

Meting van de oppervlaktetemperatuur met behulp van een
Infrarood-Radiometer in het traject van 0°C tot 50°C
F. W. T. Penning de Vries

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemid-
delen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onder-
zoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking.

deputé
de la région

de la région
de la région

de la région
de la région

de la région
de la région
de la région
de la région
de la région

de la région
de la région
de la région
de la région
de la région

de la région
de la région
de la région
de la région
de la région

Inleiding

Bij het onderzoek naar fysiologische en fysische verschijnselen is een temperatuurmeting vaak van groot belang. Dikwijls wordt hiervoor een kwik- of alcoholthermometer gebruikt. De meting berust hierbij op het constateren van een volumeverandering van de vloeistof als gevolg van een temperatuurverandering. De temperatuurmeting met behulp van een thermokoppel of een thermistor, heeft het voordeel dat deze meting eenvoudig uitvoerbaar is en tevens dat deze registreerbaar gemaakt kan worden. De temperatuurgevoelige elementen zijn klein, en daardoor gemakkelijk ergens te plaatsen; door de geringe warmtecapaciteit kunnen ook snelle temperatuurveranderingen goed waargenomen worden.

Bovengenoemde methoden kunnen echter niet of moeilijk toegepast worden voor het meten van oppervlaktetemperaturen indien de temperatuur in de grenslaag sterk verloopt, hetgeen bij bladeren of in een gewas veelvuldig het geval is. De afmetingen van het temperatuurgevoelige element zijn dan groot ten opzichte van de dikte van de grenslaag en ook is een goed contact met het oppervlak moeilijk te realiseren. Door de geringe warmtecapaciteit van een blad of vegetatie zal de temperatuur ervan, afhankelijk van de energiebalans, zich snel instellen en kan hierbij hoger of lager zijn dan de omgevingstemperatuur. Volgens RASCHKE (1) is het bekend zijn met de temperatuur van het gewasoppervlak van groot belang, omdat deze een indicatie kan geven over de watervoorziening van planten.

Met behulp van een infrarood-radiometer kan de energie, die een object ten gevolge van zijn temperatuur uitzendt, gemeten worden. De hoeveelheid uitgestraalde energie is van de temperatuur afhankelijk. Aangezien deze energie, uitgezonden in de vorm van langgolvlige straling, niet of nauwelijks door de luchtlaag tussen object en meetapparatuur wordt geabsorbeerd, kan de straling op enige afstand gemeten worden. De oppervlaktetemperatuur van het object is uit de gemeten waarde te berekenen.

Fysisch principe van de meting van de oppervlaktetemperatuur

In het meetinstrument wordt de door een oppervlak uitgezonden stralingsenergie door een thermozuiltje geabsorbeerd, hetgeen een elektrische spanning veroorzaakt. Deze spanning kan worden versterkt en vervolgens waargenomen en geregistreerd.

11/21/44

Dear Sir:

I have the pleasure to inform you that your order for 100 units of Model 100 has been received and is being processed.

The estimated shipping date is approximately 4 weeks from the date of this letter.

Should you have any questions, please contact the undersigned.

Sincerely,
 J. Edgar Hoover

Enclosed for you are 100 units of Model 100, as ordered.

The units are packed in 10 cartons, each containing 10 units.

The shipping charges are \$10.00 per carton, for a total of \$100.00.

The units are guaranteed to be free of defects for a period of 12 months.

Very truly yours,
 J. Edgar Hoover

THIS DOCUMENT CONTAINS NEITHER RECOMMENDATIONS NOR CONCLUSIONS OF THE FBI.

It is the policy of the FBI to disseminate information to the public in order to prevent the occurrence of acts of violence and to maintain the peace.

The information contained in this document is for informational purposes only and should not be used as a basis for any action.

