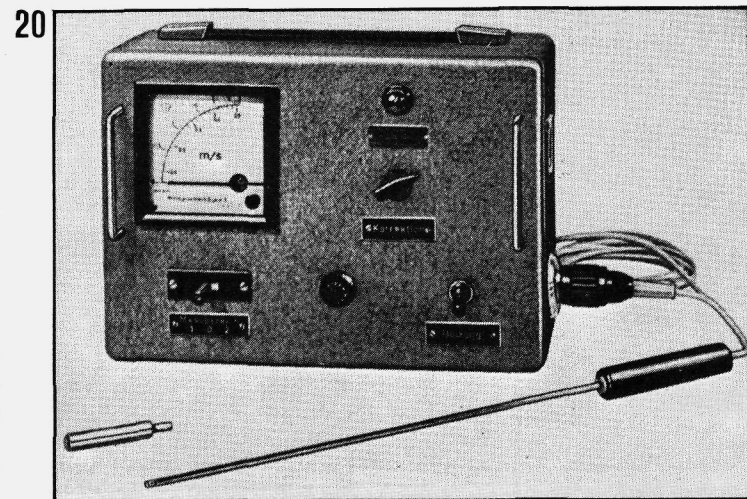
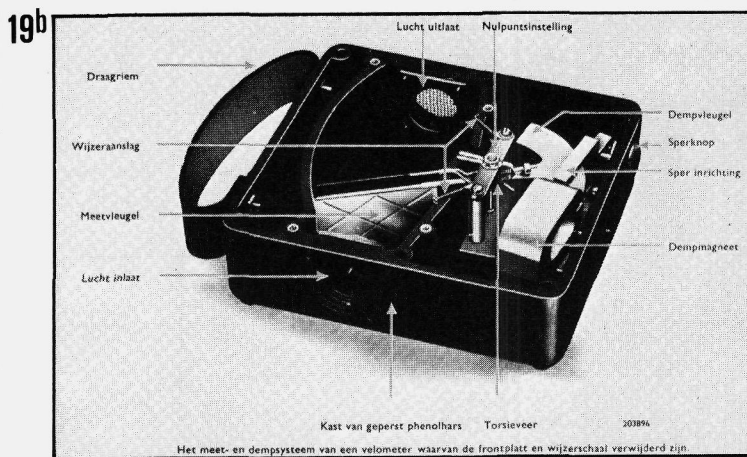
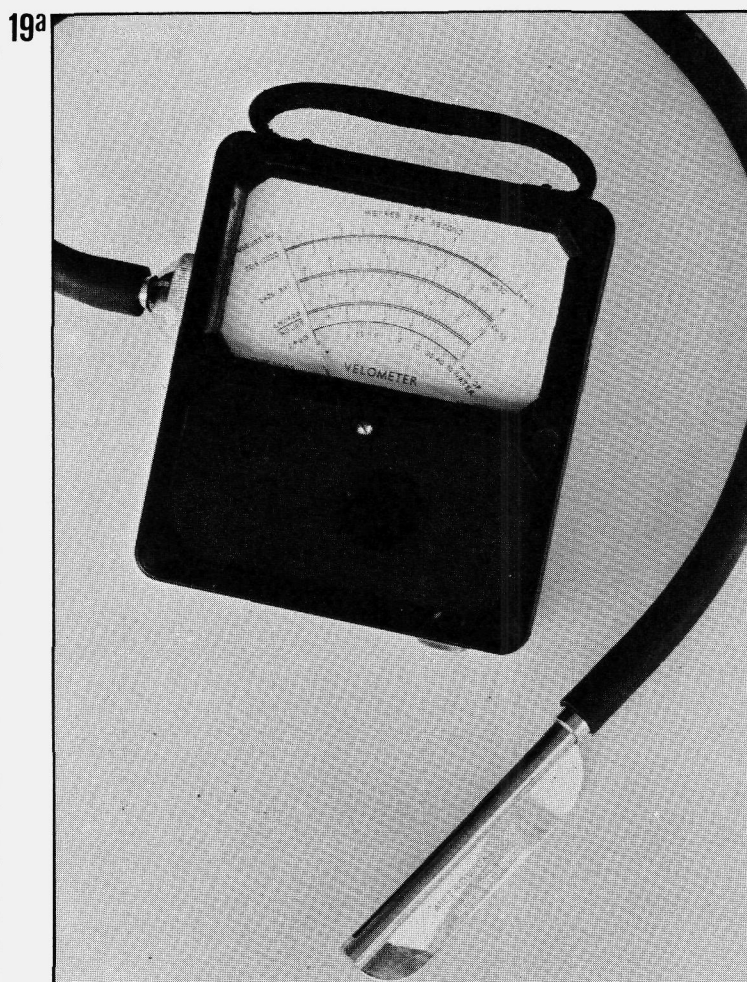
Wat de meetmethoden betreft het volgende.

- 1) Directe bepaling van de absolute vochtigheid vindt nauwelijks plaats wegens de tijdrovende en omvangrijke apparatuur.
- 2) De directe dauwpuntbepaling volgens Regnault is weer nieuw leven ingeblazen door de ontwikkeling van de Peltier-koelelementen.

Een dauwneerslag van $3 \mu\text{g}$ per cm^2 is thans afleesbaar, tegenover 35 tot $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ bij visuele waarneming.

De psychrometer (**afb. 22**) is het meest nauwkeurige en eenvoudige praktijkinstrument. Verwaarloost men de warmteinhoud van het verdampende water, dan is er sprake van adiabatische verzadiging van de langs een thermometer, waarvan het reservoir met een nat kousje is omgeven, stromende lucht. Of verzadiging wordt bereikt hangt tevens af van de luchtsnelheid, die ca. 2 à 2,5 m/s moet bedragen. Is deze lager, dan wordt het begrip psychrometrisch rendement gehanteerd, waaronder het gemeten psychrometrische verschil wordt verstaan gedeeld door het werkelijke psychrometrische verschil.

Nog steeds dient dit klassieke instrument, ook bij het IG, als standaard, evenals in de meteorologie het geval is.



Daarnaast zijn vele instrumenten in de handel berustend op het hygrosco-pisch karakter van sommige zouten, met name lithiumchloride. Voordeel is de continue aflezing, eventueel registratie van het dauwpunt. De afgelezen temperatuur, de temperatuur van lithiumchloride waarbij de verzadigingsdruk gelijk is aan de dampdruk van de omringende lucht, maakt het mogelijk de dauwpuntstemperatuur direct af te lezen. Diagrammen of andere hulpmiddelen maken het mogelijk ook de relatieve vochtigheid of het vochtgehalte af te lezen. **Afbeelding 23** toont een vroegere uitvoering van zo'n instrument.

De oude getrouwe haarhygrometer tenslotte, berustend op de lengteverandering van organisch materiaal (meestal nog haren) mag in dit overzicht niet ontbreken, daar het een eenvoudige controle van de relatieve vochtigheid mogelijk maakt.

Als men geen al te grote nauwkeurigheid vereist kan hiermede snel een indruk ook over langere tijd worden verkregen. In plaats van haren worden ook andere organische materialen toegepast, zoals nylonband en andere kunststofelementen.

BEHAAGLIJKHEIDSVERGELIJKINGEN

In plaats van een instrument, dat in één getalwaarde de behaaglijkheid tracht aan te geven, is het mogelijk uit te gaan van de vier genoemde klimaatfactoren en daaruit een grootheid te berekenen. Bedfords vergelijking werd reeds genoemd, evenals de aan Nederlandse omstandigheden aangepaste versie van Van Zuilen. In deze vergelijkingen komen de lucht- en stralingstemperatuur, de waterdampspanning en de luchtsnelheid voor.

A. Voor Nederlandse omstandigheden omgewerkt luidt de vergelijking van Bedford:

$$S = P - 0,1 t_1 - 0,0968 t_s - 0,0372f + 0,0367 (37,8 - t_1)\sqrt{v}$$

(t_1 en t_s in °C, f in mmkwik, v in m/s)

$P = 7,83$ voor de winter en $= 8,45$ voor de zomer

$S = 1$ is veel te warm; $4 =$ behaaglijk; $7 =$ veel te koud

B. Van Zuilen vereenvoudigde de formule tot:

$$S = P + 0,25 (t_1 + t_s) + 0,1 x - 0,1 (37,8 - t_1)\sqrt{v}$$

waarin:

$P = -9,2$ in de winter en $-10,6$ in de zomer

$x =$ absolute vochtigheid in g/kg

$v =$ snelheid in m/s

Hierin betekent:

$S = 3$ veel (ca. 5°) te warm

$= 0$ behaaglijk

$S = -3$ veel (ca. 5°) te koud

Ter vergelijking van klimaten in gelijksoortige ruimten zijn dit soort vergelijkingen nuttig.

