



# **Technische warmtegeleidingsmetingen : de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt van bouw- en isolatiematerialen**

<https://hdl.handle.net/1874/341875>

**TECHNISCHE WARMTE-  
GELEIDUNGSMETINGEN**

s.  
cht









TECHNISCHE WARMTEGELEIDINGSMETINGEN  
DE BEPALING VAN DE WARMTEGELEIDINGSCOËFFICIËNT VAN BOUW-  
EN ISOLATIEMATERIALEN

RIJKSUNIVERSITEIT UTRECHT



1293 5122

*Agw 192 1939*

# TECHNISCHE WARMTE- GELEIDINGSMETINGEN

DE BEPALING VAN DE WARMTE-  
GELEIDINGSCOËFFICIËNT VAN  
BOUW- EN ISOLATIEMATERIALEN

## PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN  
DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE  
AAN DE RIJKS-UNIVERSITEIT TE UTRECHT  
OP GEZAG VAN DEN RECTOR MAGNIFICUS  
DR. TH. M. VAN LEEUWEN, HOOGLEERAAR IN DE  
FACULTEIT DER GENEESKUNDE, VOLGENS BE-  
SLUIT VAN DEN SENAAAT DER UNIVERSITEIT  
TEGEN DE BEDENKINGEN VAN DE FACULTEIT  
DER WIS- EN NATUURKUNDE TE VERDEDIGEN  
OP MAANDAG 8 MEI 1939, DES NAMIDDAGS TE 4 UUR

DOOR

HENDRIK JACOB HAMAKER

GEBOREN TE BROEK OP LANGENDIJK



1939

DRUKKERIJ Fa. SCHOTANUS & JENS, UTRECHT

BIBLIOTHEEK DER  
RIJKSUNIVERSITEIT  
UTRECHT





## VOORWOORD.

Bij het voltooiën van dit proefschrift is het mij een behoefte mijn groote erkentelijkheid uit te spreken jegens allen, die tot mijn wetenschappelijke vorming en de ontwikkeling van mijn technisch-wetenschappelijken arbeid in de Warmte-Stichting hebben bijgedragen.

Aan het Bestuur van de Warmte-Stichting breng ik gaarne langs dezen weg dank voor het steeds in mij gestelde groote vertrouwen.

Hooggeleerde Ornstein, hooggeachte promotor, de vriendschappelijke belangstelling en de stimuleerende invloed, die ik steeds, zoowel in Uw laboratorium als daarbuiten, van U mocht ondervinden, zal ik ten allen tijde dankbaar gedenken. Groote bewondering gevoel ik voor den kameraadschappelijken geest, waarin gij vaak heterogene elementen tot één werkende gemeenschap weet te vereenigen. Het is mijn innige overtuiging, dat de hieruit voortkomende vreugde van den arbeid de wetenschappelijke prestaties van Uw leerlingen in belangrijke mate ten goede komt.

Beste Van der Held en Mulder, steeds zal ik in dankbaarheid terugdenken aan de vriendschappelijke en hulpvaardige samenwerking van jullie ondervonden. Ik acht het daaraan toe te schrijven, dat onze gezamenlijke arbeid in de Warmte-Stichting de laatste jaren zeer vruchtdragend is geweest.

Waarde Van Buuren, ik ben je dankbaar voor je hulp bij de laatste experimenten voor de voltooiing van dit proefschrift.

---



## HOOFDSTUK I.

### ALGEMEENE INLEIDING.

#### § 1. Probleemstelling.

Reeds sedert zeer lang bestaat in de praktijk de behoefte aan betrouwbare gegevens omtrent de warmtegeleiding in de meest uiteenloopende materialen. In de bouwkunde is men zich in het bijzonder in de periode na negentienhonderd ook gaan bezighouden met de constructie van (bouw)onderdeelen met hooge warmte-isoleerende eigenschappen. In dit verband werd opnieuw aandacht besteed aan de vraag naar een betrouwbare methode om de warmtegeleiding van materialen vast te stellen.

In de loop der jaren zijn hiervoor door vele onderzoekers onderzoeksmethoden ontwikkeld, die zich in hoofdzaak onderscheiden naar de vorm, waarin het te onderzoeken materiaalmonster wordt gebracht. Aldus onderscheidt men o.a. een vlakke methode, een cilindrische methode en een bolvormige methode.

Voor bouwmaterialen, die uit hoofde van hun uiteindelijke bestemming in het algemeen vlak zijn, komt speciaal de vlakke methode in aanmerking. Het is deze methode in zijn verschillende uitvoeringsvormen, waaraan het hierna volgende is gewijd.

Indien men de beide oppervlakken van een vlakke homogene plaat (materiaal) onderling verschillende temperaturen  $\Theta_1$  en  $\Theta_2$  ( $\Theta_1 > \Theta_2$ ) geeft, die constant worden gehouden, dan verlopen alle isotherme vlakken parallel aan de beide eindoppervlakken, terwijl de warmtestroom zal zijn gericht loodrecht op deze vlakken. Experimenteel kan men nu gemakkelijk vaststellen, dat de hoeveelheid warmte, die in een zekere tijd door een materiaaldeel — parallel aan de stroomrichting uit de beschouwde plaat genomen — zal

stroomen, evenredig is met het verschil in temperatuur tusschen de oppervlakken der plaat ( $\theta_1 - \theta_2$ ) en omgekeerd evenredig is met de dikte der plaat.

Dit experimenteel geconstateerde feit vormt de basis voor de mathematische beschrijving der warmtegeleidingsverschijnselen.

Stelt  $dq$  de hoeveelheid warmte, stroomende in de tijd  $dt$  door een oppervlakte-element  $df$  van de beschouwde plaat, voor en nemen wij de positieve  $x$ -richting in de richting van de warmtestroom, dan geldt de bekende vergelijking:

$$dq = -\lambda \frac{\delta \theta}{\delta x} \cdot df \cdot dt \quad (1)$$

Hierin is  $\lambda$  de evenredigheidsfactor, die men de warmtegeleidingscoëfficiënt noemt. In technische eenheden is de dimensie van de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\frac{\text{kcal}}{\text{m.h.}^\circ\text{C.}}$ <sup>1)</sup>. De grootte van  $\lambda$  is afhankelijk van de eigenschappen en van de temperatuur van het beschouwde materiaal. In de mathematische beschrijving van warmtegeleidingsverschijnselen, zoowel als bij de experimenteele bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt, onderstelt men, dat deze voor een homogene materiaallaag constant, dus onafhankelijk van de temperaturen is.

De aldus gedefinieerde warmtegeleidingscoëfficiënt is enerzijds een materiaalconstante, die het mogelijk maakt de warmteïsoleerende werking van verschillende materialen onder gelijke omstandigheden met elkaar te vergelijken, en die anderzijds als gegeven kan dienen bij het berekenen van de warmtegeleidingsverschijnselen, die in samenstellingen van verschillende materialen zullen optreden.

Bij het onderzoek van homogene vlakke materiaalmonsters ter bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt tracht men de bovenstaande conditie, dat de temperaturen van de beide begrenzende oppervlakken constant zijn, zoo goed mogelijk te verwezenlijken.

<sup>1)</sup> In C.G.S.-eenheden is de dimensie van  $\lambda$   $\frac{\text{cal.}}{\text{cm sec.}^\circ\text{C.}}$

$$360 \frac{\text{k cal.}}{\text{m.h.}^\circ\text{C.}} = 1 \frac{\text{cal.}}{\text{cm sec.}^\circ\text{C.}}$$

Men kan dan de vergelijking (1) voor een dergelijk materiaalmonster schrijven in de vorm:

$$q = \lambda \cdot \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{l} \cdot f. \quad (2)$$

waarin  $q$  de hoeveelheid per tijdseenheid door het materiaal stroomende warmte voorstelt en  $l$  de dikte van de materiaallaag aangeeft.

Alle in de loop der jaren door verschillende onderzoekers ter bepaling van  $\lambda$  voor vlakke homogene materiaalmonsters uitgedachte methoden, berusten op dit principe. De onderlinge verschillen zijn slechts gelegen in de wijze van verwezenlijking der constante en gelijkmatige temperaturen aan de oppervlakte, in de meting van  $q$  en van het verschil  $(\theta_1 - \theta_2)$  en tenslotte in de bouw van de proeven.

Ook van niet homogene materialen, d.w.z. van materialen bestaande uit verschillende meer of minder fijn verdeelde, dooréengemengde bestanddeelen, als b.v. poreuze steensoorten of plaatvormige bouwsegmenten van vasten vorm, bestaande uit korrels met een bindmiddel aaneengekit, kan op de in het voorgaande aangegeven wijze een warmtegeleidingscoëfficiënt vastgesteld worden. Deze geeft slechts dan een als gemiddelde voor de onderzochte materiaalsamenstelling geldende waarde aan, indien zoowel bij de toepassing in de praktijk als bij het onderzoek in het laboratorium de afmetingen van het materiaal van dien aard zijn, dat de toevallige rangschikking der korrels van het eene bestanddeel ten opzichte van elkaar en van die van het andere bestanddeel geen merkbare invloed meer heeft op de warmtegeleidingseigenschappen van de laag als geheel beschouwd. De voor dergelijke inhomogene materialen geldende gemiddelde waarde van  $\lambda$  noemt men de aequivalente warmtegeleidingscoëfficiënt.

## § 2. Historisch overzicht.

Thans moge een overzicht volgen over de voornaamste methoden voor het onderzoek naar de warmtegeleiding van vlakke materialen, die sedert het begin van de vorige eeuw zijn toegepast en dit ten deele nog steeds worden. Wij trachten hiermede eenig inzicht te

geven in de verschillende moeilijkheden, die voor het verkrijgen van betrouwbare resultaten moeten worden overwonnen.

In de eerste helft van de negentiende eeuw trachtte *Fourier* (1)<sup>1)</sup> de aequivalente warmtegeleidingscoëfficiënt van vlakke materiaalmonsters te bepalen door deze (zie fig. 1 bij m) te plaatsen op de vlakke bovenzijde van een vat (s), waarin stoom van bekende temperatuur werd geleid, terwijl op het materiaal een kegelvormig vat, gevuld met kwik (Hg), rustte, dat van onderen was afgesloten met zeemleer (z) en waarin een thermometer (t) stak. Na bereiken van het evenwicht werd de temperatuur van de in het kwik stekende thermometer afgelezen. Dan werd de proef herhaald, terwijl het kwikvat direct op het stoomreservoir stond.

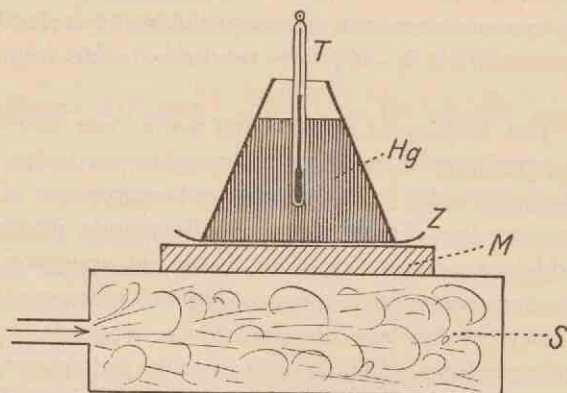


Fig. 1.

Uit het resultaat van beide metingen, waarbij de warmteafgifte van het kwikvat aan de omgeving uit de temperatuur van het kwik werd berekend, werd dan de warmtegeleidingscoëfficiënt voor het beschouwde materiaal bepaald. Daar hierbij de temperatuur van het kwik overal gelijk en de isotherme vlakken in het onderzochte materiaal evenwijdig aan onder- en bovenzijde van het monster werden ondersteld, terwijl bovendien de berekening der warmteafgifte van het kwikvat niet voldoende nauwkeurig is, zijn de door *Fourier* verkregen resultaten zeker onjuist.

<sup>1)</sup> De tusschen haakjes geplaatste nummers verwijzen naar de litteratuuropgave op blz. 71.

In 1841 publiceerde Péclet (2) een dergelijke methode voor bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt. Hij bracht een schijf van het te onderzoeken materiaal aan als bodem in een cylinder van slecht geleidend materiaal. In de cylinder werd water van gegeven temperatuur gebracht en met een roerinstallatie in beweging gehouden, terwijl de bodem van de cylinder werd gehouden in stoom van ongeveer 100° C. Als temperatuurverschil over de te onderzoeken schijf van het materiaal werd het verschil in temperatuur tusschen water en stoom aangenomen. De hoeveelheid doorstroomende warmte werd uit de temperatuurstijging van het water bepaald. Naast de fouten der methode van Fourier wordt op deze wijze bovendien nog de zeer sterke invloed van het in het materiaal geabsorbeerde vocht verwaarloosd, zoodat ook de langs deze weg, o.a. van verschillende poreuze keramische materialen, bepaalde warmtegeleidingscoëfficiënten als onjuist moeten worden beschouwd. Péclet vond voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van lood ongeveer  $\frac{1}{3}$  van de later nauwkeurig bepaalde waarde.

Omstreeks dezelfde tijd beperkte men zich elders tot het zoeken naar methoden ter vergelijking van de warmtegeleiding van diverse materialen.

Men bracht hiertoe b.v. een warmtebron in een kubusvormige omhulling van een te beoordeelen materiaal en vergeleek nu voor verschillende materialen de na verloop van tijd binnen de omhulling ontstane temperatuurverhooging ten opzichte van de temperatuur buiten de kubus, indien men de warmtebron steeds dezelfde energie toevoerde en de wanddikte der omhulling steeds gelijk koos. Ook vergeleek men wel de energieën, noodig om op deze wijze steeds hetzelfde temperatuurverschil tusschen het inwendige van de kubus en haar omgeving te verkrijgen.

J. Tyndall (3) sneedt uit verschillende materialen een kubus, die hij aan één zijde verwarmde met een electricch verwarmd kwikbad, terwijl hij aan de tegenoverliggende zijde met een thermoelement de temperatuur mat. Hij vond zoo o.a. dat de warmtegeleiding van hout verandert met variatie der richting van de warmtestroom t.o.v. van de vezelrichting.

L. Graetz (4) en later ook M. Heyberger (5) hebben overzichten over een groot aantal van dergelijke onderzoekingen gegeven.



Niet alleen geven metingen van deze soort slechts vergelijkingsgegevens, doch bovendien spelen in de verkregen resultaten nog een aantal variabele factoren een rol, zoodat het wel vast staat, dat geen zuiver inzicht in de verhouding der warmtegeleidings-eigenschappen van de onderzochte materialen werd verkregen.

Dank zij de matige resultaten dezer vergelijkingsmethoden en de verdere ontwikkeling der theorie van de warmtegeleiding, kwam men langzamerhand tot andere en reeds belangrijk verbeterde methoden om de warmtegeleidingscoëfficiënt in absolute waarde te bepalen.

In 1897 publiceerde Ch. H. Lees (6) een uitvoerige beschrijving met vele resultaten van een door hem uitgedachte en gebruikte methode van onderzoek.

Hij plaatste een cirkelvormig materiaal-monstertje van 4 cm diameter tusschen twee koperen schijven, waarvan één bestond uit twee lagen koper met een er tusschen aangebrachte elektrische verhitter. Deze stapel van eenige centimeters dikte werd, te zamen gebonden met een zijden snoer, verticaal opgehangen in een luchtbad, dat zoo goed mogelijk op constante temperatuur werd gehouden door een dubbele wand, waarin water van constante temperatuur kon circuleeren. In elke koperen schijf was een thermoëlement aangebracht om de temperatuur te bepalen. Behalve deze temperaturen werd de totale hoeveelheid aan de elektrische verhitter toegevoerde energie gemeten. Lees nam aan, dat de warmteafgifte van elk deel van het oppervlak der stapel aan de omgevende lucht en wanden door één en dezelfde constante te beschrijven is en kon dan uit de waargenomen energie, temperaturen en schijfdikten zoowel de warmtegeleidingscoëfficiënt als de constante voor de warmteafgifte van het oppervlak aan de omgeving berekenen. Behalve de onjuiste onderstelling omtrent de gelijkheid van de warmteafgifte van alle deelen van het oppervlak der stapel, ook al werd het geheel met een gelijkmatige vernislaag bedekt, werd bovendien in de berekening ten onrechte in het onbekende materiaal een warmte strooming uitsluitend parallel aan de as van de stapel ondersteld. Lees vond voor een aantal materialen een afname van de warmtegeleidingscoëfficiënt met stijgende temperatuur. Latere nauwkeuriger metingen bewezen, dat dit niet juist is.

Een jaar later publiceerde F. M. Focke (7) in Duitschland een analoge methode.

Een werkelijke verbetering beteekende de in de jaren 1905 en 1906 door Nusselt (8) ontwikkelde methode ter bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt, die ook thans nog in vrijwel ongewijzigde vorm als een betrouwbare en eenvoudige methode wordt toegepast.

Hij maakte gebruik van een plaatijzeren bol van ongeveer 70 cm diameter, waarin centraal een roodkoperen bol met een diameter van 15 cm is aangebracht, die inwendig is voorzien van een elektrische verhitting. De ruimte tusschen deze beide concentrische bollen wordt gevuld met het te onderzoeken materiaal. Uit de hoeveelheid per tijdseenheid aan de verhitter toegevoerde energie en het met thermoëlementen gemeten radiale temperatuurverval in het te onderzoeken materiaal, is dan de warmtegeleidingscoëfficiënt te berekenen. Deze methode, die voor vormlooze materialen (bv. zand) zeer bruikbaar is, geeft echter bij het onderzoek van vaste stoffen, die slechts in bepaalde vorm verkrijgbaar zijn, moeilijkheden, daar de bol niet homogeen is te vullen. Ook al wordt zorg gedragen, dat de afzonderlijke stukken in de bol goed op elkaar passen, toch zal steeds tusschen elke twee tegen elkaar sluitende stukken een, de temperatuurverdeling beïnvloedende afscheiding blijven bestaan. Bovendien is het vullen van een dergelijke bol met passende vlakke materiaalstukken een zeer omvangrijk en tijdroovend werk.