Very truly yours,
 J. Edgar Hoover

Het verband tussen de oppervlaktetemperatuur van een object en de uitgestraalde energie kan volgens de wet van Stefan-Boltzmann worden weergegeven door de formule

$$E = A c_1 T^4 \quad (1)$$

hierin is

E de totaal uitgezonden stralingsenergie in $\text{cal cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$

A de absorptiefactor van het stralende oppervlak

c_1 een constante ($1,37 \times 10^{-12} \text{ cal cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$)

T de absolute temperatuur van het object in $^\circ\text{K}$

Het energiespectrum van temperatuurstraling is sterk asymmetrisch; volgens WIEN is de golflengte met de grootste hoeveelheid energie omgekeerd evenredig met de absolute temperatuur:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{C}{T} \quad (2)$$

λ_{max} is de golflengte in μ

C is een constante ($2940 \mu \text{ } ^\circ\text{K}$)

Het kortgolvlige zonlicht vertoont een maximum bij een golflengte van 0.45μ en 98% van de totale stralingsenergie ligt tussen 0.2 en 4.5μ . De door de aarde uitgezonden straling, voornamelijk langgolvlige, heeft een maximale intensiteit bij ongeveer 10μ en 99% van deze straling heeft een golflengte groter dan 5μ . Het meten van de temperatuur in het gebied van 0 tot 50°C moet zich dus uitsluitend richten op de langgolvlige straling.

De netto straling, die de thermozuil ontvangt, is het verschil tussen de inkomende straling van een object (met temperatuur T_1 en absorptiefactor A_1) en de uitgaande straling van de thermozuil (met temperatuur T_2 en absorptiefactor A_2):

$$\Delta E = c_1 (A_1 T_1^4 - A_2 T_2^4) \quad (3)$$

On the other hand, the fact that the...
non-... ..

... ..
... ..

... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

Om het apparaat zo gevoelig mogelijk te maken voor de langgolvlige straling wordt de thermozuïl met een poeder bedekt, waardoor $A_2 = 1$. De absorptiefactor voor langgolvlige straling van gewassen blijkt een waarde te hebben die slechts weinig van 1 verschilt (van 0,95 tot 1,00), zodat met een geringe onnauwkeurigheid ook $A_1 = 1$ gesteld kan worden. De hoeveelheid inkomende straling kan bepaald worden door (a) een meting, waarbij de temperatuur van de thermozuïl in evenwicht is met die van het te meten object; van deze waarde moet worden afgetrokken de waarde van (b) een meting waarbij de temperatuur van de thermozuïl gelijk is aan die van een object. Deze laatste toestand wordt bereikt door de thermozuïl af te schermen met een glasfilter (dat ondoorlaatbaar is voor langgolvlige straling) van dezelfde temperatuur.

De temperatuur van de thermozuïl verandert indien ΔE van 0 verschilt en deze zeer geringe wijziging (vrijwel steeds kleiner dan 0.1°C) is rechtevenredig met de netto straling. De temperatuurverandering is rechtevenredig met de ontstane elektrische spanning, zodat voor het gemeten potentiaalverschil moet gelden:

$$\Delta V = c_2(T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

ΔV potentiaalverschil tussen de polen van de thermozuïl

c_2 constante die de gevoeligheid van de thermozuïl aangeeft

Na het vaststellen van de constanten c_1 en c_2 en het meten van T_2 en ΔV , kan uit (4) de oppervlaktetemperatuur T_1 berekend worden.

De thermozuïl ontvangt zowel langgolvlige als kortgolvlige straling. Het is voor een goede meting van belang dat alleen de eerste de thermozuïl beïnvloedt. Dit wordt bereikt door:

- a Het gebruik van een glasfilter, dat de kortgolvlige straling goed doorlaat (transmissie circa 90%), zodat de thermozuïl bij geopende en gesloten toestand van het glasfilter vrijwel evenveel kortgolvlige straling ontvangt;
- b Het gebruik van een mengsel van titanium- en magnesiumoxidepoeder op de thermozuïl, hetgeen een lage absorptiefactor heeft voor zichtbaar licht en een hoge voor langgolvlige straling.

De door kortgolvlige straling geïntroduceerde fout is dientengevolge gering.