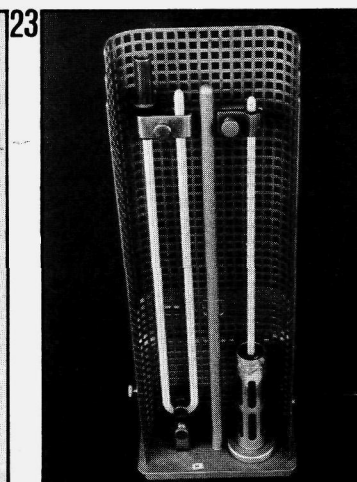
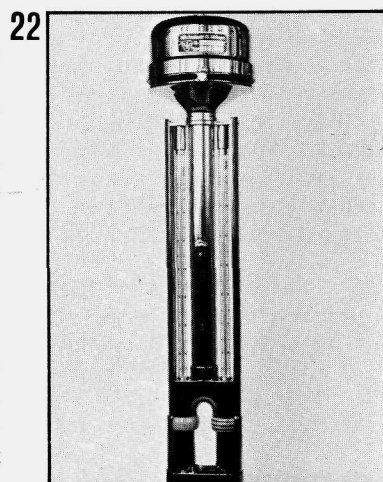
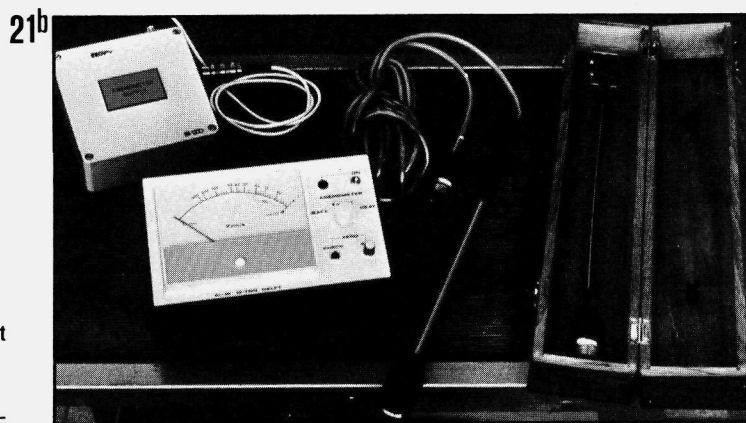
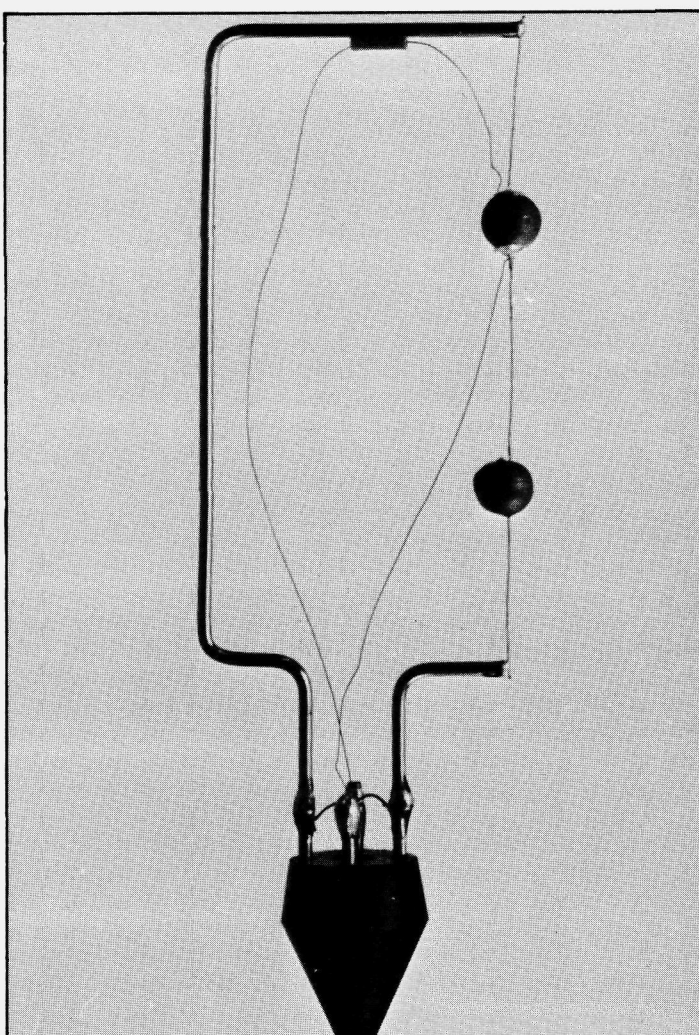
C. In het „herziene veiligheidsbesluit voor fabrieken en werkplaatsen 1938“ wordt het begrip „temperatuurindex L“ ingevoerd.

Dit begrip is in feite een vereenvoudigde vorm van de effectieve temperatuur, een grootheid die reeds eerder werd vermeld.

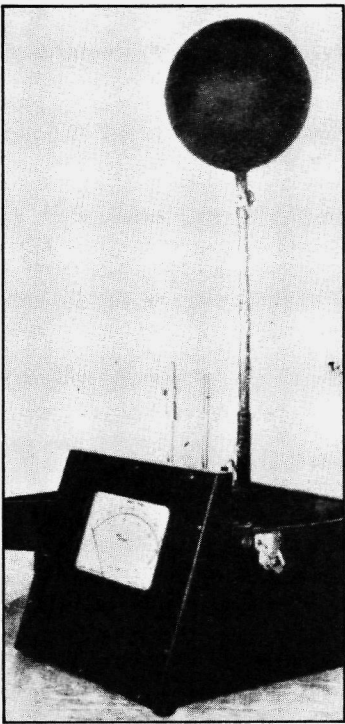
Onder aanname dat de stralingstemperatuur niet te sterk van de luchttemperatuur afwijkt (maximum verschil 5°C) en ervan uitgaande dat de luchtsnelheid beneden ca. 1 m/s geen al te grote invloed heeft wordt L alleen afhankelijk van luchttemperatuur en luchtvochtigheid.

$$L = 42 \cdot \frac{t_1 - 8 t_{1n}}{34 + t_1 - t_{1n}}$$

In principe mag in werkruimten L volgens dit besluit niet hoger zijn dan 23 en niet lager dan 12, al zijn in bepaalde omstandigheden afwijkingen toegestaan. De indruk bestaat, dat in vele arbeidsruimten aan de zeker niet hoog te noemen eisen niet wordt voldaan.



24



26



D. Yaglou beval in 1956 voor het gebruik van de zgn. Wet Bulb Globe Thermometer (W.B.G.T.) de volgende formule aan:

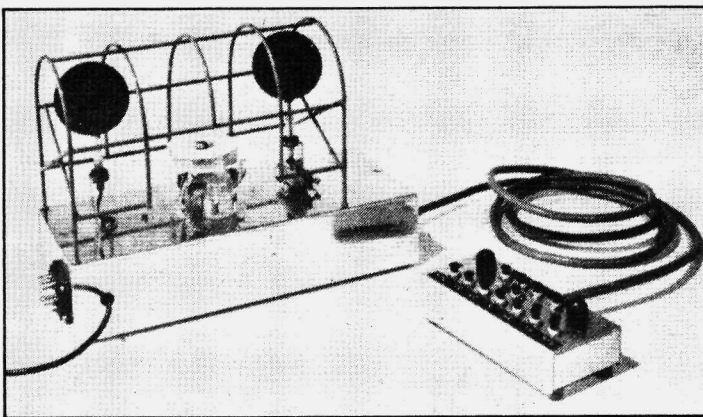
$$W.B.G.T. = 0,7 \times t_{in} + 0,2 t_{gl} + 0,1 t_l$$

In een door de Engelse Light Laboratories ontwikkeld instrument is het mogelijk de waarde van W.B.G.T. direct af te lezen, doordat in een elektrische schakeling alle klimaatgrootheden in juiste verhouding hun bijdrage leveren tot bovenste vergelijking (afb. 24). Uit een groot aantal waarnemingen, verricht door de Royal Naval Medical School, blijkt dat de berekende W.B.G.T. en de met het instrument afgelezen waarde zeer goed overeenstemmen, terwijl het verband tussen de gecorrigeerde effectieve temperatuur en de W.B.G.T. nagenoeg lineair is.