Om deze redenen ontwikkelde Gröber (9) in 1910 een methode voor onderzoek van vlakke materiaalmonsters. Hij maakte gebruik van een cirkelvormige elektrische verhitter met een diameter van 40 cm, bestaande uit twee messingplaten, waartusschen een spiraalvormig gewonden verhittingsdraad was aangebracht. Deze verhitter werd geplaatst tusschen twee schijven van het te onderzoeken materiaal, beide van gelijke dikte. Tegen deze monsterschijven werden wederom metaalplaten gebracht, die aan hun vrije oppervlak waren voorzien van waterkoeling. Dit geheele pakket werd dan rechtstandig geplaatst in een omhulling van fijne kurkkorrels. Nadat zich bij constante elektrische verhitting een constante temperatuurverdeling had ingesteld, werden de voor de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt benodigde gegevens verzameld door meting van de aan de verhitter toegevoerde elektrische energie en door meting van de temperaturen van de, de

beide monsterschijven begrenzende, metaalplaten met behulp van thermo-elementen.

Hoewel deze methode in principe nog steeds wordt gebruikt in diverse laboratoria, is toch de uitvoering en vorm van de apparatuur in latere jaren nog gewijzigd. In het licht van hetgeen tegenwoordig aangaande de meting van de warmtegeleiding in homogene materialen bekend is, valt wel in de eerste plaats op, dat ongetwijfeld in de cirkelvormige stapel een radiale warmtestroom zal optreden, waardoor een bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt op grond van de eenvoudige berekening met formule (2) geen juist resultaat kan geven. Ook de spiraalvormige verhitterwikkeling kan oorzaak zijn voor een in het centrum der schijven niet geheel homogene temperatuurverdeling.

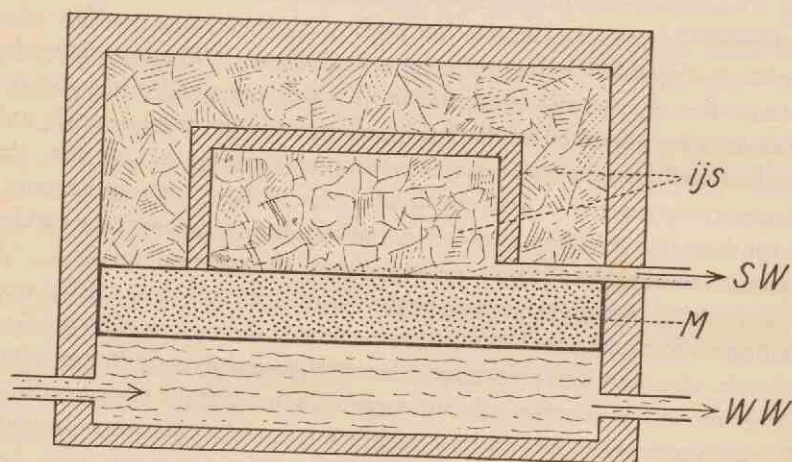


Fig. 2.

Terzelfder tijd publiceerde in Frankrijk Biquard (10) een beschrijving van een door hem ontwikkelde methode voor onderzoek van vlakke materiaalmonsters (fig. 2). Hij maakt evenwel als warmtebron gebruik van warm water (ww), dat de onderzijde van het te onderzoeken materiaal (m) verwarmde, terwijl de bovenzijde op constante temperatuur werd gehouden door er een vat, met ijs gevuld, op te plaatsen. Rondom het vat met ijs werd nog een brede ring van ijs aangebracht met het doel om in het centrale deel der te onderzoeken materiaalschijf een radiale warmtestroom te voor-

komen. Gemeten werden de hoeveelheid per tijdseenheid in het centrale vat ontstaan smeltwater (sw) en door middel van een horizontaal tusschen de materiaalschijf en het warmwatervat aangebracht thermo-element de temperatuur van de warme zijde van het te onderzoeken materiaalmonster. De temperatuur van de bovenzijde van het te onderzoeken materiaal werd ondersteld  $0^{\circ}$  C. te zijn.

Deze onderstelling is evenals die, dat de isotherme oppervlakken geheel vlak zijn en parallel aan de begrenzingsvlakken verlopen aanleiding voor het optreden van fouten in het eindresultaat. Toch zijn de uitkomsten van de metingen van *Biquard* voor de praktijk in veel gevallen reeds zeer wel bruikbaar, omdat de nog optredende fouten niet meer aanzienlijk zijn. Dat de fouten betrekkelijk gering zijn, is deels te danken aan het gebruik van een beschermende ring met smeltend ijs rondom het eigenlijke meetapparaat, terwijl ook de verwarming over een oppervlak, dat gelijk aan de som van dat van het meetvat en de schutring is, gunstig werkt. Deze ringvormige randbescherming, waarvoor de temperatuurcondities zoo na mogelijk gelijk zijn aan die, welke optreden in het feitelijke meetgedeelte van de monsterschijf, werd door *Biquard* voor het eerst toegepast en is bij latere nauwkeuriger methoden steeds gehandhaafd.

Eveneens omstreeks 1910 hielden eenige Engelsche onderzoekers zich bezig met het bepalen van de warmtegeleidingscoëfficiënt van verschillende materialen. De voornaamste onder hen zijn *Bacon* en *Randolph* (11), die beide gebruik maakten van een elektrische verhitter en een calorimeter met watercirculatie, waartusschen de te onderzoeken schijf werd geplaatst. Beide brachten, rondom hun opstelling een rand van isolatiemateriaal aan, waarvoor zij vilt gebruikten. De bepaling van de hoeveelheid per tijdseenheid door de materiaallaag stroomende warmte geschiedt door middel van een meting van de temperatuurstijging van het in de calorimeter circuleerende water. Zij geeft aanleiding tot onnauwkeurigheden, o.a. omdat de hoeveelheid per tijdseenheid door slecht geleidende materialen stroomende warmte zeer gering is.

In het algemeen gesproken kan men zeggen, dat bij alle tot nu toe besproken methoden voor onderzoek van vlakke materiaalmonsters te weinig aandacht is besteed aan het nauwkeurig meten

van het temperatuurverval over de te onderzoeken materiaallaag, hetzij doordat men eenvoudig aanneemt, dat de temperatuur van een oppervlak der monsterschijf gelijk is aan die van de inhoud van een erop geplaatste calorimeter of dergelijke, hetzij doordat men de thermo-elementen voor de meting der oppervlaktetemperaturen van het te onderzoeken materiaal niet met voldoende inzicht in de mogelijke fouten heeft aangebracht.

In 1912 publiceerde R. Poensgen (12) een uitvoerige beschrijving van de door hem ontworpen en gebezigde werkwijze. Hoewel hierin later door andere onderzoekers nog kleine wijzigingen werden aangebracht, wordt de slechts weinig gewijzigde methode van Poensgen thans nog in vele laboratoria onder de benaming „methode-Poensgen” toegepast.

Opvallend is het, dat de ontwerper, die voortbouwde op hetgeen Gröber eerder deed, de cirkelvorm heeft laten varen en daarvoor in de plaats een vierkante vorm heeft gekozen. Wij kunnen slechts gissen naar de redenen hiervoor en zouden dan het vermoeden willen uitspreken, dat vele materialen gemakkelijker in vierkante, dan in ronde vorm te verkrijgen zijn. Ook is het mogelijk, dat de temperatuurstoring in het centrum van een als spiraal gewikkelde cirkelvormige verhittingsdraad een reden is geweest om de ronde vorm te verlaten. In één der volgende hoofdstukken zullen we echter zien, dat ook een cirkelvormige verhitter zonder bezwaar kan worden gebruikt en zelfs voordeelen biedt, mits men geen spiraalvormige wikkeling toepast.

In figuur 3 is het apparaat van Poensgen schematisch afgebeeld. Men ziet hieruit allereerst, dat terwille van een gemakkelijke meting van de door het te onderzoeken materiaal stroomende hoeveelheid warmte de symmetrische opstelling is gekozen met geheel gelijke materiaalmonsters (M) ter weerszijden van de elektrische verhitter. Om de geheele door de eigenlijke verhitter (V) ( $450 \times 450$  mm) verbruikte energie als warmtestroom in rekening te kunnen brengen is, ter voorkoming van zijdelingsche warmteverliezen, ook hier een randverhitter (R) toegepast. De koelplaten (K) aan de koude zijde van elk materiaalmonster strekken zich ook over de randverhitter uit.

De isolatie (I) tusschen koelplaat en randverhitter wordt vaak willekeurig genomen. De koelplaten worden met koud water, uit

een speciaal reservoir met constante snelheid toestroomend, op lage temperatuur gehouden.

De verhitte (V) van Poensgen bestond uit een vlechtwerk van constantaan-draad en asbestgaren aan weerskanten afgedekt met een plaat asbest van 3 mm en een plaat koper van 1 mm dikte.

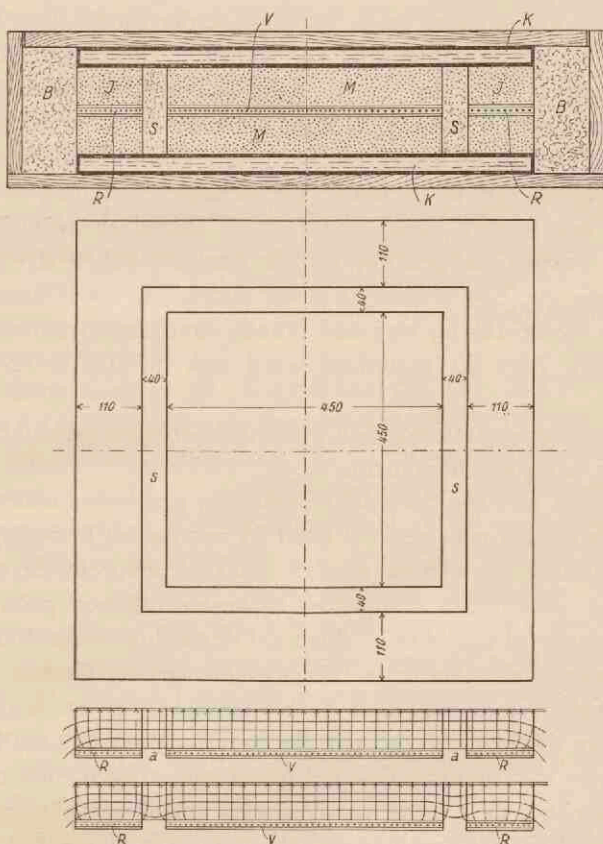


Fig. 3.

De temperatuur van deze koperen platen en van de koelplaten werd met thermoelementen gemeten, waarbij ervoor zorg gedragen was, dat de thermoelementdraden over eenige lengte langs het vlak der platen liepen om zeker te zijn, dat geen fout in de gemeten temperatuur kon optreden ten gevolge van de warmtegeleiding langs de

draden. Aangezien de koelplaten over hun geheele oppervlak dezelfde temperatuur hebben, is het mogelijk de energietoevoer van de randverhitter zoodanig te regelen, dat overal op gelijke hoogte in het monster en de randisolatie (I) dezelfde temperatuur heerscht. Deze instelling van de randverhitter wordt gecontroleerd met behulp van eenige thermoelementen, die op daartoe geschikte plaatsen van de rand van het monster en de binnenkant der randisolatie zijn aangebracht. De goede aansluiting van verhitter en koelplaten aan het te onderzoeken materiaal wordt verkregen door de beide monsters zoo vlak mogelijk te slijpen en tusschen deze en de verhitter eenerzijds en de koelplaten anderzijds een weinig van hetzelfde materiaal in poedervorm aan te brengen. De geheele opstelling wordt geplaatst in een houten doos, waarvan het deksel en de bodem door klemmen worden aangedrukt om de contactvlakken der verschillende lagen goed op elkaar te doen sluiten. In deze houten doos is rondom de opstelling nog een breede rand isolatiemateriaal (B) aangebracht. Met dit materiaal werd ook de spouw (S) geheel gevuld.

Met deze apparatuur worden materiaalmonsters tot een dikte van 12 cm per monster onderzocht.

Indien men met een dergelijke opstelling een betrouwbare meting wil verrichten, zal men zeker 2 maal 24 uur na het in bedrijf stellen der verwarming en koeling moeten wachten alvorens de eigenlijke meting kan geschieden, aangezien in korter tijd nog geen stationnaire toestand zal zijn bereikt. Men zal dan echter eerst door middel van de daartoe aangebrachte thermoelementen na moeten gaan, of de temperatuurverdeling aan de binnenzijde van de randisolaties gelijk is aan die van de rand van de materiaalmonsters. In het algemeen zal dit niet onmiddellijk het geval zijn, zoodat men dan door verandering van de aan de randverhitter toegevoerde energie deze gelijkheid zal moeten trachten te verkrijgen. Na elke verandering in de energietoevoer van de randverhitters zal een aanzienlijke wachttijd noodig zijn om opnieuw een stationnaire temperatuurverdeling te bereiken. Op deze wijze zal in het algemeen het onderzoek van een materiaal bij één bepaalde instelling van de temperatuur volgens de „methode-Poensgen” ten minste één week vorderen.

In de oorspronkelijke opstelling van Poensgen is, zooals in fig. 3 zichtbaar is, tusschen de verhitter en het monster eenerzijds en

de randverhitter en randisolaties anderzijds een met isolatiemateriaal gevulde ruimte (S) gelaten van 40 mm breedte. P o e n s g e n overzag, dat hierdoor toch aan de randen van de te onderzoeken materiaalschijven een niet rechtlijnig verloopende warmtestroom van de verhitter naar de koelplaten zou ontstaan, waardoor het eenvoudig in rekening brengen van de per  $m^2$  aan de verhitter toegevoerde energie als warmtestroom per  $m^2$  een onnauwkeurigheid in het eindresultaat ten gevolge heeft.

De bovenste der beide onderaan figuur 3 weergegeven schematische voorstellingen van het verloop van de warmtestroom in de bovenste materiaalschijf is een door M. J a k o b (13) geteekende weergave van de door P o e n s g e n in zijn berekeningen gemaakte onderstelling. Men ziet hieruit direct de onjuistheid van opvatting aangezien stroomlijnen ontstaan op plaatsen (a), waar geen verhitter aanwezig is. In het betreffende artikel gaf J a k o b tevens het onderste schema, dat de werkelijk optredende stroomlijnen en isothermen weergeeft.

De onderzoekers O. K n o b l a u c h, E. R a i s c h en H. R e i h e r (14) brachten de breedte der spouw (S) tot 1 cm terug om de boven beschreven fout tot te verwaarlozen proportie's te reduceeren. Ook bij 1 cm wijdte der spouw is echter de fout tengevolge van het feit, dat het temperatuurverval in de richting parallel met verhitter en koelplaat aan de randen van het monster niet nul is, nog op ongeveer 2 % te schatten. Behoudens de wijziging der spouwwijdte en nog enkele veranderingen, die minder ingrijpend zijn — o.a. wijziging der uitvoering van de verhitter en van de plaatsing der thermoelementen voor temperatuurmeting —, omdat ze verbetering beoogden van reeds bij P o e n s g e n voldoende verzorgde onderdeelen, wordt het door hem ontworpen apparaat nog heden ten dage in tal van laboratoria gebruikt voor de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt van technische, slecht warmtegeleidende (warmte-isoleerende) stoffen.

In 1926 publiceerde M. J a k o b nog een methode, waarbij door middel van een elektrische verhitter een stationnaire warmtestroom door een cirkelvormige schijf te onderzoeken materiaal met een diameter van 100 mm wordt gestuurd, die naar een onder het materiaal aangebrachte, met water gekoelde, koperen plaat loopt.

Aangezien hierbij geen gebruik werd gemaakt van een t.o.v. de



verhitter symmetrische opstelling moeten zeer uitvoerige maatregelen worden genomen om warmteverliezen van de bovenzijde en de randen van de verhitter tegen te gaan (de verhitter was op het te onderzoeken materiaal geplaatst). Hiervoor werden zeer omvangrijke, eveneens electrisch verwarmde, beschermingen op en rondom de eigenlijke verhitter aangebracht, terwijl de gelijke temperatuurinstelling in deze beschermingen en in de verhitter met in totaal 16 thermoelementen werd gecontroleerd. Jakob schat de nauwkeurigheid dezer meetmethode, indien alle voorzorgen voldoende in acht genomen worden, op 1 %.

In „The National Physical Laboratory” te Teddington gebruikt E. Griffiths (16) een methode, waarbij slechts één materiaalmonster onder een verhitter geplaatst wordt. Deze methode dient om groote platen isolatiemateriaal van punt tot punt te onderzoeken. De diameter van het in onderzoek zijnde deel van het monster en van de verhitter bedraagt slechts 45 mm, terwijl de dikte der monsters varieert van 0,5 tot 4 mm. De rand wordt niet ter voorkoming van storende warmteverliezen verhit, evenmin als het bovenvlak van de verhitter en de omtrek van het onder de monsterplaat geplaatste gekoelde koperen blok. Daarentegen wordt om de geheele opstelling een dikke isolatielaag aangebracht ter beperking der verliezen aan de rand, terwijl het dan nog plaatsvindende verlies door meting en berekening wordt bepaald.