Beschrijving van de infrarood-radiometer

De gebruikte radiometer bestaat uit een massief koperen blok (a)*. Onderin een gat (b) is de thermozuil (c) geplaatst die met Ti_2O_3 en MgO bedekt is. De wand van het boorgat was gezwart om reflectie van straling te voorkomen. Het boorgat kan door middel van een glasfilter (d) afgesloten worden. Dicht bij het glasfilter kan in het koper de temperatuur van het blok worden gemeten met een thermokoppel (e) (koper-constantaan, 41. V per $^{\circ}C$). Daar koper een goede warmtegeleider is kan de temperatuur in het gehele blok gelijk verondersteld worden. De zijkanten werden geïsoleerd met een laag tempex (f), terwijl boven- en onderzijde met kunststof (g) bedekt waren. Bovendien werden de zijkanten met aluminium (h) afgedekt. Deze isolatie heeft tot doel snelle temperatuurveranderingen van de thermozuil te voorkomen. Aan het geheel was een handvat bevestigd.

De maximale hoek ten opzichte van de as waarbij binnenvallende straling de thermozuil nog bereikt is bij dit apparaat ongeveer 18° , de berekende waarde bleek ook in de praktijk te kloppen (Figuur 2). Uit fig. 2 blijkt dat, naarmate een punt verder uit het centrum van het gezichtsveld verwijderd is de invloed ervan op de thermozuil afneemt, omdat vanaf dit punt de energiestroom voor een groot deel onderbroken wordt. Een cirkel, die in het centrum van het gezichtsveld ligt, met een vierde van de gezichtsveldoppervlakte levert ongeveer drievierde van de hoeveelheid stralingsenergie die op de thermozuil valt. Hiermee rekening houdend kan de volgende tabel opgesteld worden:

* De letters tussen haakjes verwijzen naar de overeenkomstige delen in fig. 1a en 1b.

afstand radiometer-object (cm)	diameter gezichtsveld (cm)	diam. belangrijkste deel van gezichtsveld (cm)
0	1,2	1,0
1	1,9	1,5
2	2,6	1,7
2,5	2,9	2,0
5	4,7	2,8
7,5	6,4	3,7
10	8,1	4,5
15	11,5	6,3
20	15	8,0
25	18	9,7
50	36	18
100	70	35

IJking van de radiometer

De radiometer werd geijkt in een ruimte waarin de temperatuur van de lucht, en daardoor ook die van de radiometer, instelbaar was. Het object waarmee geijkt werd was een waterbad ($A_{\text{water}} \approx 0,95$) waarvan de temperatuur met een kwikthermometer werd vastgesteld. Het water werd krachtig geroerd om afkoeling van het straling-emitterende bovenvlak door verdamping te voorkomen. De radiometer bevond zich ongeveer 5 cm boven het wateroppervlak. Om te vermijden dat langgolvlige straling vanuit de omgeving door reflectie op het wateroppervlak de thermozuil zou bereiken was het waterbad afgedekt.

De output van de radiometer (4 tot 5 μV per $^{\circ}\text{C}$, afhankelijk van de temperatuur van de thermozuil) werd versterkt (KEITHLEY 150 A, microvolt-ammeter) en geregistreerd (Servogor Kompensationsschreiber RE 511). Door het glasfilter beurtelings voor de opening te houden en weer weg te trekken wordt een registratie verkregen (Figuur 3). De meting verloopt traag omdat de insteltijd van de radiometer varieert van een halve tot een hele minuut, afhankelijk van de grootte van het temperatuurverschil.

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

admission

Het verband tussen de grootte van het verschil in spanning ΔV van de thermozuil (in figuur 3 de afstand d) en $(T_1^4 - T_2^4)$ bleek volgens verwachting (formule 4) lineair (Figuur 4). De tangens van deze lijn geeft de gevoeligheid van de radiometer aan. De formule voor deze lijn is

$$\Delta V = (5,47 \pm 0,05) \times 10^{-8} \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

ΔV wordt gegeven in μV

$(T_1^4 - T_2^4)$ in $^{\circ}K^4$

de dimensie van de constante is $\mu V \cdot ^{\circ}K^{-4}$

Het temperatuurverschil tussen objectoppervlakte en radiometer kan nu als volgt worden berekend.