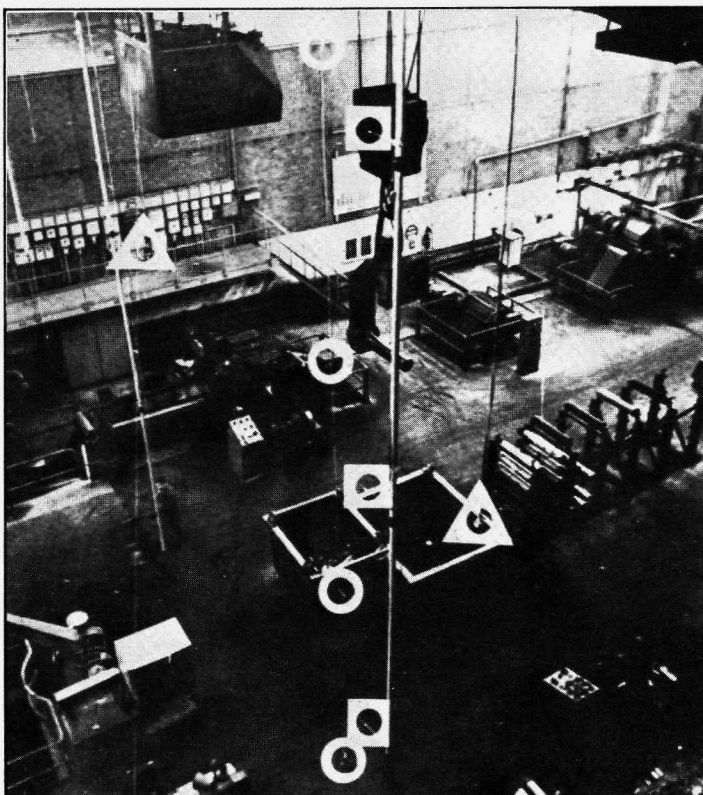
Een zeer praktisch instrument om het verband tussen behaaglijkheid en klimaat te bepalen is het eveneens in Engeland vervaardigde door de Building Research Station (thans: Building Research Establishment) door Webb ontwikkeld apparaat. Hierbij wordt de schaal van Bedford gehanteerd (7 veel te warm tot 1 veel te koud). Elke proefpersoon heeft het afgebeelde apparaat, waarmee de temperatuur, lichtsnelheid (verwarmde bol) en vochtigheid (psychrometer) op afstand kunnen worden geregistreerd (afb. 25). Op een akoestisch signaal drukt de proefpersoon op één van de 1 tot en met 7 genummerde toetsen om zijn warmtegevoel aan te geven (afb. 26).

Afbeelding 27 tenslotte toont de door het IG-TNO gebruikte apparatuur tijdens metingen in een fabriekshal, waarbij door montage aan de aanwezige kraan een totaalbeeld kon worden verkregen (vierkanten = anemometer, cirkels = temperatuur, driehoeken = luchtbemonstering) van het klimaat.

25



27



LITERATUUR

1. Klimaatregeling in woningen en werkruimten (1945)
Rapp. no. 1 Comm. voor de klimaatregeling in gebouwen
2. Het verrichten van klimaatmetingen
Ir. D. van Zuilen, Ir. G.G. Franke en H.J. Erkelens
Publ. no. 95 IG-TNO
Congrès International de Chauffage et Climatisation, 1958
3. Thermal Comfort
P.O. Fanger
Danish Technical Press, Copenhagen, 1970
4. A field assessment of a prototype meter for measuring the wet-bulb globe-thermometer index
J.D. Walters
Brit. J. Industr. Med., 1968, 25, 235
5. The nature of thermal comfort for sedentary man
F.H. Rohles Jr., R.G. Nevins
ASHRAE Research Report 2191 RP-43, 1971
6. An investigation into thermal comfort of office workers
M.A. Humphreys, J.F. Nicol
Journal of the Inst. of Heat. and Vent. Eng., 1970, 38, 181
7. Messungen von Raumluftgeschwindigkeiten in der Klimatechnik
W. Finkelstein e.a.
Heizung-, Lüftung-, Haustechnik, 1973, no. 2, 37
8. Das thermische Raumklima und seine Messung
Ing. G. Schlüter
Haustechnik Rundschau, 1973, no. 3, 77
9. Over behaaglijkheid
Prof. Dr. H. Baudet
Klimaatbeheersing 1973, no. 9

Praktijktoepassingen en ervaringen bij metingen aan klimaatinstallaties

door ir. G.G. Franke *)

1. INLEIDING

Alvorens een verwarmings- of luchtbehandelingsinstallatie in een gebouw aan de opdrachtgever wordt overgedragen, moet aan de hand van controlemetingen nagegaan worden of de diverse onderdelen van de installatie voldoen aan de specificatie, die bij het ontwerp via berekeningen is opgesteld.

Deze controlemetingen moeten verricht worden aan de gereed gekomen installatie. De bereikbare nauwkeurigheid bij deze metingen is minder goed dan die bij meetopstellingen in een laboratorium, waarvoor de volgende factoren zijn aan te geven.

- meetapparatuur met een grote meetnauwkeurigheid is vaak kwetsbaar en daarom niet geschikt voor praktijkmetingen. Er zal in het algemeen met een minder goede meetnauwkeurigheid genoegen moeten worden genomen;
- de meetsecties in een laboratoriumopstelling zijn zodanig aan te brengen dat de te meten grootheden zo homogeen mogelijk over de doorsnede verdeeld zijn (bijvoorbeeld homogene temperatuur- en/of snelheidsverdeling). In de praktijk is dit meestal niet mogelijk.

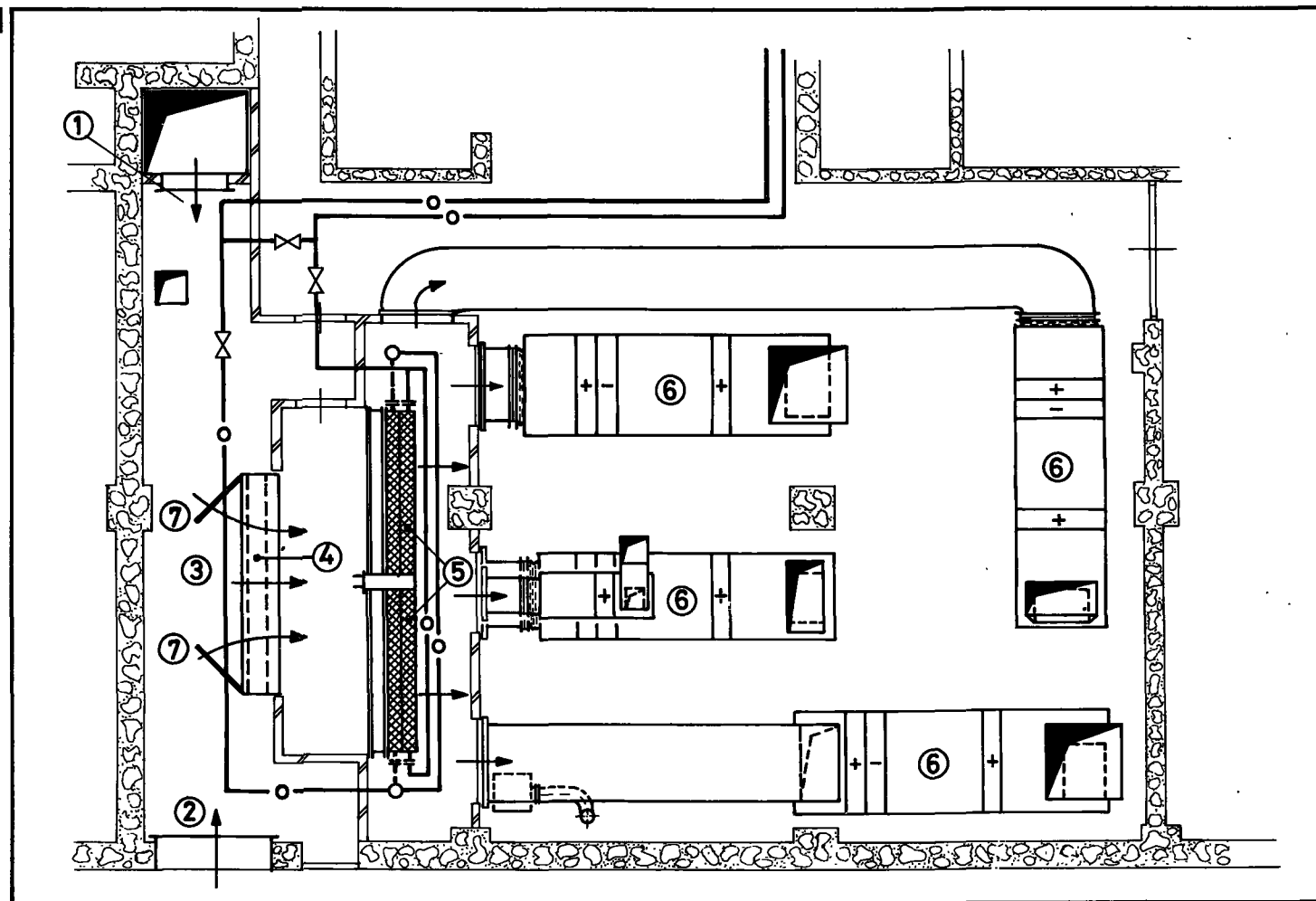
- in het laboratorium is het mogelijk een vrijwel stationaire toestand te bereiken, dat wil zeggen de te meten grootheden veranderen niet met de tijd. In de praktijk zijn de verschijnselen dynamisch.