Voor materialen, die gemakkelijk in ronde plaatjes met 45 mm diameter en 0,5 tot 4 mm dikte te verkrijgen zijn, is in het „National Physical Laboratory” een opstelling symmetrisch t.o.v. de verhitter aanwezig, die overigens geheel overéénkomt met de bovenbeschrevene.

Griffiths gebruikte ook de „methode-Poensgen” geheel overeenkomstig de reeds gegeven beschrijving, doch met zeer smalle spouw (S) tusschen monster en randbescherming.

M. Heyberger gebruikt in het „Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers” te Parijs de methode van Poensgen, echter in dien zin gewijzigd, dat met cirkelvormige verhitters, monsters en koelplaten wordt gewerkt, terwijl de verhitter slechts bestaat uit een spiraalvormig gewonden draad tusschen twee asbestlagen hetgeen de mogelijkheid van een min of meer ongelijkmatige temperatuurverdeling medebrengt.

In Zweden in het „Electrovärme Institutet” te Stockholm wordt de „methode-Poensgen” met in achtneming der verbeteringen van Knoblauch, Raisch en Reiber toegepast.

Ook in de Vereenigde-Staten van Amerika gebruikt het „Bureau of Standards” een methode geheel analoog aan die van Poensgen.

In het algemeen kunnen we zeggen, dat de beide oorspronkelijk door R. Poensgen (12) en M. Jakob (15) gepubliceerde methoden thans nog vrijwel algemeen worden toegepast, zij het met geringe wijzigingen.

Zij hebben beide het bezwaar, dat een enkele meting door de noodzakelijke instelling der hulpverhitters ter voorkoming van ongecontroleerde warmteverliezen vele dagen duurt. Bovendien bereikt de verbeterde „methode-Poensgen” geen grooter nauwkeurigheid dan 3 à 4 %, terwijl daarentegen de door Jakob gebruikte apparatuur waarschijnlijk in het gunstigste geval een meting met 1 % nauwkeurigheid toelaat.

Grootere nauwkeurigheid dan 3 à 4 % is voor de techniek geen noodzakelijkheid, wel echter is het van groot voordeel, indien een methode kan worden ontworpen, die een snellere meting toelaat.

## HOOFDSTUK II.

### DE METHODE VAN ONDERZOEK VAN DE WARMTE- STICHTING EN HAAR ONTSTAAN.

#### § 1. De algemeene gedachtengang.

Ongeveer in 1926 werd door de Commissie voor Warmte-isolatie, de voorlooper van de in 1927 opgerichte Warmte-Stichting, een aanvang gemaakt met het onderzoek van de warmtegeleidings-eigenschappen van verschillende materialen ten dienste van techniek en industrie.

Men ging uit van de gedachte, dat een vergelijkende meting van het te onderzoeken materiaal te samen met een geijkt materiaal, waarbij de verhouding der warmtegeleidingscoëfficiënten wordt bepaald, het eenvoudigst en met beperkte hulpmiddelen vlot uit te voeren zou zijn. Indien bij het verrichten van deze vergelijkende meting zorg gedragen wordt voor een gelijkmatige, beide materialen van oppervlak tot oppervlak volgens de normaal passeerende warmtestroom, zal men slechts de over elk der materialen optredende temperatuurverschillen en de respectievelijke dikten moeten bepalen (zie blz. 27).

Deze metingen maken dus in de eerste plaats een absolute meting noodzakelijk van de warmtegeleidingscoëfficiënt van één materiaal, dat geschikt is om als standaardmateriaal (basis van vergelijking) dienst te doen. Aanvankelijk werd hiervoor glas van circa 8 mm dikte gekozen. Daar de warmtegeleiding van glas echter ongeveer een factor 10 grooter is als die van de gebruikelijkste warmteisolatiematerialen, ontstonden te groote toevallige fouten in de meting van het temperatuurverval in de glasschijven, aangezien deze relatief dun waren ten opzichte van de warmtestroom, die in het te onderzoeken isolatie-materiaal een goed meetbaar en met de technische

praktijk overeenkomend temperatuurverval doet optreden. Dit euvel was niet te verhelpen door het nemen van zeer dikke glasmonsters, aangezien daarmede de in het volgende hoofdstuk besproken verliezen aan de rand zeer toenemen zouden.

De bezwaren, aan het glas als standaardmateriaal verbonden, meende men te kunnen ondervangen door een ander materiaal te kiezen. Hiervoor werd een isolatiemateriaal gekozen, dat uit houtvezels vervaardigd is, die geperst worden tot platen van ongeveer 12,5 mm dikte<sup>1)</sup>.

## § 2. De absolute meting.

Voor het bepalen van de warmtegeleidingscoëfficiënt van deze standaard-materialen werd gebruik gemaakt van een methode, die in principe overeenkomt met de reeds beschreven methoden van Gröber, Poensgen en anderen, doch die in de vorm van uitvoering eenigermate hiervan afwijkt.

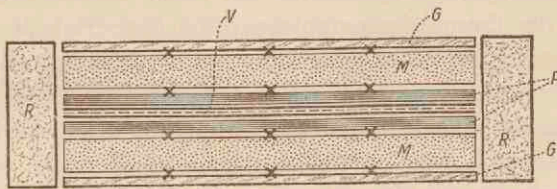


Fig. 4.

De kruisjes geven de plaatsing van de thermo-elementen aan.

In de eerste plaats werden de materiaalmonsters en de verhitter cirkelvormig genomen, omdat deze vorm, dank zij de alzijdige symmetrie t.o.v. de as van de stapel (fig. 4), de mathematische beschouwing der optredende warmtegeleidingsverschijnselen gemakkelijker toelaat dan de vierkante.

In de tweede plaats werd ter vereenvoudiging van de opstelling afgezien van het aanbrengen van een randbescherming, die een radiale warmtestroom in de te onderzoeken materiaalmonsters voorkomt. De randverliezen werden door isolatie zooveel mogelijk

<sup>1)</sup> Gebruikt werd het merk „Insulite” doch dit heeft geen speciale voordeelen boven één der andere in den handel zijnde merken, zoodat evengoed een ander had gekozen kunnen worden.

beperkt en zij werden verder door meting en berekening vastgesteld.

Als eigenlijke verhitter (V) werd een bladtinspiraal gebruikt, die was aangebracht tusschen twee vlakke ronde schijven pertinax met een diameter van 25 cm. Dit geheel werd ingesloten tusschen twee platen roodkoper (P) met dezelfde diameter en een dikte van 4 mm. Hierdoor werd over het geheele oppervlak een gelijkmatige temperatuur verkregen. Ter weerszijden van deze verhitter werd een schijf van het te ijken materiaal (M) geplaatst, eveneens met een diameter van 25 cm. Deze materiaalmonsters waren elk voorzien van zes thermoelementen, en wel drie op elk oppervlak. In het geval der glasschijven werden de thermoelementen vervaardigd uit zeer dun thermoblik, dat op speciale wijze op het oppervlak geplakt werd. De buitenzijde der monsters van het materiaal werden afgedekt door dunne glasplaten (G), die tusschen twee stukken flanel genaaid waren. Ook tusschen de koperen platen en de materiaalmonsters was een laag flanel aangebracht. Dit flanel diende eenerzijds om de draden der thermoelementen tegen het oppervlak der materiaalmonsters aan te drukken, anderzijds om de buitenzijden der stapel dezelfde oppervlakte-gesteldheid te geven als de isoleerende rand (R), die om de geheele stapel was aangebracht, en die bestond uit een flanel omhulsel, gevuld met isolatiemateriaal.

De geheele stapel (fig. 4) werd op drie kurken op een tafel geplaatst, terwijl op de stapel eveneens op drie kurken een zware plaat rustte.

Door de temperaturen van het oppervlak aan boven- en onderzijde van de stapel en van de randisolatie te meten, kon een schatting gemaakt worden van de verhouding tusschen de warmtestroom door de monsters volgens de normaal en van die in radiale richting (verlies aan de rand). Anderzijds werd uit de meting der temperatuur met de thermoelementen een indruk verkregen omtrent de radiale warmtestroom, aangezien de drie elementen, die op een oppervlak waren aangebracht, steeds in het middelpunt van de cirkel en ter weerszijden daarvan op ongeveer een halve straal afstand waren geplaatst. Dank zij de isolatie van de rand bedroegen de verliezen daar ter plaatse slechts een klein deel van de totale warmtestroom. Meting en berekening der genoemde verliezen bevestigden elkander redelijk.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van de beide monsters kon nu berekend worden volgens formule (2), waarvoor dan  $q$  kan worden bepaald uit een meting van het electricisch energieverbruik van de verhitter ( $Q$ ) in Watts, gecombineerd met een bepaling van het optredend randverlies, n.l.:

$$q = 0,86 \cdot \varphi \cdot \frac{Q \text{ kcal.}}{2 \text{ h}}$$

Hierin geeft  $\varphi$  de verhouding aan van de warmtestroom in de richting van de normaal door de monsters gaande tot de radiale warmtestroom.

Een controle op de nauwkeurigheid dezer metingen werd verkregen door de beide aldus onderzochte materialen, glas en insulite, aan een vergelijkende meting te onderwerpen om na te gaan in hoeverre de daarbij gevonden verhouding der warmtegeleidingscoëfficiënten overeenkwam met de verhouding der op de bovenbeschreven wijze afzonderlijk bepaalde waarden.

### § 3. De vergelijkende meting.

Voor de vergelijkende metingen werd een opstelling gebruikt zoals die in figuur 5 is weergegeven.

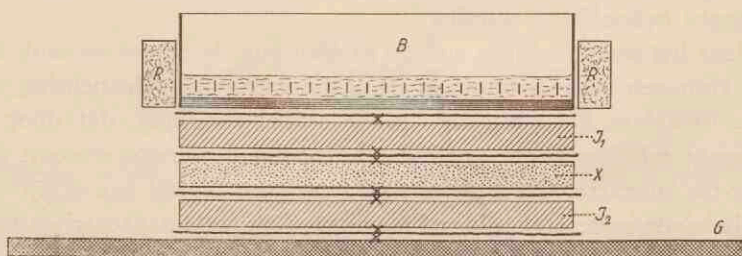


Fig. 5.

Als verhitter werd een cilindrische bak (B) met een diameter van 25 cm gebruikt, bestaande uit een roodkoperen bodem van 4 à 5 mm dikte met een ongeveer 10 cm hooge opstaande rand van messing van 1 mm dikte. In deze bak was een laag van ongeveer 2 cm minerale olie aanwezig, waarin een electricische verhitter, vervaardigd

uit op geringe onderlinge afstand heen en weer loopend bandvormig weerstandmateriaal, was ondergedompeld. Rondom de rand van de bak werd een isoleerende gordel (R) aangebracht, die de warmteafgifte aan de omgeving daar ter plaatse beperkt.

Deze verhitter werd op een stapel geplaatst, bestaande uit b.v. één schijf onbekend materiaal (X), gevat tusschen twee schijven ( $I_1$  en  $I_2$ ) van een materiaal, met bekende warmtegeleidingscoëfficiënt. Hiervoor werd glas of insulite gekozen. Op het scheidingsvlak tusschen elke twee opéénvolgende lagen werden één of meer thermoelementen aangebracht, zoodanig, dat hiermede nauwkeurig het temperatuurverschil, optredende over elke materiaallaag, kon worden gemeten. De geheele stapel werd geplaatst op een groote ijzeren plaat (G) van 2 cm dikte en met een middellijn van 50 cm. Deze plaat steunde in drie punten op een houten raam, dat op zijn beurt op een tafel was opgesteld. De geheele opstelling werd geplaatst in een kelderruimte, die aan alle zijden door gangen of andere vertrekken was ingesloten, zoodat daarin de temperatuur geen grootere fluctuaties dan ongeveer  $\frac{1}{2}^\circ$  C. per 24 uur vertoonde. De metingen der temperatuurverschillen werden met behulp van een draaispoelgalvanometer in een nevengelegen vertrek verricht, zoodat tijdens de opwarming van de opstelling tot de stationnaire toestand en tijdens de eigenlijke meting de omgeving der opstelling niet door de aanwezigheid van personen gestoord behoefde te worden.

Daar het warmteverlies aan de randen van de stapel oorzaak kan zijn voor een verandering van de warmtestroom in de richting van de normaal in het centrum van de stapel zoodanig, dat door de onderste schijf een iets geringere hoeveelheid warmte stroomt dan door de bovenste, werd de meting herhaald, terwijl een schijf van het bekende materiaal (glas of insulite) was geplaatst tusschen twee schijven van het onbekende materiaal. Bovendien werd elke stapel tweemaal gemeten, waarvan de tweede maal de volgorde van de schijven was omgekeerd. In totaal werden dus van een onbekend materiaal twee schijven,  $X_1$  en  $X_2$ , vergeleken met de twee geijkte schijven  $I_1$  en  $I_2$  in de volgende 8 posities:

boven	$I_1$	$I_2$	$I_2$	$I_1$	$X_1$	$X_2$	$X_2$	$X_1$
midden	$X_1$	$X_1$	$X_2$	$X_2$	$I_1$	$I_1$	$I_2$	$I_2$
onder	$I_2$	$I_1$	$I_1$	$I_2$	$X_2$	$X_1$	$X_1$	$X_2$

Na 24 uur werd de stationnaire toestand bijna steeds bereikt, dientengevolge duurde dus een volledige meetreeks tenminste 8 dagen.

De dikte der schijven werd steeds zoodanig gekozen, dat de storing van de warmtestroom in het centrale deel der stapel tengevolge van de verliezen aan de rand zoo gering mogelijk was, terwijl toch de samenstelling van elke schijf over de dikte als een gemiddelde kon worden beschouwd.

Het feit, dat slechts de verhouding der over de diverse lagen optredende temperatuurverschillen behoefde te worden bepaald, vereenvoudigde de meting in dien zin, dat kon worden volstaan met het bepalen der verhouding van de galvanometeruitslagen, daar deze uitslagen door het gebruik van geheel gelijke thermoelementen evenredig zijn met de betreffende temperatuurverschillen.

Noemen wij de optredende temperatuurverschillen  $(\Delta\theta)_i$  en  $(\Delta\theta)_x$  dan is dus volgens formule (2):

$$\lambda_i \cdot \frac{(\Delta\theta)_i}{l_i} = \lambda_x \cdot \frac{(\Delta\theta)_x}{l_x}$$

De index  $i$  duidt het bekende en de index  $x$  het onbekende materiaal aan.

De gezochte  $\lambda_x$  is dus te berekenen volgens de betrekking:

$$\lambda_x = \lambda_i \cdot \frac{(\Delta\theta)_i}{(\Delta\theta)_x} \cdot \frac{l_x}{l_i} \frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^\circ\text{C.}}$$

Hierin werd voor  $\frac{(\Delta\theta)_i}{(\Delta\theta)_x}$  een gemiddelde waarde ingevuld, bepaald uit de volledige reeks van 8 metingen, terwijl de dikten  $l_i$  en  $l_x$  nauwkeurig met een daarvoor geconstrueerde micrometer werden bepaald.

#### § 4. De resultaten der absolute en vergelijkende meting van glas en insulite.

Zoals in het voorgaande reeds is medegedeeld, werden de warmtegeleidingscoëfficiënten van een tweetal glasschijven van



8,2 mm dikte en een tweetal insulite schijven van 12,8 mm dikte volgens de beschreven absolute meetmethode bepaald. De hierbij verkregen resultaten waren de volgende.

*Meting der glasschijven:*

Uit de meting der oppervlaktetemperaturen en door berekening werd voor de factor  $\varphi$  gemiddeld de waarde  $\varphi = 0.815$  gevonden. Hiermede werd de gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt der beide glasschijven vastgesteld op

$$\lambda_g = 0,76 \frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^\circ\text{C.}}$$

De gemiddelde temperatuur der glasschijven bedroeg gedurende de meting  $25^\circ \text{C.}$

*Meting der insulite-schijven:*

Voor  $\varphi$  werd gevonden de waarde  $\varphi = 0,748$ .

Hiermede werd de warmtegeleidingscoëfficiënt gemiddeld voor de beide schijven

$$\lambda_i = 0.046 \frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^\circ\text{C.}}$$

De gemiddelde temperatuur van de beide insuliteschijven bedroeg tijdens de meting  $35^\circ \text{C.}$

In verschillende publicaties (17, 18, 19) worden in het buitenland gemeten gegevens betreffende de warmtegeleiding van diverse materialen vermeld. De bovenstaande beide waarden stemmen hiermede goed overeen. Uit verschillende metingen aan insulite verricht kon worden afgeleid, dat de warmtegeleidingscoëfficiënt van deze stof ongeveer met 0,2 % toeneemt per  $1^\circ \text{C.}$  stijging van de gemiddelde temperatuur van het materiaal.