Ten gevolge van deze factoren zullen bij praktijkmetingen de uit de metingen afgeleide grootheden zeker niet nauwkeuriger zijn dan op $\pm 10\%$.

Ondanks het feit, dat alle onderdelen van de installatie blijkens de controlemetingen aan de specificaties voldoen en aan de uitvoering de grootste zorg is besteed, kan het voorkomen, dat de installatie als geheel toch niet voldoet. Dit zal geïllustreerd worden met twee voorbeelden.

2. VOORBEELDEN, WAARBIJ DE INSTALLATIE ALS GEHEEL NIET VOLDOET.

2.1. Het eerste voorbeeld betreft een ventilatorkamer, waarin de centrale voorbehandeling en de nabehandeling per gevel van de primaire lucht ten behoeve van de inductie-apparaten in de vertrekken plaats heeft. De plattegrond van de ventilatorkamer is weergegeven in **afb. 1**. De afmetingen van deze kamer zijn 10,8 m breed, 16,2 m lang en 3,5 m hoog.



Door onderdruk in de mengkamer 3 wordt via het rooster 1 recirculatielucht aangezogen en door het rooster 2 verse buitenlucht. Het mengsel recirculatielucht-buitenlucht stroomt door het rolfilter 4 en de vrije koeler/luchtvoorverwarmer 5 naar de ruimte, waaruit de verschillende luchtbehandelingskasten 6 de benodigde lucht betrekken en nabehandelen (verwarmen, bevochtigen, naverwarmen, koelen).

De totaal verplaatste luchthoeveelheid bedraagt circa 60.000 m³/h (16,7 m³/s). Een thermostaat in de luchtstroom na het rolfilter moet er voor zorgen dat door regeling van de verhouding recirculatielucht/buitenlucht door middel van kleppensekties bij de aanzuigroosters de mengtemperatuur 5°C is. Bij buitentemperaturen hoger dan 5°C wordt 100% buitenlucht aangezogen. De hoeveelheid buitenlucht is minimaal 50% van de totale hoeveelheid.

Op deze wijze is de luchttemperatuur vóór de vrije koeler/luchtvoorverwarmer nooit lager dan 5°C.

Het water door de vrije koeler/luchtvoorverwarmer wordt door de door de koeler stromende lucht gekoeld tot minimaal 14°C. De koeler, welke hoog geplaatst is, is boven de vloer voorzien van een by-pass. Een thermostaat in het uit de koeler komende water regelt door middel van kleppen de verhouding van de hoeveelheden lucht door de koeler en door de by-pass. Zodra de koelmachine in bedrijf komt, stroomt de volledige luchthoeveelheid door de by-pass.

Het op deze wijze gekoelde water wordt in winterbedrijf gebruikt voor koeling van de secundaire lucht in de inductie-apparaten om interne warmte uit de vertrekken af te voeren.

In de koeler wordt de lucht meer of minder opgewarmd.

De in de afb. 1 aangegeven schotten 7 waren oorspronkelijk niet aanwezig. Hoewel aan de plaats van de thermostaten en aan de dimensionering van regelorganen de grootste aandacht was besteed, bleek bij winterbedrijf de installatie toch vreemde verschijnselen te vertonen. In sommige zó nes van het gebouw was de relatieve vochtigheid veel hoger dan in andere zó nes. Dit nam dusdanige vormen aan, dat in eerstgenoemde zó nes aanzienlijke condensatie op de ramen optrad.

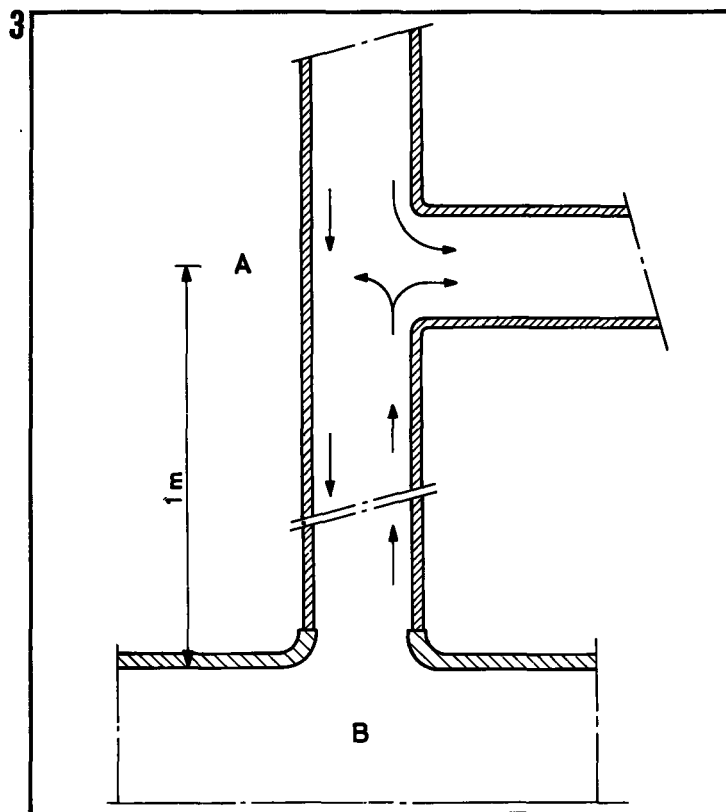
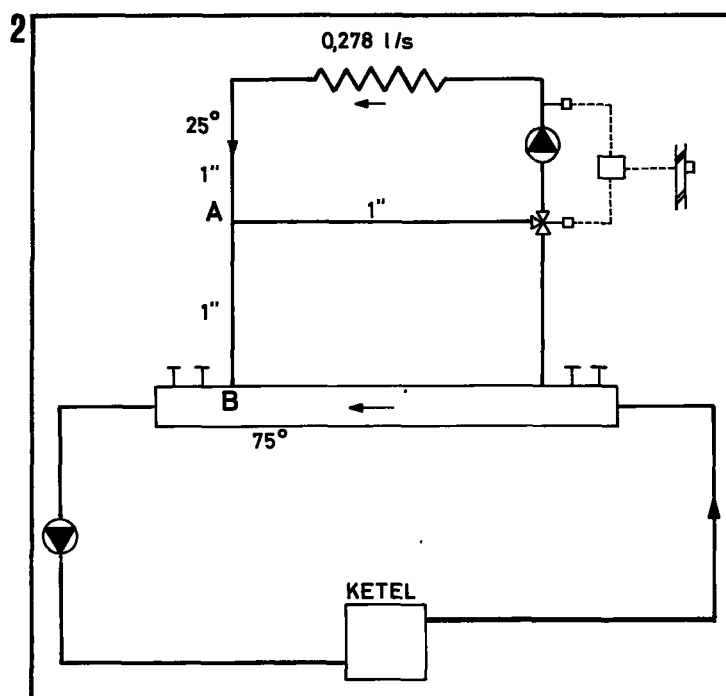
Bij nader onderzoek bleek dat er vrijwel geen menging van recirculatielucht en buitenlucht optrad ondanks de hoge snelheden in de toevoerroosters. (circa 4 à 5 m/s). De warme recirculatielucht schoof als het ware over de koude buitenlucht, waardoor na het filter gelaagdheid in de temperatuur van de lucht voorkwam (stratificatie). De koude lucht stroomde over de vloer, de warme lucht langs het plafond. Door deze temperatuurgelaagdheid werkte de centrale voorbehandeling van de primaire lucht en de nabehandeling in de luchtbehandelingskasten niet op de juiste wijze. Bovendien leidde dit ertoe dat enkele luchtbehandelingskasten voor een groot gedeelte recirculatielucht aanzogen.

Door het aanbrengen van de schotten 7, waarvan de juiste stand experimenteel is bepaald, werd een zodanige menging verkregen, dat de luchttemperaturen op verschillende hoogten na het filter niet meer dan 1°C verschilden en hiermede waren de problemen opgeheven.

2.2. Het tweede voorbeeld betreft een ketelcircuit, waarin een open verdelers/verzamelaar is opgenomen (afb. 2). Op de verdelers/verzamelaar zijn diverse groepen aangesloten, waarvan één groep in de afbeelding is aangegeven. Verondersteld wordt, dat deze groep geen warmte vraagt, zodat geen warm water via de driewegklep wordt bijgemengd.

In punt A is een watertemperatuur van 25°C aangenomen en in punt B (verzamelaar) van 75°C. Door dit temperatuurverschil zal tussen A en B een drukverschil ontstaan, waarbij water met een hoge temperatuur van B naar A zal stromen en zich met het circulerende water met lage temperatuur zal mengen (afb. 3). Er vindt dus toch warmtetoevoer naar deze groep plaats, hoewel dit niet gevraagd wordt en de regeling juist functioneert (regelafsluiter volledig gesloten).

Om een indruk te krijgen van de orde van grootte van deze warmtetoevoer is de situatie geïdealiseerd. Ter vereenvoudiging is aangenomen dat het water van B naar A stroomt door de halve doorsnede van deze leiding en deze vervangen wordt door een fictieve



tieve leiding met een diameter overeenkomend met de hydraulische diameter van de halve doorsnede van de oorspronkelijke leiding. Bij een lengte van de leiding AB van 1 m, zal tussen B en A bij de aangegeven temperaturen een drukverschil ontstaan van circa 220 Pa. Rekening houdend met de wrijvingsverliezen in de fictieve leiding en met de instroomverliezen bij B en aftakverliezen bij A zal bij benadering in A een hoeveelheid water ter grootte van 0,05 l/s met een temperatuur van 75°C worden bijgemengd. Bij een circulerende hoeveelheid van 0,278 l/s, waarvan 0,05 l/s van A naar B zal stromen, wordt de mengtemperatuur circa 34°C. hetgeen een niet gevraagde hoeveelheid warmtetoevoer naar het verwarmingslichaam tot gevolg heeft, waardoor oververwarming van de vertrekken ontstaat.

Deze natuurlijke waterstroming kan voorkomen worden door de leiding AB onder aan te sluiten op de verzamelaar via een syfon

(afb. 4). Het beschreven verschijnsel kan ook optreden bij gescheiden verdelers/verzamelaars, als hierop bijvoorbeeld boiler-groepen zijn aangesloten.

3. GARANTIEMETINGEN

In het voorgaande is reeds terloops genoemd het verrichten van controlemetingen aan de onderdelen van de installatie. Het gaat hierbij in feite om garantiemetingen van – in de meeste gevallen – de maximale capaciteit. Deze maximale capaciteit is in het ontwerp stadium berekend aan de hand van bepaalde ontwerpcondities. De garantiemetingen zouden dus uitgevoerd moeten worden onder condities, overeenkomend met de ontwerpcondities, doch dit is in de praktijk niet te realiseren. De metingen kunnen slechts uitgevoerd worden bij de heersende omstandigheden, waarbij de maximale capaciteit niet bereikt wordt.

Het doel van de garantiemetingen is aan te tonen, dat de opdrachtgever de installatie gekregen heeft, die hij nodig had. Uiteindelijk interesseert hem de installatie als zodanig veel minder dan het resultaat, dat er mede wordt bereikt. Extreem geformuleerd heeft hij ten behoeve van de gebruiker een binnenklimaat gekocht.

Op basis van zekere ruimtecondities is de installatie ontworpen. In de praktijk is het onmogelijk bij de oplevering door metingen aan te tonen, dat bij de ontwerpcondities van het buitenklimaat – extreme omstandigheden – de gewenste binnencondities worden behaald.

De vraag is hoe uit de garantiemetingen het bewijs kan worden geleverd, dat onder alle omstandigheden het gewenste klimaat wordt verkregen.

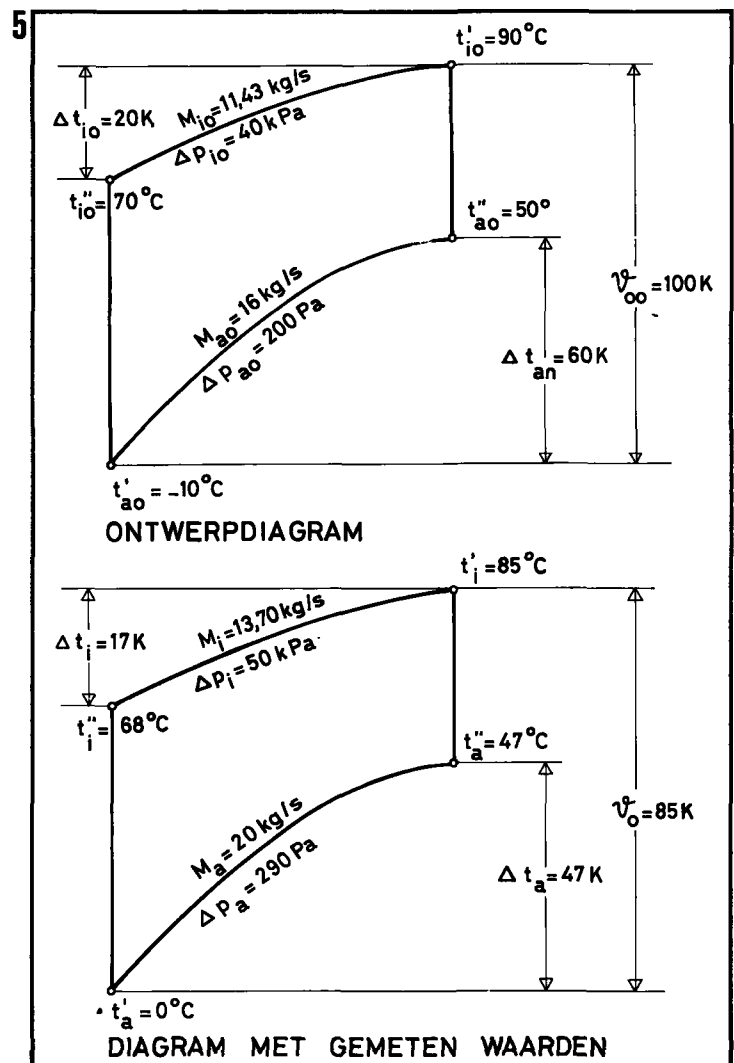
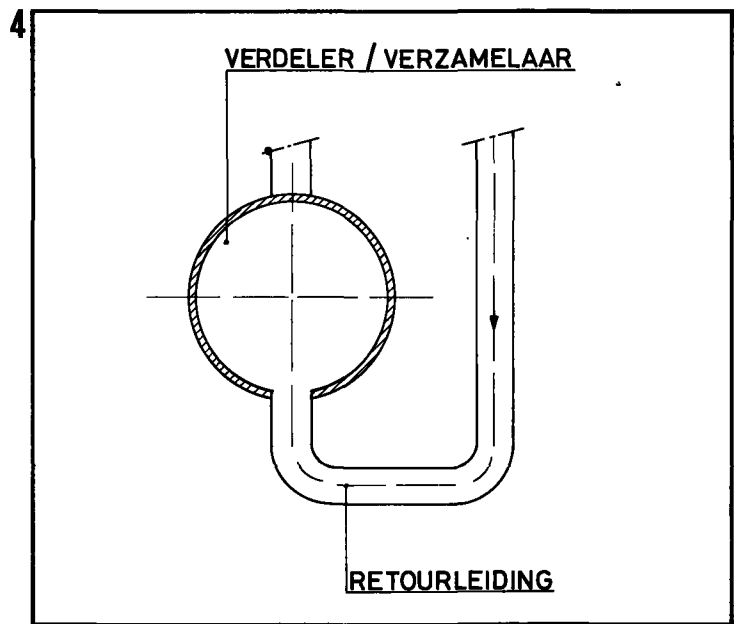
De garantiemetingen hebben betrekking op de capaciteit van verwarmingsketels, koelmachines, warmtewisselaars (luchtverwarmers, luchtkoelers) en op de capaciteit en (manometrische) opvoerhoogte van pompen en ventilatoren. Er bestaan – in hoofdzaak – buitenlandse normen (zie lijst van bestaande normen), waarin de meetmethoden en de nauwkeurigheid van de meetapparatuur zijn vastgelegd. De capaciteit van de eerstgenoemde groep apparaten wordt langs twee wegen bepaald bij gestandaardiseerde condities en de beide berekende capaciteiten mogen niet meer dan een zeker percentage van elkaar afwijken. Deze metingen zijn echter alleen mogelijk bij een proefstand in een laboratorium of bedrijf. Een methode om de gevonden capaciteiten om te rekenen op niet gestandaardiseerde omstandigheden wordt niet gegeven.