Herleiden we hiermede de bovengenoemde waarde van  $\lambda_i$  tot hetgeen zij zal moeten zijn bij  $25^\circ \text{C.}$  gemiddelde temperatuur, dan vinden we

$$\lambda_i \text{ bij } 25^\circ \text{C.} = 0,045 \frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^\circ\text{C.}}$$

Uit de beide absolute metingen volgt dus voor 25° C. gemiddelde temperatuur van het materiaal de verhouding

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_i} = \frac{0,76}{0,045} = 16,9.$$

Met beide materialen werd nu een volledige reeks metingen in de opstelling voor vergelijkende metingen verricht. Hierbij werd als gemiddelde verhouding voor de metingen met een glasschijf tusschen de insuliteschijven gevonden

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_i} = 16,9.$$

De metingen met een insulite-schijf tusschen de glasschijven mogen als onnauwkeuriger beschouwd worden, daar de tweede glasschijf dank zij de relatief hoge warmtegeleiding van glas het verlies aan de rand merkbaar doet toenemen. In dit geval werd gemiddeld gevonden de verhouding

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_i} = 18,1.$$

De gemiddelde temperatuur van het materiaal bedroeg tijdens de geheele reeks van metingen gemiddeld 28° C.

Aannemende, dat de verhouding der warmtegeleidingscoëfficiënten voor een temperatuurvariatie van slechts enkele graden als constant beschouwd mag worden, volgt uit de volledige reeks, overeenkomstig de berekening voor normale vergelijkende metingen aan onbekende materialen, de gemiddelde waarde

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_i} = 17,5$$

die direct vergeleken mag worden met het resultaat der absolute metingen.

Het verschil tusschen beide methoden bedraagt dus 3,5 %. Mede op grond van dit resultaat werd de nauwkeurigheid der vergelijken-

de meting geschat op  $\pm 5\%$ , hetgeen aanvankelijk voor de techniek voldoende geacht mocht worden.

### § 5. Het onderzoek met behulp van schijfcalorimeters.

Op den duur bleek de vergelijkingsmethode voor de praktijk belangrijke bezwaren op te leveren.

- 1e. Handel en industrie vragen tegenwoordig naar gegevens, die een grootere nauwkeurigheid bezitten dan de bovengenoemde<sup>1)</sup>.
- 2e. De duur van het onderzoek (minstens 8 dagen) is in vele gevallen voor industrieele opdrachtgevers onaangenaam lang en brengt bovendien uit hoofde van de daarvoor benodigde tijd relatief hoge kosten mee.
- 3e. Indien men materialen moet onderzoeken, die geleidelijk veranderen van samenstelling, veranderen gedurende het onderzoek de warmtegeleidingseigenschappen. Dit is b.v. het geval als opname of verdamping van vocht plaats vindt<sup>2)</sup>.
- 4e. De als standaard gebezigde insulite-schijven bleken in de loop van eenige jaren dunner te zijn geworden, terwijl bovendien de warmtegeleidingscoëfficiënt van dit materiaal ten gevolge van verandering van het vochtgehalte verandert. De geijkte insulite-monsters moesten dus steeds gedroogd worden. Daar de houtvezels vocht uit de atmosfeer opnemen, verandert dus ook de warmtegeleidingscoëfficiënt gedurende elke meetreeks in geringe mate.

Om deze redenen werd uitgezien naar een methode van onderzoek, die grootere nauwkeurigheid bezit, sneller resultaten oplevert, ook in die mate, dat belangrijke veranderingen der te onderzoeken

---

<sup>1)</sup> Voor de berekening van het gedrag der materialen in de practijk heeft een grootere nauwkeurigheid geen belang, wel echter uit een oogpunt van handelspropaganda.

<sup>2)</sup> Alle keuringen van materialen worden normaal verricht aan van te voren tot constant gewicht gedroogde monsters, aangezien slechts op deze wijze geheel reproduceerbare en vergelijkbare gegevens worden verkregen. Op speciaal verzoek wordt echter een enkele maal van deze werkwijze afgeweken.

materialen tijdens het onderzoek met eenvoudige voorzorgen te voorkomen zijn, en die tenslotte meer het karakter van een absolute-meting draagt, althans het gebruik van een vergelijkingsbasis, die veranderlijk kan zijn, onnoodig maakt.

Daar bij de „methode Poensgen”, tengevolge van de noodzakelijke gelijke instelling van de temperatuur in de randbescherming, door middel van de afzonderlijke regelbare elektrische randverhitters, een lange duur van het onderzoek noodig is, indien men betrouwbare resultaten wil verkrijgen, werd afgezien van het bepalen der warmtestroom door meting van de aan een elektrische verhitter toegevoerde energie.

In de plaats hiervan werden schijfvormige warmtestroommeters vervaardigd, die analoog zijn met de door E. Schmidt (20) ter bepaling van het warmteverlies door cilindrische isolatiemantels vervaardigde „warmtestroommeter”.

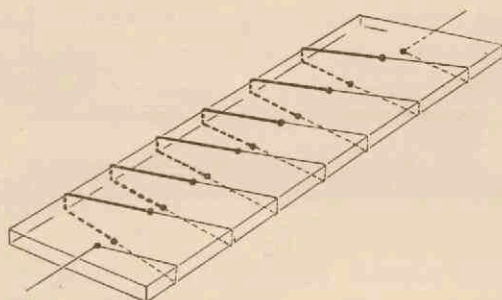


Fig. 6.

Deze schijfcalorimeters bestaan uit een laag rubber van ongeveer 3 mm dikte, die is voorzien van ongeveer 100 in serie geschakelde thermoelementen, vervaardigd van manganin- en constantaandraad van 0,3 mm dikte en zoodanig aangebracht, dat telkens een lasch van manganin aan constantaan zich bevindt tusschen twee dergelijke lasschen, die aan de andere zijde der rubberlaag gelegen zijn op de wijze als in figuur 6 aangegeven is. De beide oppervlakken der rubberschijven zijn ter bescherming van de thermoelementen met een laag canvas bedekt. Terwijl de totale schijf, evenals de ermede te onderzoeken materiaalmonster, een diameter van 25 cm heeft, zijn alle thermoelementen binnen een cirkel, beschreven van-

uit het middelpunt der schijf, met een straal van 5 cm aangebracht.

Het voor de combinatie manganin- en constantaan geldend thermoelectrisch aequivalent van het, bij doorgang van een warmtestroom tusschen de beide oppervlakken van de rubberschijf optredende, temperatuurverschil zal ongeveer honderdvoudig versterkt te meten zijn aan de radiaal naar buiten gevoerde uiteinden van de aangebrachte thermoketen.

De schijfcalorimeters worden geijkt in een speciaal daarvoor samengesteld toestel. Bij deze ijking, die in hoofdstuk IV nader beschreven is, wordt het verband tusschen de door de schijf gaande warmtestroom en de EMK der reeks van thermoelementen vastgesteld.

Het onderzoek naar de warmtegeleidingscoëfficiënt van een willekeurig materiaal geschiedt nu met behulp van deze warmtestroommeters op de volgende wijze.

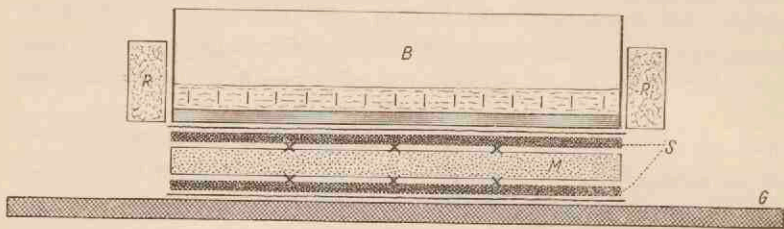


Fig. 7.

In een overeenkomstig figuur 7 opgebouwde opstelling voor het onderzoek wordt een schijf van het te onderzoeken materiaal (M) geplaatst tusschen twee der boven beschreven schijfcalorimeters (warmtestroommeters) (S). Onder de onderste schijf bevindt zich de ijzeren plaat (G), steunend op een houten raam, die reeds genoemd werd bij de beschrijving der vergelijkende methode, terwijl op de bovenste schijf de eveneens reeds genoemde oliebadverhitter (B) met dikke roodkoperen bodem en de isolatiegordel (R) wordt geplaatst. Tusschen de schijfcalorimeters en het te onderzoeken materiaal worden ter weerszijden van dit laatste telkens drie thermoelementen geplaatst, vervaardigd van koper- en constantaanband van 0,1 mm dikte bij 1 mm breedte. Een dezer thermoelementen bevindt zich in het middelpunt der schijven,

terwijl de beide andere op ongeveer 5 cm afstand van het middelpunt worden geplaatst. De temperatuurgevoelige lasschen van koper aan constantaan bevinden zich op elk oppervlak op één lijn en zijn zoodanig geplaatst, dat zij twee aan twee onder en boven het te onderzoeken materiaal boven elkaar liggen. Een zevende thermoelement bevindt zich vrij in de lucht onder de ijzeren plaat naast het kwikreservoir van een glazen thermometer. De, alle aan één zijde uit de stapel tredende, constantaan-bandjes der thermoelementen worden met elkaar in één klem vereenigd, zoodat het mogelijk is door aansluiting van de koperbandjes van twee boven elkaar gelegen thermoelementen aan een galvanometer direct het temperatuurverschil over het te onderzoeken materiaal te bepalen.

Gemeten worden nu:

- 1e. met een micrometer de dikte ( $l$ ) van het te onderzoeken materiaalmonster.
- 2e. met de schijfcalorimeters de per tijdséénheid in het materiaal tredende en aan de andere zijde er uit tredende warmtestroom  $\left(\frac{q}{f}\right)$  en
- 3e. met de thermoelementen op drie verschillende plaatsen het temperatuurverschil ( $\theta_1 - \theta_2$ ).

Met deze gegevens wordt volgens formule (2) de warmtegeleidingscoëfficiënt berekend:

$$\lambda = \frac{q}{f} \cdot \frac{l}{\theta_1 - \theta_2} \frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^\circ\text{C.}}$$

Het in de lucht onder de ijzeren plaat aangebrachte thermoelement en de kwikthermometer dienen om de tijdens het onderzoek optredende gemiddelde temperatuur van het materiaalmonster te bepalen.

Het gebruik der rubber-schijfcalorimeters levert belangrijke voordeelen op zoowel ten opzichte van de in § 3 beschreven vergelijkingsmethode als ten opzichte van de „methode-Poensgen”.

In de eerste plaats is de nauwkeurigheid dezer methode op zijn

minst gelijk aan die van de „methode-Poensgen” en bij voldoende nauwkeurige ijking der schijfcalorimeters en thermoelementen gemakkelijk op te voeren tot  $\pm 2\%$ , hetgeen voor de techniek alleszins voldoende is.

In de *tweede plaats* is het op deze wijze mogelijk betrekkelijk snel een materiaal te onderzoeken. Het thermisch evenwicht zal in hoogstens twee maal 24 uur bereikt zijn en het naregelen der aan de verhitter toegevoerde energie, zooals dat bij de randverhitters van Poensgen geschieden moet, is niet noodig. De meting zal dus onmiddellijk na de genoemde tijd kunnen plaats vinden. De meting is definitief en behoeft niet in een gevarieerde opstelling herhaald te worden, zooals dat bij de vergelijkingsmethode noodzakelijk is.

In de *derde plaats* laat de methode toe materialen te onderzoeken, waarvan de eigenschappen b.v. door opname of verdamping van vocht veranderen.

In de *vierde plaats* wordt de nauwkeurigheid der metingen niet beïnvloed door een veranderlijke vergelijkingsbasis. De schijfcalorimeters vertoonden in de loop van eenige jaren geen verandering van hun warmtegeleiding. Een contrôle-ijking, b.v. éénmaal in elke periode van twee jaar, werd niet te min als een gewenschte veiligheidsmaatregel, om de nauwkeurigheid der metingen ten allen tijde te kunnen garandeeren, verricht.

Tenslotte geeft de meting van de in en uit het materiaal tredende warmtestroom, directe contrôle op eventueel optredende verliezen aan de rand. In verband met de warmtegeleidingscoëfficiënt is het mogelijk voor elk materiaal een grens voor de dikte aan te geven, waaronder nog geen invloed van deze verliezen merkbaar is in een cirkel met een diameter van 10 cm in het centrum van het materiaalmonster, waarover de eigenlijke meting der warmtegeleiding zich uitstrekt. Een rand van het materiaal met een breedte van 7,5 cm vormt als het ware een isolatie van fraaie gelijke instelling der temperatuur, die het midden-gedeelte, waarover de meting plaats vindt, beschermt tegen storende verliezen aan de rand.

De meting op drie plaatsen van het over het monster optredende temperatuurverschil geeft een indruk omtrent de plaatselijke verschillen in het onderzochte materiaal.

### HOOFDSTUK III.

#### DE BEREKENING VAN DE INVLOED DER VERLIEZEN AAN DE RAND.

##### § 1. De warmtestrooming in een cirkelvormige materiaalschijf. <sup>1)</sup>

We beschouwen het volume-element  $r.da.dr.dx$ , in de schematisch in figuur 8 weergegeven schijf. We onderstellen, dat de warmtestroom stationnair is.

De dikte van het materiaalmonster noemen we  $l$ , de temperaturen van boven- en ondervlak  $\theta_1$  en  $\theta_0$  ( $\theta_1 > \theta_0$ ).

De hoeveelheid warmte, die het volume-element in radiale richting en aan de bovenzijde per tijdseenheid binnenkomt, wordt gegeven door de uitdrukking

$$-\lambda \frac{\delta \theta}{\delta r} \cdot r da \cdot dx - \lambda \frac{\delta \theta}{\delta x} \cdot r da \cdot dr$$

De hoeveelheid warmte, die in radiale richting en aan de onderzijde uit het volume-element treedt, is gegeven door:

$$-\lambda \left( \frac{\delta \theta}{\delta r} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta r^2} \cdot dr \right) \cdot (r+dr) da \cdot dx - \lambda \left( \frac{\delta \theta}{\delta x} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} dx \right) \cdot r da \cdot dr$$

In de stationnaire toestand zijn deze beide hoeveelheden warmte

---

<sup>1)</sup> In litteratuuropgave (21 en 22) worden analoge problemen behandeld.



aan elkaar gelijk. Hieruit volgt voor de temperatuur  $\Theta$  de differentiaal vergelijking

$$\frac{\delta^2 \Theta}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \Theta}{\delta r} + \frac{\delta^2 \Theta}{\delta x^2} = 0 \quad (3)$$

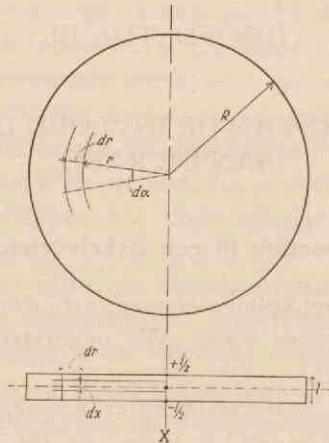


Fig. 8.

Nemen we aan, dat de temperaturen van het boven- en ondervlak van het materiaal door speciale voorzorgen <sup>1)</sup> in radiale richting constant zijn, n.l. respectievelijk  $\Theta_l$  en  $\Theta_o$ , dan gelden de volgende randcondities:

voor  $x = +\frac{l}{2}$  is  $\Theta = \Theta_l$  voor alle waarden van  $r$ .

voor  $x = -\frac{l}{2}$  is  $\Theta = \Theta_o$  voor alle waarden van  $r$ .

Verder is de radiale warmtestroom voor  $r = R$  te beschrijven met

$$-\lambda \cdot \left( \frac{\delta \Theta}{\delta r} \right)_{r=R} = a \cdot \Theta \quad (4)$$

<sup>1)</sup> B.v. door afdekking met dikke metalen platen.

De coëfficiënt  $\alpha$  beschrijft de warmteafgifte van het cilindrische oppervlak van de schijf aan de omgeving<sup>1)</sup>. Bij de genoemde onderstellingen stelt  $\Theta$  het temperatuurverschil van het beschouwde materiaal met de omgeving voor.

Indien geen verlies aan de rand optrad, dus de radiale warmtestroom gelijk nul was, zou op elk vlak  $x = \text{const.}$  ook  $\Theta = \text{const.}$  zijn en zou  $\Theta$  kunnen worden voorgesteld door de vergelijking

$$\Theta = \frac{\Theta_l + \Theta_o}{2} + \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l} \cdot x$$

We onderstellen nu, dat de werkelijk optredende temperatuur op elk punt door de betrekking kan worden voorgesteld:

$$\Theta = \frac{\Theta_l + \Theta_o}{2} + \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l} \cdot x + \vartheta \quad (5)$$

waarin dan  $\vartheta$  een correctie ten gevolge van het optredende verlies aan de rand voorstelt.

Vullen wij de in (5) gegeven vorm voor  $\Theta$  in de differentiaalvergelijking (3) in, dan vinden we:

$$\frac{\delta^3 \vartheta}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \vartheta}{\delta r} + \frac{\delta^2 \vartheta}{\delta x^2} = 0 \quad (6)$$

De randcondities (4) worden nu:

$$\left. \begin{array}{l} \text{voor } x = +\frac{l}{2} \text{ is } \vartheta = 0 \text{ voor alle waarden van } r. \\ \text{voor } x = -\frac{l}{2} \text{ is } \vartheta = 0 \text{ voor alle waarden van } r. \\ \text{voor } r = R \text{ is } -\lambda \frac{\delta \vartheta}{\delta r} = \alpha \cdot \left( \frac{\Theta_l + \Theta_o}{2} + \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l} \cdot x + \vartheta \right) \end{array} \right\} (7)$$

Daar  $\vartheta$  een functie is van de onafhankelijke veranderlijken  $r$  en  $x$

<sup>1)</sup> De dimensie van  $\alpha$  is kcal/m<sup>2</sup>.h.°C.  $\alpha$  is dus de warmteafgifte per oppervlakte eenheid, per tijdseenheid en per graad temperatuurverschil.

kunnen we de vergelijking (6) separeren door de onderstelling dat

$$\vartheta = f(r) \cdot \varphi(x)$$

is.