Ten aanzien van pompen en ventilatoren zijn de metingen van opvoerhoogte en capaciteit in mindere mate afhankelijk van de omstandigheden, waaronder gemeten wordt. Controle van het werkpunt op de Q, H-kromme verlangt, afhankelijk van de steilheid van de kromme bij het werkpunt, hetzij een nauwkeurige drukmeting, hetzij een nauwkeurige hoeveelheidsmeting.

Bij het meten van de drukken moet rekening worden gehouden met de inhomogeniteit van de druk over de doorsnede in bestaande installaties. Het meten van de hoeveelheid verplaatst medium zou kunnen geschieden door middel van een genormaliseerde meetflens, waarbij over een zekere lengte voor en na de meetflens een ongestoorde stroming wordt vereist. In de praktijk is dit laatste in de meeste gevallen niet aanwezig.

Op het gebied van warmtewisselaars is de situatie gunstiger. Door Eurovent (europese commissie van de fabrikanten van luchttechnische- en droogapparatuur) is een methode ontwikkeld, waarmee aan de hand van praktijkmetingen berekend kan worden of de warmtewisselaar aan de garantie voldoet (zie Eurovent document nr. 7/2, 1971). De methode zal door een voorbeeld verduidelijkt worden. Voor een uitgebreide afleiding van de methode wordt verwezen naar de literatuur (lit. 1 en 2). In de appendix I is de afleiding in verkorte vorm aangegeven.

Uitgegaan wordt van het temperatuurveranderingsgetal, dat gedefinieerd is als de verhouding van de temperatuurverandering van het medium met de kleinste warmtecapaciteit en het verschil van de intredetemperaturen van de beide media, die door de warmtewisselaar stromen. Voor luchtverwarmers is dit het opwarmgetal, voor luchtkoelers het afkoelgetal. In de eerste



plaats wordt dit getal berekend uit de in de praktijk gemeten waarden van de temperaturen en daarnaast uit de ontwerp-temperaturen van de warmtewisselaar (eerste berekening). Ook is een formule voor het temperatuurveranderingsgetal op te stellen, waarin een verband gelegd is tussen dit getal en de karakteristieke grootheden van de warmtewisselaar, zoals de grootte van de warmteoverdragende oppervlakken, de k-waarde, de massastromen van de beide media, en dergelijke. Aan de hand van de gegevens van de warmtewisselaar en de gemeten waarden

van de massastromen is het getal te berekenen onder de meetcondities. Tevens wordt deze berekening uitgevoerd voor de ontwerpcondities (tweede berekening).

Als nu de verhouding van het temperatuurveranderingsgetal behorende bij de gemeten temperaturen en van dat behorende bij de ontwerptemperaturen volgens de eerste berekening overeenkomt met de verhouding van de temperatuurveranderingsgetallen uit de tweede berekening, kan gesteld worden, dat de gemonteerde warmtewisselaar aan de ontwerpgegevens voldoet. Als voorbeeld is gekozen een warmtewisselaar, waarvan de ontwerpgegevens en de gemeten waarden in *afb. 5* zijn aangegeven.

De luchtverwarmer is ontworpen om 16 kg lucht/s op te warmen van -10°C naar 50°C met behulp van 11,43 kg water/s, dat afkoelt van 90°C naar 70°C. Het resultaat van de metingen is, dat 20 kg lucht/s wordt opgewarmd van 0°C naar 47°C door middel van 13,13 kg water/s, dat afkoelt van 85°C naar 68°C.

De berekeningen, aangegeven in de appendix I, tonen aan, dat de verhouding van het opwarmgetal bij de gemeten temperaturen tot dat bij de ontwerptemperaturen volgens de eerste berekening 0,922 bedraagt en dat de verhouding van de opwarmgetallen volgens de tweede berekening 0,930 is. Het verschil tussen de beide gevonden verhoudingen is circa 1%, zodat de luchtverwarmer aan de ontwerpgegevens voldoet.

De methode kan alleen worden toegepast in de gevallen, waarin bij de warmteoverdracht geen waterdamp op de warmtewisselaar kondenseert, dus bij luchtverwarmers en bij „droge“ luchtkoelers, doch niet bij „natte“ luchtkoelers.

Een nederlandse normcommissie is echter doende een norm op te stellen voor het beproeven van luchtkoelers, waarop condensatie van waterdamp of rijpvorming optreedt. Onderscheid wordt gemaakt in luchtkoelers ten behoeve van de airconditioning en ten behoeve van koel- en vriescellen. Voor het beproeven van luchtkoelers op het gebied van de airconditioning is de Amerikaanse norm aangehouden (ASHRAE Standard 33-64).

De beproeving geschiedt onder standaardcondities, doch er zal een hoofdstuk worden opgenomen, waarin een berekeningsmethode zal worden gegeven voor het omrekenen van de capaciteit bij de standaardcondities naar die bij andere condities.

Naast deze garantiemetingen van installatie-onderdelen zal de werking van de regelinstallaties onder verschillende omstandigheden moeten worden nagegaan.

4. GEWENSTE NAUWKEURIGHEID BIJ PRAKTIJKMETINGEN

Capaciteiten kunnen in het algemeen niet rechtstreeks gemeten worden, doch moeten berekend worden uit de gemeten waarden van een aantal grootheden, zoals bijvoorbeeld temperaturen en massastromen. De nauwkeurigheid, waarmee de capaciteit bepaald moet worden, legt de meetopstelling en de nauwkeurigheid van de meetapparatuur vast.

De nauwkeurigheid, die gesteld wordt, is individueel verschillend. Een afwijking ten opzichte van de volgens het ontwerp vereiste waarde, die de één toelaatbaar acht, zal door een ander te groot worden gevonden. Algemene regels zijn nog niet gangbaar. De nauwkeurigheid wordt uit diverse praktische overwegingen vastgesteld, zoals bijvoorbeeld uit het volgende blijkt.

Bij inductie-apparaten zou gesteld kunnen worden, dat de primaire luchthoeveelheid 10% van de gewenste waarde mag afwijken. Aan dit percentage kunnen de navolgende overwegingen ten grondslag liggen.

De genoemde variatie in de luchtverversing via de primaire lucht is door de aanwezige personen niet merkbaar.

De primaire lucht in combinatie met de secundaire lucht moet in de benodigde verwarming respectievelijk koeling voorzien.

De maximale verwarmingscapaciteit berust op de transmissieberekening, die geldt bij een buitentemperatuur van -10°C en waarin toeslagen zijn verwerkt. Het gelijktijdig voorkomen van een buitentemperatuur van -10°C en alle ongunstige factoren, waarvoor toeslagen zijn gegeven, is echter sporadisch. De warmtetoevoer naar het vertrek, die recht evenredig is met de luchthoeveelheid en die maximaal 10% te laag kan zijn, zal

slechts zelden tot een warmtetekort leiden.

Bij de koellast, waarbij op de berekening geen toeslagen worden toegepast, wordt echter uitgegaan van een hoge gelijktijdigheid van interne warmtebronnen en van een continue zonbelasting. Deze ongunstige situatie zal in het algemeen zelden voorkomen. Een primaire luchthoeveelheid, die 10% lager is dan de ontwerpwaarde, zal een tekort van circa 10% in de met het systeem af te voeren warmte veroorzaken.

Dit zal echter op een gering aantal dagen optreden.

Vertrekken, waarin volgens het ontwerp dezelfde hoeveelheid primaire lucht moet worden ingeblazen, kunnen na het inregelen van elkaar afwijkende hoeveelheden primaire lucht toegevoerd krijgen, waarbij de afwijkingen uiteraard binnen ± 10% liggen. Het gevolg hiervan kan zijn, dat verschillen in de luchttemperatuur in deze vertrekken bij de extreme buitencondities optreden. Deze verschillen bedragen dan 1 à 2°C.

Uit praktijkervaringen over een langere periode kan blijken, dat een afwijking in de luchthoeveelheid van 10% ten opzichte van de vereiste waarde nog toelaatbaar is.

Het instellen van de vereiste primaire luchthoeveelheid is via een hoeveelheidsmeting niet mogelijk. Uit gegevens van de fabrikant is bekend, welke voordruk bij de gewenste hoeveelheid vóór het inductie-apparaat nodig is. Bij een aangenomen nauwkeurigheid van de hoeveelheid van ± 10% zal door het kwadratische verband tussen hoeveelheid en druk de voordruk met een nauwkeurigheid van ± 20% moeten worden ingesteld.

In het algemeen moet dus aan de hand van praktische overwegingen de invloed worden nagegaan van de afwijking ten opzichte van de vereiste waarde op het gewenste klimaat en hieruit de toelaatbare afwijking vastgesteld. Uit het verband tussen de te meten grootheid en de daaruit af te leiden grootheden kan dan bepaald worden welke nauwkeurigheid de metingen moeten hebben.

5. SLOTWOORD.

Uit het voorgaande is het duidelijk geworden, dat ten aanzien van metingen en met name van garantiemetingen berekeningsmethoden ontwikkeld moeten worden om uit de in de praktijk gemeten waarden de gegarandeerde waarden af te leiden. De praktijkmetingen moeten genormaliseerd worden met opgave van de vereiste nauwkeurigheid bij het meten van de diverse grootheden. De installaties moeten zodanig uitgevoerd worden, dat de metingen verricht kunnen worden.

APPENDIX 1

Garantieberekening voor warmtewisselaars

De door Eurovent ontwikkelde berekeningsmethode voor warmtewisselaars heeft tot doel aan te tonen of een warmtewisselaar voldoet aan de specificaties, die bij het ontwerp zijn opgesteld. Daartoe moeten in de praktijk metingen van temperaturen en massastromen verricht worden onder omstandigheden, die af zullen wijken van de ontwerpcondities. Uit de gemeten waarden moet afgeleid worden of de warmtewisselaar aan de ontwerpcondities kan voldoen, als de daarbij behorende omstandigheden zich werkelijk voordoen.

Ingevoerd is het temperatuurveranderingsgetal \varnothing voor luchtverwarmers is dit het opwarmgetal en voor luchtkoelers het afkoelgetal. Dit getal is gedefinieerd als de verhouding van de temperatuurverandering van het medium met de kleinste warmtecapaciteit en het verschil van de intredetemperaturen van de beide media, dus

$$\varnothing = \frac{\Delta t_a}{\tau_o} \dots\dots\dots (1)$$

Δt_a = de verandering van de luchttemperatuur van intrede naar uittrede $t'_a - t''_a$ K

τ_o = het verschil van de intredetemperaturen van water en lucht $t'_i - t'_a$ K

Voor éézijdig geroerde kruisstroom geldt bovendien

$$\theta = \frac{1}{\tau} \left[1 - e^{-\tau(1-e^{-K})} \right] \dots \dots \dots (2)$$

Hierin is:

$$\tau = \text{de verhouding van de warmtecapaciteiten der media} = \frac{c_{pa} M_a}{c_{pi} M_i}$$

met c_p = soortelijke warmte (kJ/kg K)

M = massastroom kg/s

De indices a en i hebben betrekking op de media, respectievelijk stromend langs het uitwendig en inwendig oppervlak van de warmtewisselaar, in het algemeen dus op lucht respectievelijk water.

K = het kengetal van de warmtewisselaar, gedefinieerd als

$$K = \frac{k A_a}{c_{pa} M_a}$$

k = warmtedoorgangscoefficient (k = waarde) W/m²K

A_a = uitwendig (luchtzijdig) warmte overdragend oppervlak van de warmtewisselaar in m².

Uit de overgedragen warmte tussen water en lucht volgt:

$$Q = c_{pa} M_a \Delta t_a = c_{pi} M_i \Delta t_i \quad \text{kW}$$

dus $\frac{c_{pa} M_a}{c_{pi} M_i} = \frac{\Delta t_i}{\Delta t_a}$, waarmee $\tau = \frac{\Delta t_i}{\Delta t_a}$ wordt.

Uit de gemeten intrede- en uitredetemperaturen van water en lucht zijn de schijnbaar werkzame massastromen M' te berekenen volgens

$$\frac{M'_a}{M_a} = \left[\frac{T_a}{T_{ao}} \right]^{0,42} \quad \text{voor lucht en}$$

$$\frac{M'_i}{M_i} = \left[\frac{T_i}{T_{io}} \right]^{3,65} \quad \text{voor water}$$

T = gemiddelde absolute temperatuur K

De index O heeft betrekking op de ontwerpcondities.

Om na te gaan of de doorgemeten warmtewisselaar voldoet aan de ontwerpgegevens, wordt eerst de verhouding $\frac{\theta}{\theta_o}$ volgens de formule (1) berekend, uitgaande van de gemeten waarden en de waarden, gebruikt voor het ontwerp.

Vervolgens wordt dezelfde verhouding berekend volgens de formule (2), waartoe deze formule is omgewerkt tot

$$\frac{\theta}{\theta_o} = \frac{M'_i}{M_{io}} \cdot \frac{M_{ao}}{M'_a} \cdot \frac{1 - e^{-\tau_o \frac{M'_a}{M_{ao}} \frac{M_{io}}{M'_i} \left[1 - e^{-K_o \left[\frac{M_{ao}}{M'_a} \right]^{0,33}} \cdot f_k \right]}}{1 - e^{-\tau_o [1 - e^{-K_o}]}} \dots \dots \dots (3)$$

waarin f_k = warmtedoorgangsfactor is, gedefinieerd als

$$f_k = \frac{k}{K_o} \left[\frac{M_{ao}}{M'_a} \right]^{0,67}$$

k is hierin een onbekende, doch de formule is om te zetten in een formule met bekende gegevens en wel

$$f_k = \frac{1 + f_{ai} \left[\frac{\alpha_{ao}}{\alpha_{io}} + \frac{\alpha_{ao} \delta_p}{\lambda_p} \right]}{1 + f_{ai} \left[\frac{M'_a}{M_{ao}} \right]^{0,67} \left[\left[\frac{M'_i}{M_{io}} \right]^{0,33} \cdot \frac{\alpha_{ao}}{\alpha_{io}} + \frac{\alpha_{ao} \delta_p}{\lambda_p} \right]} \dots \dots \dots (4)$$

Hierin is

f_{ai} = verhouding van de uitwendige en de inwendige warmte-overdragende oppervlakte

α_{ao} = warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de luchtzijde W/m²K

α_{io} = warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de waterzijde W/m²K

δ_p = wanddikte van de pijp in m

λ_p = warmtegeleidingscoëfficiënt van het pijpmateriaal W/mK

Als de beide berekende waarden van $\frac{\theta}{\theta_o}$ ongeveer met elkaar overeenkomen, kan geconcludeerd worden, dat de doorgemeten warmtewisselaar voldoet aan de ontwerpcondities.