Hiermede vinden we uit (6) de differentiaal vergelijkingen:

$$\varphi''(x) = -\beta^2 \cdot \varphi(x) \quad (8)$$

$$\text{met de randconditie's } \varphi\left(+\frac{l}{2}\right) = 0 \text{ en } \varphi\left(-\frac{l}{2}\right) = 0 \quad (8a)$$

en

$$f''(r) + \frac{1}{r} f'(r) - \beta^2 \cdot f(r) = 0 \quad (9)$$

De oplossing van (8) luidt  $\varphi(x) = A \cos \beta x + B \sin \beta x$  waaruit in verband met (8a) volgt

$$A \cos \beta \frac{l}{2} + B \sin \beta \frac{l}{2} = 0 \text{ en } A \cos \beta \frac{l}{2} - B \sin \beta \frac{l}{2} = 0.$$

Uit deze relatie's vinden we, indien  $A = 0$  is voor  $\beta \cdot \frac{l}{2}$  de waarde  $k\pi$ , waarin  $k$  een geheel getal is.

Terwijl de onderstelling  $B = 0$  voor  $\beta \cdot \frac{l}{2}$  de waarde  $(2k-1)\frac{\pi}{2}$ , waarin  $k$  een geheel getal is, oplevert.

Algemeen volgt hieruit  $\beta = \frac{n\pi}{l}$  waarbij  $n$  een geheel getal is.

De oplossing van vergelijking (9) is de Besselsche functie van de nulde orde en eerste soort:

$$f(r) = C \cdot I_0(i \cdot \beta r) = C_n \cdot I_0\left(i \cdot \frac{n\pi r}{l}\right)$$

waarin  $i$  de imaginaire éénheid is.

1)  $+\beta^2$  geeft geen aan alle voorwaarden voldoende oplossing.

Hiermede vinden we dus als oplossing van de differentiaal vergelijking (6)

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{n=\infty} C_n \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n \pi r}{l} \right) \begin{cases} \cos \frac{n \pi x}{l} & \text{voor oneven waarden van } n \\ \sin \frac{n \pi x}{l} & \text{voor even waarden van } n \end{cases} \quad (10)$$

Hierin zijn de integratie constanten  $C_n$  nog onbekend. Om deze te bepalen vullen we de in (10) weergegeven uitdrukking voor  $\vartheta$  in de randconditie voor  $r = R$  (zie (7)) in, en vinden dan:

$$\begin{aligned} & -\lambda \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} C_n I_o' \left( i \cdot \frac{n \pi R}{l} \right) \cdot i \cdot \frac{n \pi}{l} \cdot \begin{cases} \cos \frac{n \pi x}{l} & \text{voor oneven waarden van } n \\ \sin \frac{n \pi x}{l} & \text{voor even waarden van } n \end{cases} = \\ & = + \alpha \left\{ \frac{\theta_l + \theta_o}{2} + \frac{\theta_l - \theta_o}{l} \cdot x + \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^{n=\infty} C_n \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n \pi R}{l} \right) \begin{cases} \cos \frac{n \pi x}{l} & \text{voor oneven waarden van } n \\ \sin \frac{n \pi x}{l} & \text{voor even waarden van } n \end{cases} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

Ten einde de coëfficiënt  $C_n$  uit deze vergelijking op te lossen ontwikkelen wij de vorm  $\frac{\theta_l + \theta_o}{2} + \frac{\theta_l - \theta_o}{l} \cdot x$  in een Fourierreeks, die voor oneven waarden van het rangnummer slechts termen met cosinus bevat, terwijl voor even waarden van  $n$  alleen de sinus optreedt. Daartoe ontwikkelen wij de functie  $P + Q \cdot x$  voor

$$\begin{aligned} & -\frac{l}{2} < x < +\frac{l}{2} \text{ en de functie } -(P + Q \cdot l) + Q \cdot x \text{ voor} \\ & +\frac{l}{2} < x < +\frac{3l}{2}, \text{ waarin } P = \frac{\theta_l + \theta_o}{2} \text{ en } Q = \frac{\theta_l - \theta_o}{l} \text{ is.} \end{aligned}$$

(zie figuur 9).

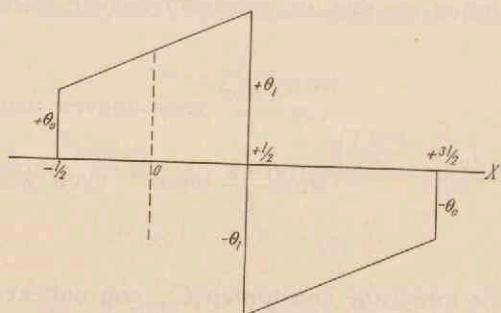


Fig. 9.

Men vindt dan:

$$\frac{\Theta_l + \Theta_o}{2} + \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l} \cdot x = \sum_{n=1, 3, 5 \dots}^{n=\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{\Theta_l + \Theta_o}{2} \cdot \cos \frac{n\pi x}{l} + \sum_{n=2, 4, 6 \dots}^{n=\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot (-1)^{\frac{n}{2}+1} \cdot \frac{\Theta_l - \Theta_o}{2} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (12)$$

Indien we deze betrekking in de randconditie (11) substitueeren, verkrijgen wij afzonderlijke vergelijkingen voor even en oneven waarden van  $n$ , waaruit de Constanten  $C_n$  kunnen worden opgelost.

Voor  $n =$  oneven vinden we dan:

$$C_n = - \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{2}{n\pi} \cdot (\Theta_l + \Theta_o)}{i \cdot \frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right) + I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right)} \quad (13a)$$

terwijl voor  $n =$  even geldt:

$$C_n = - \frac{(-1)^{\frac{n}{2}+1} \cdot \frac{2}{n\pi} \cdot (\Theta_l - \Theta_o)}{i \cdot \frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right) + I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right)} \quad (13b)$$

Hiermede is de oplossing van (6) volledig bekend. Zij luidt volgens (10):

$$\begin{aligned} \vartheta = & \sum_{n=1,3,5,\dots}^{n=\infty} - \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{2}{n\pi} \cdot (\Theta_l + \Theta_o)}{\frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right) + I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right)} \times \\ & \times I_o\left(i \cdot \frac{n\pi r}{l}\right) \cdot \cos \frac{n\pi x}{l} + \\ & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{n=\infty} - \frac{(-1)^{\frac{n}{2}+1} \cdot \frac{2}{n\pi} \cdot (\Theta_l - \Theta_o)}{\frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right) + I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right)} \times \\ & \times I_o\left(i \cdot \frac{n\pi r}{l}\right) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \end{aligned} \quad (14)$$

*Deze oplossing en de in de volgende paragrafen daaruit getrokken conclusies gelden slechts, indien voldaan is aan de voorwaarde, dat de temperatuur over boven en ondervlak van de stapel constant is. Bij de uitvoering der metingen zal hieraan dus zorg moeten worden besteed.*

## § 2. De verliezen aan de rand.

De nauwkeurigheid van de in § 5 van Hoofdstuk II besproken methode ter bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt van schijfvormige monsters hangt o.m. af van de warmteverliezen aan de rand van de stapel en van de mate, waarin deze in het centrum van het monster (cirkel met straal van 5 cm) nog merkbaar zijn. De in de vorige § gegeven mathematische beschrijving van de warmtestroomingsverschijnselen in de stapel geeft nu de mogelijkheid om in verband met de warmtegeleidingscoëfficiënt ( $\lambda$ ) en de dikte ( $l$ )

van de monsters na te gaan hoe groot de invloed der verliezen aan de rand op de gemeten warmtestroomen is.

In het ideale geval, waarin geen verliezen aan de rand van de opstelling optreden, zal de warmtestroom boven en onder het monster gelijk zijn en kan worden voorgesteld door  $\lambda \cdot \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l}$ .

De werkelijk optredende warmtestroom vinden we door de betrekking (5) naar  $x$  te differentieëren:

$$-\lambda \frac{\delta \Theta}{\delta x} = +\lambda \left\{ \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l} + \frac{\delta \vartheta}{\delta x} \right\}$$

De term  $+\lambda \frac{\delta \vartheta}{\delta x}$  geeft de afwijking ten gevolge van de warmteverliezen aan de rand aan.

Uitgedrukt in de gemiddelde warmtestroom <sup>1)</sup> bedraagt deze afwijking

$$V = \frac{\lambda \frac{\delta \vartheta}{\delta x}}{\lambda \frac{\Theta_l - \Theta_o}{l}} = \frac{l}{\Theta_l - \Theta_o} \cdot \left\{ \sum_{n=1,3,5,\dots}^{n=\infty} -\frac{n\pi}{l} \cdot C_n \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n\pi r}{l} \right) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{n=\infty} \frac{n\pi}{l} \cdot C_n \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n\pi r}{l} \right) \cdot \cos \frac{n\pi x}{l} \right\}$$

Met de gevonden waarden van  $C_n$  (zie 13a en b) vinden we hieruit voor  $x = +\frac{l}{2}$

$$V_l = +2 \cdot \frac{\Theta_l + \Theta_o}{\Theta_l - \Theta_o} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots}^{n=\infty} \frac{I_o \left( i \cdot \frac{n\pi r}{l} \right)}{\frac{n\pi \lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right) + I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right)} + 2 \sum_{n=2,4,6,\dots}^{n=\infty} \frac{I_o \left( i \cdot \frac{n\pi r}{l} \right)}{\frac{n\pi \lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right) + I_o \left( i \cdot \frac{n\pi R}{l} \right)}$$

<sup>1)</sup> Onder gemiddelde warmtestroom wordt hier verstaan, die warmtestroom, welke dezelfde waarden van  $\Theta_l$  en  $\Theta_o$  zou geven, indien geen verliezen aan de rand optreden.

en voor  $x = -\frac{l}{2}$

$$V_o = -2 \cdot \frac{\theta_l + \theta_o}{\theta_l - \theta_o} \cdot \sum_{n=1,3,5\dots}^{n=\infty} \frac{I_o\left(i \cdot \frac{n\pi r}{l}\right)}{\frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right) + I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right)} +$$

$$+ 2 \sum_{n=2,4,6\dots}^{n=\infty} \frac{I_o\left(i \cdot \frac{n\pi r}{l}\right)}{\frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right) + I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right)}$$

Het verschil tusschen de warmtestroom aan de bovenzijde van het monster en die aan de onderzijde uitgedrukt in de warmtestroom, indien geen verliezen aan de rand optreden, bedraagt dus

$$(V_l - V_o) = 4 \cdot \frac{\theta_l + \theta_o}{\theta_l - \theta_o} \cdot \sum_{n=1,3,5\dots}^{n=\infty} \frac{I_o\left(i \cdot \frac{n\pi r}{l}\right)}{\frac{n\pi\lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right) + I_o\left(i \cdot \frac{n\pi R}{l}\right)}$$

De term in de reeks voor  $n=3$  bedraagt reeds minder dan 1% van de term voor  $n=1$ ; wij kunnen dus met de eerste term der reeks volstaan.

Het verschil tusschen de warmtestroom aan de bovenzijde en aan de onderzijde van het monster bedraagt dus

$$(V_l - V_o) = 4 \cdot \frac{\theta_l + \theta_o}{\theta_l - \theta_o} \cdot \frac{I_o\left(i \cdot \frac{\pi r}{l}\right)}{\frac{\pi\lambda}{l\alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i \cdot \frac{\pi R}{l}\right) + I_o\left(i \cdot \frac{\pi R}{l}\right)} \quad (15)$$

Zooals uit de beschrijving van de gebruikte warmtestroommeters bekend is, strekt de eigenlijke meting van de hoeveelheid warmte zich slechts uit over een cirkel met een straal  $r=0,05$  m in het



centrum van de onderzochte schijven materiaal. De schijven hebben een straal  $R = 0,125$  m.

Voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt  $\alpha$ , die de warmteoverdracht door convectie-verschijnselen en straling van de rand van het monster aan de omgeving beschrijft, kan de waarde

$$\alpha = 10 \frac{\text{kcal.}}{\text{m}^2 \cdot \text{h.} \cdot \text{°C.}}$$

genomen worden. Deze waarde zal waarschijnlijk iets te hoog zijn, doch aangezien voor de beoordeeling van de nauwkeurigheid der metingen een majoratie van het verschil ( $V_l - V_o$ ) het beste resultaat levert, mag hiermede worden volstaan.

Met behulp van deze gegevens zijn de in tabel I gegeven waarden van de factor

$$\frac{I_o\left(i, \frac{\pi r}{l}\right)}{\frac{\pi \lambda}{l \alpha} \cdot i \cdot I_o\left(i, \frac{\pi R}{l}\right) + I_o\left(i, \frac{\pi R}{l}\right)}$$

berekend, waarin  $\lambda$  en  $l$  als variabelen optreden.

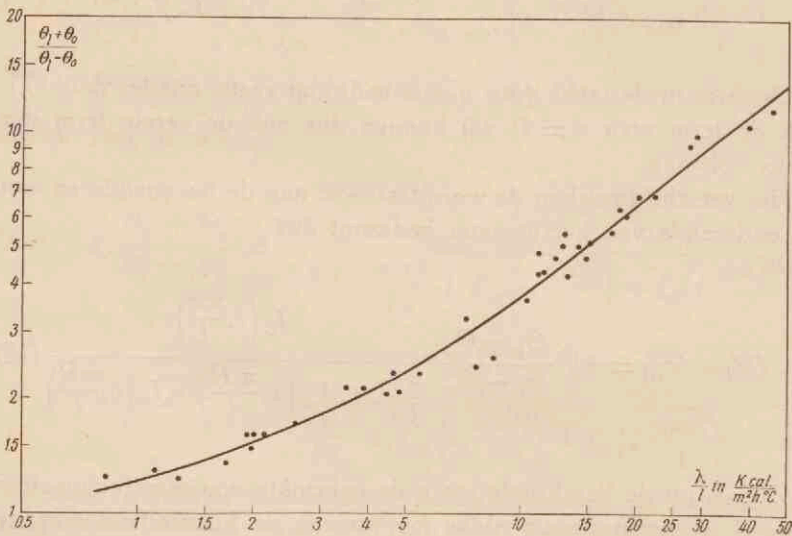


Fig 10.

TABEL I.

 $\lambda$  in kcal./m.h. °C.

$l$ in $m$	0.03	0.05	0.075	0.10	0.15	0.20	0.30	0.50	0.75	1.0	1.5
0.01	←				<	$10^{-8}$					↑
0.02	←				<	0.000008					↑
0.03	0.00048	0.00042	0.00035	0.00031	0.00025	0.00021	0.00016	0.00011	0.00008	0.00006	0.00004
0.04	0.0037	0.0033	0.0029	0.0026	0.0021	0.0018	0.0014	0.00095	0.0007	0.00055	0.0004
0.05	0.0125	0.0114	0.0102	0.0093	0.0078	0.0068	0.0053	0.0038	0.0027	0.0022	0.0015
0.06	0.029	0.026	0.024	0.022	0.019	0.0165	0.0135	0.0096	0.0071	0.0056	0.0040

Voor een groot aantal metingen, volgens de in hoofdstuk II, § 5 beschreven methode verricht, is de waarde van de temperatuurfactor

$$\frac{\Theta_1 + \Theta_0}{\Theta_1 - \Theta_0} \text{ in figuur 10 tegen } \frac{\lambda}{l} \text{ uitgezet.}$$

Aangezien het in het algemeen zeer goed mogelijk is om van een ter onderzoek ontvangen materiaal de warmtegeleidingscoëfficiënt in grove benadering te schatten, kunnen we thans met behulp van de bovenstaande tabel en van figuur 10 van te voren nagaan welke dikte het te onderzoeken monster hoogstens zal mogen hebben, om het verschil tusschen de boven en onder het monster gemeten warmtestroom tot b.v. 5 % te beperken <sup>1)</sup>.

### § 3. De invloed van de verliezen aan de rand.

Thans kunnen wij nog nagaan, hoe groot de fout is, die wij maken, indien wij bij de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt van het gemiddelde van de aan boven- en onderzijde der schijf gemeten warmtestroomen uitgaan.

De warmtestroom aan de bovenzijde van het monster bedraagt

$$\lambda \left\{ \frac{\Theta_1 - \Theta_0}{l} + \frac{\delta \vartheta}{\delta x} \right\}_{x = +\frac{l}{2}}$$

terwijl de warmtestroom aan de onderzijde op dezelfde wijze wordt weergegeven door de betrekking:

$$\lambda \left\{ \frac{\Theta_1 - \Theta_0}{l} + \frac{\delta \vartheta}{\delta x} \right\}_{x = -\frac{l}{2}}$$

Wanneer we het gemiddelde van de met behulp der schijfcalorimeters gemeten warmtestroomen voor de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt eenvoudig gelijk stellen aan  $\lambda \cdot \frac{\Theta_1 - \Theta_0}{l}$

<sup>1)</sup> Bovendien zal ook in vele gevallen de structuur van het te onderzoeken materiaal een minimale dikte van de schijf vereischen.

maken we dus een fout ter grootte van

$$\frac{\lambda}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{x=+\frac{l}{2}} + \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{x=-\frac{l}{2}} \right\}$$

Indien wij ook hier weer deze fout uitdrukken in de gemiddelde warmtestroom <sup>1)</sup>, dan vinden wij de volgende uitdrukking

$$\frac{V_l + V_o}{2} = 2 \cdot \sum_{n=2, 4, 6, \dots}^{\infty} \frac{I_o \left( i \cdot \frac{n \pi r}{l} \right)}{\frac{n \pi \lambda}{l \alpha} \cdot i \cdot I_o \left( i \cdot \frac{n \pi R}{l} \right) + I_o \left( i \cdot \frac{n \pi R}{l} \right)}$$

Ook in deze reeks is de tweede term ( $n=4$ ) reeds zeer klein ten opzichte van de eerste term ( $n=2$ ). Wij kunnen dus hier volstaan met de term voor  $n=2$ .

We hebben dan de betrekking

$$\frac{V_l + V_o}{2} = 2 \cdot \frac{I_o \left( i \cdot \frac{2 \pi r}{l} \right)}{\frac{2 \pi \lambda}{l \alpha} \cdot i \cdot I_o \left( i \cdot \frac{2 \pi R}{l} \right) + I_o \left( i \cdot \frac{2 \pi R}{l} \right)} \quad (16)$$

Uit de tabel I blijkt reeds, dat de waarde van deze breuk toeneemt met de dikte ( $l$ ) van het monster en met afnemende warmtegeleidingscoëfficiënt.

Berekenen wij hoe groot de fout zal zijn bij een dikte  $l=0,06$  m en een warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda=0,03$  kcal/m.h.<sup>o</sup> C. dan vinden we

$$\frac{V_l + V_o}{2} < 0,005 \text{ of } < 0,5 \%$$

D.w.z., dat de toegepaste rekenwijze ter bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt

<sup>1)</sup> Zie noot blz. 42.

$$\lambda = \frac{q \cdot l}{\Theta_1 - \Theta_0} \quad (17)$$

waarin  $q$  het arithmetisch gemiddelde van de boven en onder het monster gemeten warmtestroom per vierkante meter en per uur voorstelt, ook in een zeer ongunstig geval nog slechts een fout van ten hoogste  $\frac{1}{2}$  % geeft. In dit geval bedraagt het verschil ( $V_1 - V_0$ ) tusschen de warmtestroomen aan onder en bovenzijde reeds ongeveer 12 %, indien  $\frac{\Theta_1 + \Theta_0}{\Theta_1 - \Theta_0} = 1$  is.

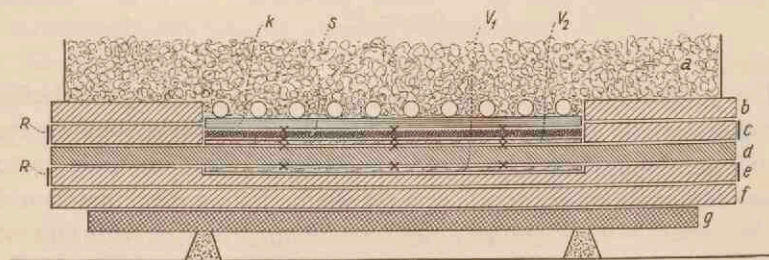
*De nauwkeurigheid van de methode van onderzoek wordt dus uitsluitend bepaald door de nauwkeurigheid, waarmede de schijfcalorimeters geijkt kunnen worden en door de nauwkeurigheid van de bepaling van het temperatuurverschil tusschen de beide oppervlakken van het te onderzoeken monster.*

## HOOFDSTUK IV.

### DE IJING DER SCHIJFCALORIEMETERS.

#### § 1. Het apparaat.

Het ijken van de schijfcalorimeters is met behulp van het in figuur 11 weergegeven apparaat geschied. De door de warmtestroommeter ( $s$ ) gevoerde warmte wordt geleverd door de verhitter ( $V_2$ ), bestaande uit een glazen plaat ter dikte van 3 mm, waarop een in bladtin van 0,1 mm dikte, overeenkomstig figuur 12, uitgesneden heen en weer gaande band is aangebracht. Deze band bestaat dus uit strooken bladtin van 5 mm breedte, op onderlinge afstanden van 1 mm.



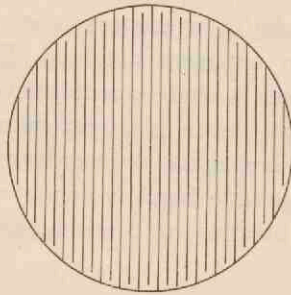
Figuur 11.

Het voordeel van een op deze wijze uit bladtin vervaardigde verhitter ten opzichte van de spiraalvorm is, dat in het midden-gedeelte van de verhitter, waar de meting wordt verricht, een zoo gelijkmatig mogelijke warmteontwikkeling over het oppervlak plaats vindt.

Op de schijfcalorimeter is een koperen plaat ( $k$ ) met een dikte

van 5 mm geplaatst. Hierop is een in spiraalvorm gewikkelde koperen buis gesoldeerd. Met behulp van een centrifugaalpompje wordt een constante waterstroom van ongeveer 2 Liter per minuut gevoerd door deze spiraalvormige buis. Het water wordt uit een groot reservoir gepompt en vloeit hierin terug.

De geheele aan de verhitter ( $V_2$ ) toegevoerde elektrische energie kan als door de schijfcalorimeters stroomende warmte in rekening gebracht worden, doordat onder ( $V_2$ ) een tweede verhitter ( $V_1$ ) aangebracht is, waarvan de energietoevoer zoodanig wordt ingesteld, dat de temperaturen op de scheidingsvlakken tusschen ( $V_2$ ) en de isolatieplaat (d) en tusschen ( $V_1$ ) en (d) gelijk zijn.



Figuur 12.

De isolatieplaat (d), met bekende warmtegeleidingscoëfficiënt, die tusschen de beide verhitters gebracht is, bewerkt, dat de correctie voor warmteverlies van de verhitter ( $V_2$ ) naar onderen toe tot slechts enkele procenten beperkt blijft, zelfs indien tusschen de beide oppervlakken van (d) nog een temperatuurverschil van ongeveer  $1^\circ$  C. bestaat. Door deze opstelling vervalt de noodzakelijkheid om de temperaturen der beide verhitters volkomen gelijk te maken, waardoor de voorbereidingen voor de eigenlijke meting minder tijd vorderen.

De randen (b) en (c) en de platen (e) en (f) zijn vervaardigd van isolatiemateriaal. Zij dienen tot beperking van de warmteverliezen der verhitters aan de randen en in benedenwaartsche richting. Op de isolatierand (b) is een ring geplaatst, waarbinnen een dikke laag isolatiemateriaal (a) de geheele stapel bedekt. De stapel

rust op de ijzeren schijf (g), die op drie kurken op een tafel is geplaatst.

Op elk der beide oppervlakken van de isolatieschijf (d) zijn 5 thermoelementen geplaatst, en wel één in het middelpunt en een viertal daaromheen in de hoekpunten van een vierkant en op een afstand van 7,5 cm van het middelpunt. Op dezelfde wijze zijn op de beide oppervlakken van de schijfcalorimeter (s) 5 thermoelementen geplaatst, waarbij echter de afstand van elk der 4 zijdelings geplaatste elementen tot het middelpunt 5 cm is genomen in verband met het feit, dat de eigenlijke warmtestroommeting zich ook slechts over het centrale gedeelte der schijfcalorimeter met een straal van 5 cm uitstrekt.

Alle thermoelementen bestaan uit koper- en constantaanband met een dikte van 0,1 mm en een breedte van 1 mm. Al de constantaanbandjes worden buiten de stapel in één klem vereenigd.

De beide verhitters zijn aangesloten op een accumulatorenbatterij, die voldoende capaciteit bezit om gedurende eenige etmalen een constante stroom te leveren.

Tenslotte kunnen wij nog vermelden, dat rondom de isolatierand (c) en de schijf (e) een enkele wikkeling van constantaanband (R) is aangebracht, om bij metingen bij temperaturen boven de kamertemperatuur door elektrische verwarming van deze wikkeling de warmteverliezen aan de rand te beperken.

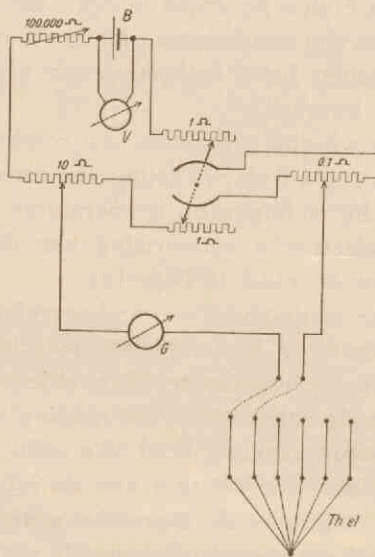
Daar de eigenlijke meting van warmtehoeveelheden in de schijfcalorimeters beperkt is tot het middelste gedeelte, bestaat in deze opstelling rondom het eigenlijke te ijken object een bescherming tegen verliezen aan de rand, die in de richting van de as van de stapel een temperatuurverdeeling bezit, die gelijk is aan de temperatuurverdeeling in dezelfde richting aan de rand van het cirkelvormige oppervlak, waarover de eigenlijke meting verricht wordt. Bovendien is daaromheen nog een isoleerende rand (b, c, d, e en f) aanwezig van ongeveer 10 cm breedte. Dank zij deze uitvoerige bescherming aan de rand van het eigenlijke in onderzoek zijnde gedeelte van de schijfcalorimeter, is de voor radiale verliezen aan te brengen correctie steeds zeer gering.

## § 2. De uitvoering van de meting.

Bij het begin der meting worden beide verhitters op een transfor-



mator aangesloten, die uit het stadsnet wordt gevoed. De door de transformator geleverde spanning is dan niet geheel constant, doch wel voldoende constant voor het instellen. De spanning komt overeen met de klemspanning van de later in te schakelen accumulatorenbatterij, waardoor een constante toevoer van warmte bereikt wordt. Gedurende deze eerste dagen wordt de stroomsterkte in de verhitser ( $V_1$ ) zoodanig ingesteld, dat in het midden van de stapel over de isolatieschijf (d) nagenoeg geen temperatuurverschil meer optreedt. Daarna vervangen wij de transformator door de accumulatorenbatterij. De geheele opstelling wordt in deze toestand tenminste 48 uren aan zich zelve overgelaten om zeker te zijn, dat gedurende de eigenlijke meting een volkomen stationnaire temperatuurverdeling bestaat.



Figuur 13.

Bij de meting bepalen wij in de eerste plaats het wattverbruik van de verhitser ( $V_2$ ) uit de gemeten waarden van de stroomsterkte en de spanning. Met behulp van een compensatieschakeling, weergegeven in figuur 13, meten wij de thermokracht, die door de warmtestroom in de schijfcalorimeter opgewekt wordt. Tevens worden

met dezelfde schakeling de optredende temperatuurverschillen bepaald. Deze meting doet tevens dienst ter berekening van eventueele correcties.

Door commutatie der aansluitingen van de batterij (B) en van de in de stapel aangebrachte thermoelementen (Th.el.) zijn de toevallige in de stroomkring optredende thermokrachten geëlimineerd. De galvanometer (G) wordt gebruikt als nulinstrument. De voltmeter (V) dient om de klemspanning van de voor de meting gebruikte batterij nauwkeurig te bepalen.

Gemeten zijn de temperatuurverschillen tusschen het middelste en de vier omliggende, op hetzelfde scheidingsvlak gelegen thermoelementen en dat tusschen elke twee thermoelementen boven elkaar op boven- en ondervlak van de isolatieschijf (d) gelegen. De temperatuur van elk der 4 in het centrum van de stapel geplaatste thermoelementen wordt ook met een in een met water gevuld Dewarvat geplaatst thermoelement vastgelegd. In het Dewarvat is een thermometer gestoken, waardoor de in de stapel optredende temperaturen werkelijk bepaald kunnen worden.

### § 3. De berekening van de ijkwaarde.

Daar het temperatuurgevoelige gedeelte van de schijfcalorimeters zich slechts over een cirkel met een straal van 5 cm, in het centrum gelegen, uitstrekt, worden zoowel de berekening van de in de verhitter ( $V_2$ ) ontwikkelde warmte als de bepaling der toe te passen correcties op dit gedeelte betrokken.

De totale aan de verhitter toegevoerde energie, berekend uit de meting van stroomsterkte en klemspanning, wordt dus herleid tot de over een oppervlak van  $\pi \cdot 0,05^2$  m<sup>2</sup> ontwikkelde warmte, uitgedrukt in kilocalorieën per uur. Dit gegeven moet worden gecorrigeerd voor het optredende verlies aan de randen, d.w.z. voor de totale radiale warmtestroom aan de rand van de cirkel  $r = 0,05$  m en voor de warmtestrooming door de isolatieschijf (d) van de eene verhitter naar de andere. Deze laatste correctie kan ten opzichte van de verhitter ( $V_2$ ) zoowel positief als negatief zijn.

Daar beide correcties, in verband met de reeds genoemde uitvoerige bescherming tegen radiale warmteverliezen en in verband met de van te voren vrijwel gelijk ingestelde temperaturen van onder- en bovenvlak van de schijf (d), hoogstens enkele procenten

van de totale in het midden ontwikkelde warmte bedragen, is het geoorloofd het radiale temperatuurverval in de verhitter met een benaderingsvergelijking te beschrijven.

Wij onderstellen, dat er een radiaal temperatuurverloop bestaat, dat met de formule

$$\Theta = \Theta_m \cdot (1 - a \cdot r^2) \quad (18)$$

te beschrijven is.

Hierin stelt  $\Theta$  de temperatuur voor op een cirkel met straal  $r$ ,  $\Theta_m$  de temperatuur in het middelpunt,  $a$  is een constante.

De metingen der temperaturen door middel van de thermoelementen op het bovenzvlak van de isolatieschijf ( $d$ ) direct onder de glasplaat van verhitter ( $V_2$ ) geven het radiale verloop van de temperatuur in deze glasplaat aan. Indien wij dit in rekening brengen door berekening van de radiale warmtestrooming in de glasplaat, moeten wij ons realiseeren, dat wij de radiale warmtestroom in de schijf ( $d$ ) verwaarloozen. Daar de dikte van de schijf ( $d$ ) ongeveer tweemaal zoo groot is als de som van de dikten van de glasplaten van de verhitters ( $V_1$  en  $V_2$ ), terwijl de warmtegeleidingscoëfficiënt van glas ongeveer 15 maal zoo groot is als die van de schijf ( $d$ ), maken wij hierdoor een fout, die  $\frac{2}{15}$  van de correctie voor de radiale warmtestroom in de glasplaat bedraagt. Deze correctie bedraagt hoogstens 1 % van de totale warmteontwikkeling van de verhitter, zoodat de bovengenoemde verwaarloozing een fout van ongeveer 1  $\frac{0}{00}$  in het eindresultaat van de meting tengevolge heeft.

Het totale radiale warmteverlies uit het centrale gedeelte der verhitter ( $r = 0,05$  m) zal dan bedragen:

$$- \lambda \cdot \left( \frac{d\Theta}{dr} \right) \cdot 2\pi r \cdot l = 4\pi \cdot \lambda \cdot \Theta_m \cdot a \cdot r^2 \cdot l \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Vullen we hierin in de dikte van de glasplaat  $l = 0,003$  m, de straal  $r = 0,05$  m en als warmtegeleidingscoëfficiënt van het glas de waarde  $\lambda = 0,7 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$ , dan vinden we voor het radiale verlies in de verhitter ( $V_2$ )

$$q_1 = 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot \Theta_m \cdot a \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Uit de metingen van de temperatuurverschillen van de vier zijdelings geplaatste thermo-elementen ten opzichte van het thermo-element in het centrum berekenen we een gemiddelde waarde voor het temperatuurverschil ( $\Theta_m - \Theta$ ) voor een cirkel met een straal van 7,5 cm. Met behulp hiervan kan uit de betrekking (18) de waarde van  $\Theta_m \cdot a$  worden afgeleid, waarmede dan de correctie voor de radiale warmtestroom in de glasplaat van de verhitter berekend kan worden.

De correctie voor de warmtestrooming door de isolatieschijf (d) van de eene verhitter naar de andere wordt berekend volgens de vergelijking:

$$q_2 = \lambda \cdot \frac{\bar{\Theta}_1 - \bar{\Theta}_2}{l} \cdot f \quad (2)$$

waarin  $\lambda$ , de warmtegeleidingscoëfficiënt van de schijf (d), gelijk is aan  $0,045 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$  en  $l$ , de dikte dezer schijf, gelijk aan 0,0125 m is. Het beschouwde oppervlak ( $f$ ) bedraagt  $\pi \cdot 0,05^2 = 0,00785 \text{ m}^2$ .  $\bar{\Theta}_1$  en  $\bar{\Theta}_2$  zijn de gemiddelde temperaturen over de beschouwde cirkel met een straal  $r = 0,05 \text{ m}$  in het centrum van boven en ondervlak van de schijf (d). Deze temperaturen zijn weer uit de gemeten temperatuurverschillen te berekenen met behulp van de vergelijking (18). Op elk der beide vlakken geldt n.l. de betrekking

$$\bar{\Theta} = \Theta_m \cdot \left(1 - \frac{a r^2}{2}\right)$$

waarin  $r = 0,05$  moet worden gesteld, terwijl  $\Theta_m \cdot a$  weer uit de metingen is te berekenen.