Als voorbeeld is nu gekozen een warmtewisselaar, waarvan de ontwerpgegevens en de gemeten waarden in **afb. 5** zijn aangegeven.

De luchtverwarmer is ontworpen om 16 kg lucht/s op te warmen van -10°C naar 50°C met behulp van 11,43 kg water/s, dat afkoelt van 90°C naar 70°C.

Uit deze gegevens volgt voor het ontwerp:

overgedragen hoeveelheid warmte

$$Q_o = c_{pa} M_{ao} = c_{pi} M_{io} = 960 \text{ kW}$$

opwarmgetal $\theta_o = \frac{\Delta t_{ao}}{\tau_o} = \frac{60}{100} = 0,6$ en $\tau_o = \frac{\Delta t_{io}}{\Delta t_{ao}} = \frac{20}{60} = 0,333$

Na het invullen van deze waarden in de formule (2) volgt $K_o = 1,11$

Bij het ontwerp is de gemiddelde watertemperatuur $T_{io} = 353\text{K}$ en de gemiddelde luchttemperatuur $T_{ao} = 293\text{K}$.

Uit de gemeten waarden volgt nu

Gemiddelde watertemperatuur $T'_i = 349,5\text{K}$

De schijnbaar werkzame massastroom wordt berekend uit

$$\frac{M'_i}{M_i} = \left[\frac{T'_i}{T_{io}} \right]^{3,65} = \left[\frac{349,5}{353} \right]^{3,65} = 0,964$$

of $M'_i = 0,964 \times 13,70 = 13,21 \text{ kg/s}$

De overgedragen hoeveelheid warmte $Q_i = 13,21 \times 4,2 \times 17 = 943,3 \text{ kW}$.

Gemiddelde luchttemperatuur $T'_a = 296,5\text{K}$

Schijnbaar werkzame massastroom

$$\frac{M'_a}{M_a} = \left[\frac{T'_a}{T_{ao}} \right]^{0,42} = \left[\frac{296,5}{293} \right]^{0,42} = 1,004$$

of $M'_a = 1,004 \times 20 = 20,08 \text{ kg/s}$

De overgedragen hoeveelheid warmte $Q_a = 20,08 \times 1,0 \times 47 = 943,8 \text{ kW}$, hetgeen overeenkomt met de warmteafgifte van het water.

Uit de gemeten temperaturen volgt met de formule (1) het

opwarmgetal $\theta = \frac{\Delta t_a}{\tau_o} = \frac{47}{85} = 0,533$ en dus $\frac{\theta}{\theta_o} = \frac{0,533}{0,6} = 0,922$.

Gebruik makend van de volgende gegevens van de luchtverwarmer met koperen pijpen

$$f_{ai} = 10, \quad \frac{\alpha_{ao}}{\alpha_{io}} = 0,015, \quad \frac{\alpha_{ao} \delta_p}{\lambda_p} = 0,8 \times 10^{-3}$$

en de berekende waarden

van $\frac{M'_a}{M_{ao}}$ en $\frac{M'_i}{M_{io}}$ geeft de formule (4) voor f_k de waarde 0,988.

De formule (3) geeft dan voor $\frac{\theta}{\theta_o}$ de waarde 0,93.

Het verschil tussen de beide gevonden waarden van $\frac{\theta}{\theta_o}$ is circa

1%, zodat de luchtverwarmer voldoet aan de ontwerpgegevens.

APPENDIX II

Overzicht van bestaande normen

Het overzicht is beperkt tot de normen in die landen, waarvoor in Nederland de meeste belangstelling zal bestaan.

1. Nederland

NEN 1048-II Ventilatoren. Garanties en beproeving
NEN 3005 Het meten van het debiet van vloeistof- en gasstromen in gesloten leidingen door middel van meetschijven.

2. Duitsland

DIN 1942 – Abnahmeversuche an Dampferzeugern (VDI-Dampferzeugerregeln)
DIN 1944 – Abnahmeversuche an Kreiselpumpen (VDI-Kreiselpumpenregeln)
DIN 1946 – Lüftungstechnische Anlagen (VDI-Lüftungsregeln) Blatt 1
DIN 1947 – Leistungsversuche an Kühltürmen (VDI-Kühlturmregeln)
DIN 4702 – Heizkessel, Blatt 2: Prüfregeln
DIN 4704 – Prüfung von Raumheizkörpern
DIN 4787 – Oelbrenner; Begriffe, Anforderungen, Bau, Prüfung
DIN 4788 – Gasbrenner; Begriffe, Anforderungen, Bau, Prüfung
DIN 8976 – Abnahmeversuche von Kältemaschinen
DIN 8977 – Leistungsprüfung von Kältemittel-Verdichtern
DIN 44567 – Elektrische Raumheizgeräte. Blatt 3: Prüfung
DIN 44568 – Elektrische Konvektionsheizgeräte. Blatt 3: Prüfung
DIN 1952 – VDI – Durchflus – Meszregeln
VDI 2044 – VDI – Ventilator – Regeln. Abnahme – und Leistungsversuche an Ventilatoren.
VDI 2045 – Abnahme – und Leistungsversuche an Verdichtern
VDI 2076 – Leistungsnachweis für Wärmeaustauscher
Eurovent – Dokumente Nr.
3/1 1970 – Abnahmeversuche an Trocknern
7/2 1971 – Leistungsnachweis für Wärmeaustauscher.
DKW Kältemaschinen – Regeln. Berechnungsunterlagen und Regeln für Leistungsversuche an Kältemaschinen und Kühlanlagen

3. Amerika

ASHRAE Standards
16–69 Method of testing for rating room air conditioners
58–65 Method of testing for rating room air conditioner heating capacity
40–61 Methods of testing for rating heat operated unitary air conditioning equipment for cooling
37–69 Methods of testing for rating unitary air conditioning and heatpump equipment
17–66 USA Standard method of testing for capacity rating of thermostatic refrigerant expansion valves
46–64 Standard for testing and rating non-residential warm air heaters
41–66 Standard measurement guide: section on temperature measurements, part I

33–64 Methods of testing for rating forced-circulation air cooling and air heating coils
52–68 Method of testing air cleaning devices used in general ventilation for removing particulate matter.
30–60 Methods of testing for rating liquid chilling packages
23–67 Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors
20–60 Methods of testing for rating remote mechanical draft air-cooled and evaporative condensers
22–61 Methods of testing for rating water-cooled refrigerant condensers
14–67 Methods of testing for rating positive displacement condensing units
25–68 Methods of testing for rating forced convection and natural convection air coolers for refrigeration
32–57 Methods of rating and testing bottled beverage coolers
24–61 Methods of testing for rating liquid coolers
35–66 Method of testing desiccants for refrigerant drying
63–68 Method of testing liquid-line refrigerant driers
36A–63 Method of determining sound power levels for room air conditioners and other ductless, through-the-wall equipment
36B–63 Method of testing for rating the acoustic performance of air control and terminal devices and similar equipment
Naast deze Standards van de ASHRAE is er nog een aantal, opgesteld door andere instanties; zie ASHRAE Guide and Data Book, chapter Codes and Standards.

4. England

British Standards
845 Code for acceptance tests for industrial type boilers and steam generators.
2619 Method of test and rating for steam-heated air-heater batteries.
3208 Methods of test and rating for hot-water air-heater batteries
848 Methods of testing fans for general purposes, incl. mine fans
2831 Methods of test for air filters used in air conditioning and general ventilation
1586 Methods for the testing of refrigerant condensing units
3122 Rating and testing of refrigeration compressors
1042 Methods for the measurements of fluid flow in pipes
599 Methods of testing pumps
1571 Acceptance tests for positive-displacement compressors and exhausters
2009 Code of acceptance tests for turbo-compressors and exhausters

LITERATUUR

1. Dokument Eurovent nr. 7/2: Leistungsnachweis für Wärmeaustauscher.
2. Bayer C. Diagramm zur Umrechnung von Leistungsdaten von Wärmeaustauschern auf veränderte Betriebsbedingungen. Gesundheits-Ingenieur 93 (1972), Heft 7, p. 193.