De als correctie in rekening te brengen warmtestroom door de schijf (d) bedraagt dan

$$q_2 = 0,0283 \cdot (\bar{\Theta}_1 - \bar{\Theta}_2) \frac{\text{kcal}}{\text{h}}.$$

Uit de thans nauwkeurig te berekenen hoeveelheid warmte, die door het centrale deel van de schijfcalorimeter van de verhitter ( $V_2$ ) naar de koelplaat (k) stroomt en uit de daardoor opgewekte

en gemeten E.M.K. van de schijfcaloriemeter wordt tenslotte als waarde voor de ijking het aantal kilocaloriën berekend, dat per uur en per  $m^2$  oppervlak, stroomende door de schijfcaloriemeter, een thermokracht in deze doet ontstaan van één millivolt.

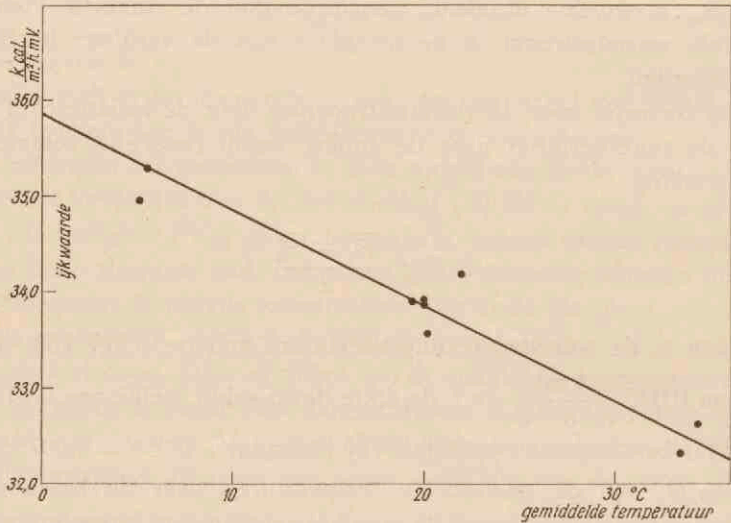


Fig. 14.

#### § 4. De resultaten van de ijking van een schijfcaloriemeter.

De oorspronkelijk vervaardigde warmtestroommeters bevatten slechts een beperkt aantal thermoelementen en waren in totaal 3 mm dik. De ijkwaarde bedroeg dienovereenkomstig ongeveer  $200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mV}$ . Bij de later vervaardigde exemplaren werd het aantal thermoelementen in de caloriemeters sterk vergroot, terwijl tevens de dikte werd gebracht op 5 mm, hetgeen, in verband met de in Hoofdstuk III berekende fouten ten gevolge van toenemende hoogte van de voor het materiaalonderzoek op te bouwen stapel, zonder bezwaren mogelijk was. Hierdoor werd de ijkwaarde teruggebracht tot ongeveer  $35 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mV}$ .

Bij de ijking van de schijfcaloriemeter No. VI werden de in Tabel II vermelde resultaten verkregen. Alle gegevens zijn betrokken op een cirkel met een straal  $r = 0,05 \text{ m}$  in het centrum van de stapel.

Deze resultaten zijn in figuur 14 tegen de gemiddelde temperatuur van de schijfcaloriemeter uitgezet. Bij de metingen No. 1 en 2 is deze gemiddelde temperatuur niet nauwkeurig bepaald.

TABEL II.

Meting No.	Warmte-ontwikkeling der verhitter $V_1$ $\frac{\text{kcal}}{\text{h.}}$	Correcties		E.M.K. van de schijfcaloriemeter in mV.	Ijkwaarde in $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h. mV.}}$	Gemiddelde temperatuur van de schijfcaloriemeter in $^{\circ}\text{C}$ .
		in $\frac{q_1}{\text{h.}}$	in $\frac{q_2}{\text{h.}}$			
1	0.5736	-0.0050	-0.0418	1.979	33.91	ca. 20
2	0.5681	-0.0047	-0.0042	2.103	33.88	ca. 20
3	0.5680	-0.0042	+0.0076	2.130	34.18	21.9
4	0.5579	-0.0062	+0.0023	2.163	32.62	34.3
5	0.4948	-0.0044	+0.0223	2.020	32.33	33.4
6	0.2084	-0.0009	+0.0103	0.826	33.58	20.1
7	0.2055	-0.0011	+0.0075	0.797	33.90	19.4
8	0.2137	+0.0017	+0.0800	1.076	34.97	5.1
9	0.2106	+0.0012	+0.0667	1.005	35.29	5.5

De bij meting No. 6 op de verschillende vlakken, waarop thermo-elementen zijn aangebracht, waargenomen temperaturen, zijn weergegeven in figuur 15.

De caloriemeter werd bij verschillende temperaturen en met verschillende aan de verhitter ( $V_2$ ) toegevoerde energieën geijkt om eventuele invloeden van veranderingen der omstandigheden op de meting en het eindresultaat te kunnen nagaan.

Uit de ijkwaarden in de tabel blijkt, dat zij van de temperatuur afhangen. Daarmede moet dus bij het gebruik der caloriemeters rekening worden gehouden. De variatie in de correctie's en de verandering der toegevoerde energie geven echter geen wijziging in het resultaat der ijking, zoodat uit dien hoofde de methode van ijking als betrouwbaar en nauwkeurig kan worden beschouwd.

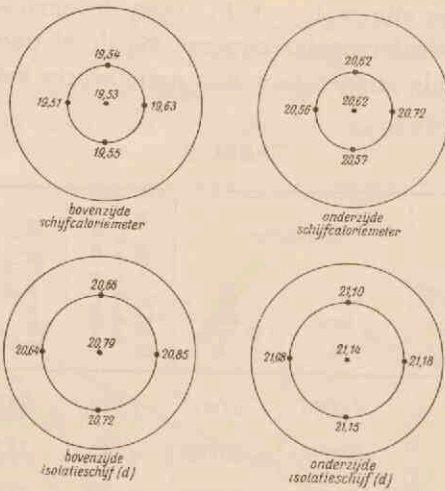


Fig. 15.

### § 5. De nauwkeurigheid van een ijking.

De nauwkeurigheid van de gevonden waarde van het energieverbruik van de verhitter wordt bepaald door de aflezingen van de gebruikte meetinstrumenten. Hetzelfde is het geval met de bepaling van de E.M.K., die door de schijfcalorimeter wordt ontwikkeld. De nauwkeurigheid van de aflezing van de meetinstrumenten mag in beide gevallen op  $\pm 0,3\%$  gesteld worden, zoodat hierdoor hoogstens een fout van  $\pm 0,9\%$  het gevolg kan zijn. De waarde der op de totale warmteontwikkeling van de verhitter ( $V_2$ ) toegepaste correcties bedraagt in het algemeen ongeveer  $4\%$  van deze grootte. Daar de correcties slechts met benadering zijn geschat, moeten we met de mogelijkheid rekening houden, dat tengevolge hiervan in het eindresultaat nog een fout van ongeveer  $1\%$  blijft bestaan. De totale nauwkeurigheid der ijking zal dan ongeveer  $1,5$  tot  $2\%$  bedragen.

De correctie voor de radiale warmteverliezen in de glasplaat van de verhitter en de correctie voor de warmtestroom door de isolatieschijf (d) kunnen positief of negatief worden ingesteld. Het is dus mogelijk door het verrichten van een aantal metingen aan elke schijfcalorimeter de mogelijke fout in de bepaalde ijkwaarde tot

beneden 1 % terug te brengen. Bij de verschillende metingen moeten dan de omstandigheden iets gevarieerd worden, terwijl als ijkwaarde het gemiddelde van de uit de afzonderlijke metingen verkregen waarden kan worden genomen.

De nauwkeurigheid, waarmede de voor de temperatuurmetingen gebruikte thermoelementen geijkt zijn, speelt hierbij uiteraard geen rol van eenige beteekenis.



## HOOFDSTUK V.

### HET ONDERZOEK NAAR DE WARMTEGELEIDING VAN ISOLEERENDE MATERIALEN MET BEHULP VAN DE SCHIJFCALORIEMETERS.

#### § 1. De uitvoering van het onderzoek.

De in § 5 van hoofdstuk II beschreven methode is reeds sedert eenige jaren bij de Warmte-Stichting in gebruik ter bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt van isoleerende materialen, die in de bouwtechniek, b.v. voor het isoleeren van woningen, gekoelde ruimten enz., gebruikt worden.

De thermokrachten van de schijfcalorimeters en van de verschillende combinaties van thermoelementen worden bepaald met behulp van een elektrische schakeling volgens *Lindeck*, die in figuur 16 is afgebeeld.

De stroom in de keten I, waarin geijkte weerstanden van  $0,1 \Omega$  tot  $0,004 \Omega$  zijn opgenomen, wordt met behulp van de regelbare weerstand van  $500 \text{ Ohm}$  zoodanig ingesteld, dat de kring II, waarin een tweetal thermoelementen is aangesloten volgens de aanwijzing van de draaispoelgalvanometer (G) stroomloos is. Zoodra deze toestand is bereikt, wordt op de milli-ampèremeter (mA) de stroomsterkte in de kring I afgelezen. Deze aflezing wordt herhaald, nadat zoowel de aansluitingen van de thermoelementen als de aansluiting van de batterij (B) en de meter (mA) zijn gecommuteerd. Door te commuteren worden, evenals bij de ijking der schijfcalorimeters, de fouten, tengevolge van toevallige in de keten optredende thermoelectrische krachten geëlimineerd.

Het product van het gemiddelde der beide gemeten stroomsterkten en de geijkte weerstand, waarover de kring II op de kring I is aangesloten, levert dan de waarde van de gezochte thermokracht.

De volledige resultaten van een meting zijn ter verduidelijking van het bovenstaande hieronder weergegeven:

De dikte van het onderzochte materiaal bedroeg gemiddeld

$$\frac{1}{5} \cdot (3,806 + 3,860 + 3,827 + 3,809 + 3,795) = 3,82 \text{ cm}$$

De temperatuur van de lucht in de omgeving van het apparaat werd op de kwikthermometer afgelezen en bedroeg  $20,8^\circ \text{ C.}$ , hetgeen volgens de ijking van de gebruikte thermoelementen met  $0,825 \text{ mV}$  overeenkomt.

Met behulp van de in de stapel aangebrachte thermoelementen werden verder de thermokrachten, die het gevolg zijn van de hierna genoemde temperatuurverschillen, gemeten.

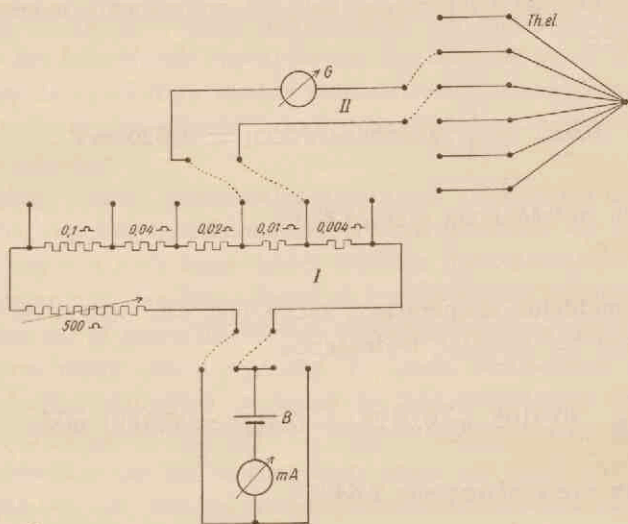


Fig. 16.

Het thermoelectrische aequivalent van het temperatuurverschil tusschen één der thermoelementen gelegen onder het te onderzoeken materiaal en het thermoelement in de lucht naast de kwikthermometer bedroeg  $0,046 \text{ mV}$ .

De thermokracht overéénkomende met het temperatuurverschil tusschen één der thermoelementen gelegen boven het te onder-

zoeken materiaal en het thermoelement in de lucht bedroeg 0,355 mV.

De thermokracht overéénkomende met het temperatuurverschil tusschen onder- en bovenzak van het te onderzoeken materiaal bedroeg op drie punten gemeten respectievelijk 0,3105 mV; 0,3125 mV; 0,311 mV.

De EMK van de schijfcalorimeter gelegen boven het te onderzoeken materiaal, was 0,0297 mV, terwijl de EMK van de schijfcalorimeter gelegen onder het te onderzoeken monster, 0,0518 mV was.

Uit deze gegevens werden berekend:

- a. De gemiddelde temperatuur van het onderzochte monster, bedragende:

$$0,825 + \frac{1}{2} \cdot (0,046 + 0,355) = 1,026 \text{ mV} .$$

hetgeen overéénkomt met 25,8° C.

- b. het gemiddelde temperatuurverschil tusschen onder- en bovenzak van het monster, bedragende

$$\frac{1}{3} \cdot (0,3105 + 0,3125 + 0,311) = 0,3113 \text{ mV} .$$

hetgeen overéénkomt met 7,64° C.

- c. de gemiddelde warmtestroom door het monster, die in verband met de ijkwaarden der schijfcalorimeters (resp. 136 en 241 kcal/m<sup>2</sup> . h . mV.) bedroeg :

$$\frac{1}{2} \cdot (0,0297 \cdot 241 + 0,0518 \cdot 136) = 7,1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mV}} .$$

De warmtegeleidingscoëfficiënt, geldend voor de gemiddelde temperatuur van  $21,8^{\circ}\text{C}$ ., kan nu worden berekend. Zij bedraagt volgens formule (17)

$$\frac{7,1 \cdot 0,0382}{7,64} = 0,0355 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

## § 2. De nauwkeurigheid van het onderzoek.

Een eventuele fout in de bepaling van het over het in onderzoek zijnde monster optredende temperatuurverschil wordt onverminderd in het eindresultaat teruggevonden. Dus moeten de gebruikte thermo-elementen zoo nauwkeurig mogelijk geijkt worden. *Verder moeten de thermo-elementen bij de plaatsing van een monster in het apparaat zoodanig worden aangebracht, dat hun temperatuur aan die van het betreffende oppervlak van het monster gelijk is.*

De goede aansluiting van de thermoelementen aan de oppervlakken van het te onderzoeken materiaal is door het aandrukken met flanel verkregen.

De ijking van de thermoelementen is met groote zorg uitgevoerd. Een stuk van het constantaan-band werd daarvoor aan beide uiteinden van een stuk koper-band voorzien. Een der beide lasschen van constantaan aan koper werd in een Dewarvat met een vulling van water en ijs gestoken, terwijl de andere lasch in een Dewarvat met warm water werd geplaatst. In beide Dewarvaten stak een geijkte kwikthermometer, waarvan de schaalverdeling een nauwkeurige aflezing tot op  $0,01^{\circ}\text{C}$ . toeliet. Gedurende de zeer langzame afkoeling van het warme water werd een groot aantal waarnemingen verricht, waarbij wederom van een compensatieschakeling gebruik werd gemaakt.

De bij het materiaalonderzoek gemeten temperatuurverschillen kunnen dientengevolge met een nauwkeurigheid van tenminste  $\pm 1\%$ , worden bepaald.

De nauwkeurigheid, waarmede de schijfcalorimeters geijkt zijn, bedraagt, zooals in hoofdstuk IV is vermeld,  $\pm 1\%$ , zoodat de waarschijnlijke fout in de uit een onderzoek van eenig materiaal berekende warmtegeleidingscoëfficiënt ten hoogste  $2\%$  zal bedragen.

### § 3. Resultaten.

Een groot aantal in de laatste jaren door mij in het laboratorium van de Warmte-Stichting bepaalde warmtegeleidingscoëfficiënten zijn in de volgende tabel vermeld. De resultaten, die verkregen zijn bij lage gemiddelde temperaturen, ongeveer  $0^{\circ}$  C, zijn bepaald met een apparaat, dat geheel in een koelkast is ondergebracht, zoodat dus de omgevingstemperatuur tijdens de meting beneden  $0^{\circ}$  C. kan worden gehouden. Eveneens kunnen metingen bij gemiddelde temperaturen hooger dan de normale kamertemperatuur worden uitgevoerd, door een afgesloten omgeving van het apparaat met een warmtebron een hooge temperatuur te geven.

Alle onderzoekingen van materialen worden normaal aan van te voren bij ongeveer  $80^{\circ}$  C. gedroogde monsters verricht. De monsters worden zoolang gedroogd, dat hun gewicht in ongeveer 24 uur geen verandering meer ondergaat. In enkele gevallen is echter om bijzondere redenen van deze werkwijze afgeweken. Het vochtgehalte van de materialen, die niet van te voren gedroogd zijn, is steeds in de hierna volgende tabel vermeld in procenten van het gewicht in droge toestand.

Eenige onderzochte monsters bestonden uit op elkaar bevestigde lagen van verschillende materialen. In dergelijke gevallen geeft de vermelde warmtegeleidingscoëfficiënt een voor de betreffende constructie geldend gemiddelde aan.

---

TABEL VAN RESULTATEN

Omschrijving van het materiaal	Volume- gewicht in $\frac{\text{kg.}}{\text{m}^3}$	Gemid- delde tem- peratuur in ° C.	$\lambda$ in $\frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^\circ \text{C.}}$
Ampas met cement vochtgehalte ca. 10 0/0 . . .	1250	23.2	0.240
Asbest-cement gewapend met ijzergaas van 1 mm. draaddikte en 20 mm maaswijdte . . . . .	1570	20.8	0.300
Idem . . . . .	1685	41.0	0.307
Idem . . . . .	1670	21.2	0.375
Zelfde monster met 16 0/0 vochtgehalte . . . . .	1925	20.6	0.670
Asbest-cement platen . . . . .	1615	19.4	0.232
Asbest-cement platen van bijzondere samenstelling	1058	23.4	0.141
Asbest vermengd met rubber . . . . .	1207	20.9	0.181
Asfalt vermengd met zand en rubber . . . . .	2125	18.8	0.569
Asfalt vermengd met latex en zand . . . . .	1690	20.8	0.350
<b>Betonsoorten.</b>			
Bimsbeton . . . . .	1400	19.5	0.315
Idem . . . . .	1102	23.1	0.187
Bimsbeton vervaardigd van hoogovenbimskor- rels van 5—20 mm korrelgrootte . . . . .	660	19.2	0.104
Idem van 0—5 mm korrelgrootte . . . . .	790	18.8	0.110
Gasbeton, vochtgehalte ca. 16 0/0 . . . . .	510	19.7	0.104
Idem, vochtgehalte ca. 13 0/0 . . . . .	765	23.1	0.142
Zeer poreuze beton (zoogenaamde schuimbeton)	310	19.2	0.065
		34.7	0.072
Idem, vochtgehalte $2\frac{1}{2}$ 0/0 . . . . .	314	21.7	0.070
Zelfde monster, vochtgehalte $1\frac{1}{2}$ 0/0 . . . . .	308	0.7	0.0615
Idem . . . . .	280	19.2	0.0545
Zelfde materiaal vochtgehalte 12.7 0/0 . . . . .	300	17.3	0.062
Idem . . . . .	425	18.8	0.099
Bimskorrels (hoogovenbims) 5—20 mm . . . . .	460	20.5	0.080
Idem 0—5 mm . . . . .	685	21.5	0.0895
Cement-tegel met deklagen van asbestcement en rubber . . . . .	1933	21.8	0.322
Idem . . . . .	1986	22.3	0.349
Cement-product met steenachtige bestanddeelen	1485	20.2	0.460
<b>Ebonietsoorten:</b>			
Eboniet gewapend met metaalgaas en bedekt met een laag zachte rubber . . . . .	1550	20.2	0.133
Zeer poreus eboniet-materiaal (zoogen. schuim- eboniet) . . . . .	47.5	24.0	0.0395
Idem . . . . .	80	22.9	0.030
Idem . . . . .	78	19.8	0.0285
Idem in losse stukjes van ca. 25 mm . . . . .	51.6	20.5	0.0310
Zeer poreus eboniet-materiaal (zoogen. schuim- eboniet) in de poriën H <sub>2</sub> S houdend . . . . .	61.5	20.4	0.0255

Omschrijving van het materiaal	Volume- gewicht in $\frac{\text{kg.}}{\text{m}^3}$	Gemid- delde tem- peratuur in ° C.	$\lambda$ in kcal. m.h. ° C.
Estrich, zaaqsel met cement . . . . .	1385	23.5	0.382
Gips, poreus . . . . .	660	20.4	0.091
Glaswol, ligging der vezels onregelmatig . . . .	58	17.7	0.0285
Idem . . . . .	49	21.6	0.028
Idem . . . . .	35.2	19.9	0.0315
Zelfde materiaal vaster samengeperst . . . . .	52	19.9	0.029
Golfkarton, één gegolfde laag van 8 mm dikte aan één zijde met 1 mm karton, aan de andere zijde met 2 mm bedekt . . . . .	273	19.6	0.0525
Idem aan beide zijden 2 mm karton als afdekking Idem bestaande uit 2 gegolfde lagen gescheiden en afgedekt met 2 mm karton . . . . .	329	20.4	0.055
	283	19.6	0.0575
<b>Houtproducten :</b>			
Balsa hout . . . . .	121	18.2	0.0435
Multiplex, gebakeliseerd . . . . .	1394	25.7	0.247
Okoumé-tri-plex . . . . .	483	19.6	0.076
		2.5	0.0705
Idem met andere lijmsort . . . . .	532	20.2	0.085
		2.3	0.0785
Houtwol met magnesiet tot platen geperst . . .	341	19.9	0.0835
Houtwol met cement tot platen geperst, houtwol- vezels 4 mm breed . . . . .	278	22.7	0.059
Idem houtwolvezels 2 mm breed . . . . .	270	22.4	0.055
Idem idem . . . . .	280	20.7	0.055
Houtspaanders met cement tot platen geperst .	455	22.0	0.077
Houtspaanders met een onbekend bindmiddel tot platen geperst . . . . .	355	24.4	0.0605
Zelfde materiaal, vochtgehalte 4% . . . . .	369	23.8	0.066
Houtvezels met kieselguhr tot platen geperst .	482	23.6	0.068
Idem . . . . .	591	23.9	0.082
Idem . . . . .	703	24.6	0.111
Idem . . . . .	731	25.0	0.103
Houtvezel-isolatiebord . . . . .	233	18.4	0.0425
Idem . . . . .	232	20.6	0.037
Idem . . . . .	232	19.9	0.036
Zelfde materiaal, vochtgehalte 6% . . . . .	246	19.4	0.039
Houtvezel-isolatiebord . . . . .	320	22.5	0.0465
		45.0	0.052
Kieselguhr uitsluitend bestaande uit naaldvor- mige diatomeeën, met water vermengd tot een plaat gegoten en gedroogd . . . . .	186	16.2	0.035

Omschrijving van het materiaal	Volumegewicht in $\frac{\text{kg.}}{\text{m}^3}$	Gemiddelde temperatuur in ° C.	$\lambda$ in kcal. m.h. ° C.
<b>Kurksoorten :</b>			
Fijne kurkkorrels met cement vermengd . . . . .	412	21.1	0.059
Idem . . . . .		0.1	0.054
Idem . . . . .	635	20.3	0.094
Geprepareerde fijne kurkkorrels met Portland- cement tot pleister verwerkt . . . . .	530	18.7	0.0695
Geëxpandeerde kurk in platen . . . . .	133	5.1	0.0305
Idem . . . . .	109	0.7	0.0295
Idem . . . . .	117	-1.1	0.0305
Idem . . . . .	132	6.2	0.0295
Idem . . . . .	109	22.9	0.034
Idem . . . . .		1.2	0.031
Idem . . . . .	125	-0.7	0.032
Idem . . . . .		41.3	0.0395
Idem . . . . .	146	-2.3	0.0305
Idem . . . . .	121	0.8	0.028
Idem . . . . .	122	25.8	0.0355
Idem . . . . .		3.3	0.0315
Idem . . . . .	116	1.8	0.0315
Idem . . . . .	98.5	4.1	0.030
Idem . . . . .	150	-2.5	0.033
Idem . . . . .	116	-5.0	0.0325
Idem . . . . .	112	49.0	0.0385
Idem . . . . .	151	41.3	0.0395
Idem . . . . .	74.7	7.4	0.0295
Idem, vochtgehalte 38 % . . . . .	257	5.6	0.054
Geëxpandeerde-geïmpregneerde kurkplaten (pek als bindmiddel) . . . . .	230	20.5	0.039
Gebakeliseerde reinkurkkorrels tot plaat geperst	341	21.9	0.0485
Geëxpandeerde kurkkorrels ca. 15 mm . . . . .	71	19.6	0.038
Idem, verder geëxpandeerd . . . . .	50	20.1	0.035
Idem, ca. 3 mm . . . . .	71	20.9	0.033
		-2.2	0.029
Riet, tot platen geperst . . . . .	304	24.3	0.065
		7.1	0.054
<b>Rubberproducten :</b>			
Plaat bestaande uit een laag rubber met kurk vermengd en een laag rubber met marmer- gruis vermengd . . . . .	1577	22.2	0.232
Rubber met zand of dergelijk materiaal vermengd	1582	19.6	0.361
Idem (andere mengverhouding) . . . . .	1575	21.0	0.265
Sponsrubberplaat . . . . .	448	20.1	0.065
Slakken (hoogovenslakken) . . . . .	489	21.1	0.099
Idem . . . . .	322	20.3	0.077



Omschrijving van het materiaal	Volumegewicht in $\frac{\text{kg.}}{\text{m}^3}$	Gemiddelde temperatuur in $^{\circ}\text{C.}$	$\lambda$ in $\frac{\text{kcal.}}{\text{m.h. } ^{\circ}\text{C.}}$
<b>Steensoorten :</b>			
Poreuze gebakken steenen . . . . .	1200	23.2	0.185
Idem . . . . .	850	22.4	0.164
Idem . . . . .	1110	22.4	0.255
Idem . . . . .	910	20.8	0.199
Idem . . . . .	980	17.7	0.218
Idem . . . . .	1150	19.0	0.265
Idem . . . . .	710	18.6	0.149
Idem . . . . .	1360	22.8	0.340
Idem . . . . .	1300	23.2	0.290
Idem . . . . .	895	23.5	0.162
Gebakken isolatie-steen . . . . .	495	25.4	0.0785
Idem . . . . .	492	25.8	0.086
Idem . . . . .	615	26.1	0.101
Idem . . . . .	560	27.1	0.092
Tegels, zeer hard materiaal ( <i>niet gebakken</i> ) . .	1520	22.2	0.284
Idem . . . . .	1560	22.4	0.328
Vilt tusschen twee lagen gebitumineerd papier .	116	19.6	0.0285
Vilt . . . . .	158	20.8	0.030
Zelfde materiaal, aan 1 zijde met een dunne laag asbest bespoten . . . . .	218	19.4	0.0305
Zelfde materiaal, aan 1 zijde met bitumen en grof zand bedekt . . . . .	320	19.4	0.0365
Zelfde materiaal, aan 1 zijde met bitumen en grof zand, aan de andere zijde met bitumen bedekt . . . . .	351	20.3	0.0375
Hard vilt . . . . .	280	20.1	0.0355

#### § 4. Conclusies.

Het is mogelijk om met behulp van een tweetal warmtestroommeters de warmtegeleidingscoëfficiënt van bouw- en isolatiematerialen te bepalen met een nauwkeurigheid van tenminste  $\pm 2\%$ . De benodigde warmtestroommeters (schijfcalorimeters), zijn speciaal voor dit doel geconstrueerd en moeten met zorg worden geijkt.

Het eigenlijke onderzoek van een materiaal geschiedt dan in een apparaat, waarin een vlak cirkelvormig monster van het materiaal wordt geplaatst tusschen twee warmtestroommeters, terwijl door deze stapel vanaf één zijde een constante warmtestroom wordt gestuurd. De voordeelen van deze methode van onderzoek ten opzichte van de thans algemeen gebruikelijke „methode-Poensgen” zijn:

- 1e. grootere nauwkeurigheid van het eindresultaat.
  - 2e. kortere duur van het onderzoek.
  - 3e. geringere hoeveelheid benodigd materiaal.
  - 4e. eenvoudigere inrichting van het apparaat.
  - 5e. eenvoudigere uitvoering van het onderzoek.
-

## SUMMARY.

A study of the methods for the determination of the thermal conductivity of solid non-metallic materials shows that at the present time the method of P o e n s g e n (12) is almost generally used.

Various investigators, applying this method, have changed small details, each one according to his own insight, but all make use of the energy, dissipated by an electric heater as a measure of the quantity of heat, that flows through the material to be investigated. If, instead, one measures the flow of heat below and above the material investigated with the aid of disk- calorimeters, constructed especially for this purpose, one avoids the necessity of taking special care that the total amount of heat, developed by the heater, will flow through the sample.

The result hereof is an appreciable simplification and shortening of the investigation and furthermore the probable error in the final result can be reduced below 2 % as an upper limit.

---

## LITTERATUURPGAVE.

1. J. B. Fourier: *Annales de chimie et de physique*, 1828.
2. J. C. Pécllet: *Annales de chimie et de physique*, 1841.
3. J. Tyndall: *Philosophical magasin*, 5 en 6, 1853.
4. L. Graetz: *Handbuch der Physik von A. Winkelmann*, III, 1906.
5. M. Heyberger: *Bulletin du Laboratoire d'essais du Conservatoire nationale des Arts et Métiers*, No. 22, 1927.
6. Ch. H. Lees: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A, 191, 1898.
7. F. M. Focke: *Wiedemann's Annalen*, 67, 1899.
8. W. Nusselt: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 52, 906, 1908.
9. H. Gröber: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 54, 1319, 1910.
10. R. Biquard: *C. R. des séances de l'Académie de Sciences*, 44, 829, 1910.
11. F. Bacon: *The Electrician*, 65, 938.
12. R. Poensgen: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 56, 1653, 1912.
13. M. Jakob: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 63, 10, 1919.
14. Osc. Knoblauch, E. Raisch, H. Reiher: *Gesundheits-Ingenieur*, 43, Heft 52, 1920.
15. M. Jakob: *Zeitschrift für technische Physik*, 7, 475, 1926.
16. E. Griffiths: *Proceedings of the Physical Society*, 41, No. 227, 1929.  
E. Griffiths: *Collected Researches of the National Physical Laboratory*, XIX, paper 1, 1926.  
E. Griffiths: *Building Research, technical paper No. 6*, 1928.
17. *Mitteilungen aus dem Forschungsheim für Wärmeschutz (E.V.) München*, Heft 5, 1924.
18. H. Gröber: *Einführung in die lehre von der Wärmeübertragung*, Julius Springer, Berlin, 1926.

19. M. ten Bosch: Die Wärmeübertragung, 2e druk, Julius Springer, Berlin, 1927.
20. E. Schmidt: Archiv für Wärmewirtschaft, 9, 1924.
21. H. S. Carslaw: Mathematical theory of the conduction of heat in solids, 2e druk, Mac. Millan and Co., 1921.
22. H. Gröber und S. Erk: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, Julius Springer, Berlin, 1933.

## INHOUD.

	Bladz.
VOORWOORD . . . . .	5
HOOFDSTUK I. ALGEMEENE INLEIDING	
§ 1. Probleemstelling . . . . .	7
§ 2. Historisch overzicht . . . . .	9
HOOFDSTUK II. DE METHODE VAN ONDERZOEK VAN DE WARMTE-STICHTING EN HAAR ONTSTAAN	
§ 1. De algemeene gedachtengang . . . . .	22
§ 2. De absolute meting . . . . .	23
§ 3. De vergelijkende meting . . . . .	25
§ 4. De resultaten der absolute en vergelijkende meting van glas en insulite . . . . .	27
§ 5. Het onderzoek met behulp van schijfcalorimeters .	30
HOOFDSTUK III. DE BEREKENING VAN DE INVLOED DER VER- LIEZEN AAN DE RAND	
§ 1. De warmtestrooming in een cirkelvormige mate- rialschijf . . . . .	35
§ 2. De verliezen aan de rand . . . . .	41
§ 3. De invloed van de verliezen aan de rand . . . .	46
HOOFDSTUK IV. DE IJKING DER SCHIJFCALORIEMETERS	
§ 1. Het apparaat . . . . .	49
§ 2. De uitvoering van de meting . . . . .	51
§ 3. De berekening van de ijkwaarde . . . . .	53
§ 4. De resultaten van de ijkking van een schijfcalorie- meter . . . . .	56
§ 5. De nauwkeurigheid van een ijkking . . . . .	58

HOOFDSTUK V. HET ONDERZOEK NAAR DE WARMTEGELEI-  
DING VAN ISOLEERENDE MATERIALEN MET BEHULP  
VAN DE SCHIJFCALORIEMETERS

§ 1. De uitvoering van het onderzoek . . . . .	60
§ 2. De nauwkeurigheid van het onderzoek . . . . .	63
§ 3. Resultaten . . . . .	64
§ 4. Conclusies . . . . .	69
SUMMARY . . . . .	70
LITTERATUUROPGAVE . . . . .	71







## STELLINGEN

---

### I.

Bij de bepaling van de aequivalente warmtegeleidingscoëfficiënt van isoleerende materialen in het laboratorium moet de in de practijk in het materiaal optredende temperatuurverdeling worden nagebootst.

### II.

Voor het meten van luchttemperaturen, o.a. op meteorologische stations, verdienen thermo-elementen de voorkeur.

### III.

Elk systeem van verwarming eischt bij de bouw van woningen uit een oogpunt van economie de toepassing van constructies, die in warmte-isoleerende eigenschappen zijn aangepast aan de kostprijs der geproduceerde warmte.

### IV.

Bij de bestudeering van de oorzaken, die tot doorslag van met olie geïsoleerde hoogspanningskabels leiden, dient aandacht te worden geschonken aan de polimerisatie-verschijnselen, die kunnen optreden aan de roodkoperen geleider.

E. B. Baker and H. A. Boltz, *Phys. Rev.* 51, 275, 1937.

### V.

De door W. Heisenberg vermelde overeenstemming van de onderlinge verhouding der door W. Wefelmeier afgeleide massadefecten van atoomkernen, bestaande uit 3, 4 en 5  $\alpha$ -deeltjes, met de onderlinge verhouding der experimenteel voor de corresponderende kernen bepaalde massadefecten verbetert aanzienlijk, indien men een andere rangschikking van de  $\alpha$ -deeltjes aanneemt.

W. Heisenberg, *Ned. Tijdschr. v. Nat.* VI, 89, 1939.

## VI.

Voor het meten van de snelheidsverdeling van langzame electronen verdienen de methoden met teller de voorkeur boven die met de Wilsonkamer.

## VII.

Internationale normalisatie van geluidsterkte-éénheden is dringend gewenscht.

0

5