Indien $(T_1 - T_2) \ll T_2$ geldt bij goede benadering

$$(T_1^4 - T_2^4) = 4T_2^3 (T_1 - T_2)$$

dan kan (5) geschreven worden als

$$\Delta V = (5,47 \pm 0,05) 10^{-8} \times 4 \times T_2^3 (T_1 - T_2)$$

Dus:

$$T_1 - T_2 = \frac{\Delta V}{(21,9 \pm 0,2) 10^{-8} \times T_2^3} \quad (6)$$

De temperatuur van de radiometer (T_2) wordt bepaald met een thermokoppel met een gevoeligheid van $41 \mu V / ^{\circ}C$ (referentiekoppel in ijswater).

Stel de output van dit koppel is z (μV).

$$T_2 \text{ (in } ^{\circ}K) = 273 + \frac{z}{41} \quad (7)$$

Substitutie van (7) in (6) en vereenvoudiging (de factor z^3 wordt verwaarloosbaar klein) geeft:

The first part of the proof shows that the function f is continuous at x_0 . To do this, we need to show that for any $\epsilon > 0$, there exists a $\delta > 0$ such that if $|x - x_0| < \delta$, then $|f(x) - f(x_0)| < \epsilon$.

$$|f(x) - f(x_0)| = \left| \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right| = \left| \frac{x_0 - x}{x x_0} \right| = \frac{|x - x_0|}{|x x_0|}$$

We want to bound this expression. Since $x_0 \neq 0$, we can choose δ small enough so that $|x - x_0| < \delta$ implies $|x| > \frac{|x_0|}{2}$.

$$\frac{|x - x_0|}{|x x_0|} < \frac{\delta}{\frac{|x_0|}{2} |x_0|} = \frac{2\delta}{|x_0|^2}$$

Now, if we choose $\delta = \frac{\epsilon |x_0|^2}{2}$, then $|x - x_0| < \delta$ implies $|f(x) - f(x_0)| < \epsilon$. This shows that f is continuous at x_0 .

The second part of the proof shows that f is not uniformly continuous on $(0, \infty)$.

$$f(x) = \frac{1}{x} \quad \text{and} \quad f(x_0) = \frac{1}{x_0}$$

Consider the sequence $x_n = \frac{1}{n}$. Then $x_n \rightarrow 0$ as $n \rightarrow \infty$.

$$f(x_n) = n \quad \text{and} \quad f(x_0) = \frac{1}{x_0}$$

Thus,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} n = \infty \neq \frac{1}{x_0} = f(x_0)$$

This shows that f is not uniformly continuous on $(0, \infty)$.

(V. 1.1.1) The function f is not uniformly continuous on $(0, \infty)$.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x} = 0$$

The function f is not uniformly continuous on $(0, \infty)$.

$$T_1 - T_2 = \frac{9,35 \times 10^6 \Delta V}{4,17 \times 10^7 + 1,11 \times 10^3 x z + z^2}$$

De oppervlaktetemperatuur van het object die hieruit volgt is:

$$T_1 (\text{in } ^\circ\text{C}) = \frac{9,35 \times 10^6 \Delta V}{4,17 \times 10^7 + 1,11 \times 10^3 x z + z^2} + 2,44 \times 10^{-2} x z \quad (8)$$

In de praktijk kan deze formule door een nomogram vervangen worden (Figuur 5).

De mogelijke fout in de meting is volgens berekening ongeveer 2% van het temperatuur verschil dat gemeten wordt.

Samenvatting

1. Een methode is beschreven om de oppervlaktetemperatuur van een object op enige afstand te meten. Het hiervoor gebruikte apparaat wordt een infrarood-radiometer genoemd.
2. De eigenschappen en ijklijn van de radiometer werden beschreven en een nomogram is gegeven om de meetresultaten in de objectoppervlaktetemperaturen te kunnen transformeren.

De infrarood radiometer werd geconstrueerd door de T.F.D.L. te Wageningen.

Literatuur

1. Heat transfer between the plant and the environment.
K. RASCHKE
Ann. Rev. Plant Physiol. 11(111-126) 1960
2. On the measurement of the radiant temperature of vegetation surfaces and leaves.
Ph. STOUTJESDIJK
Wentia, 15(191-202) 1966

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

112

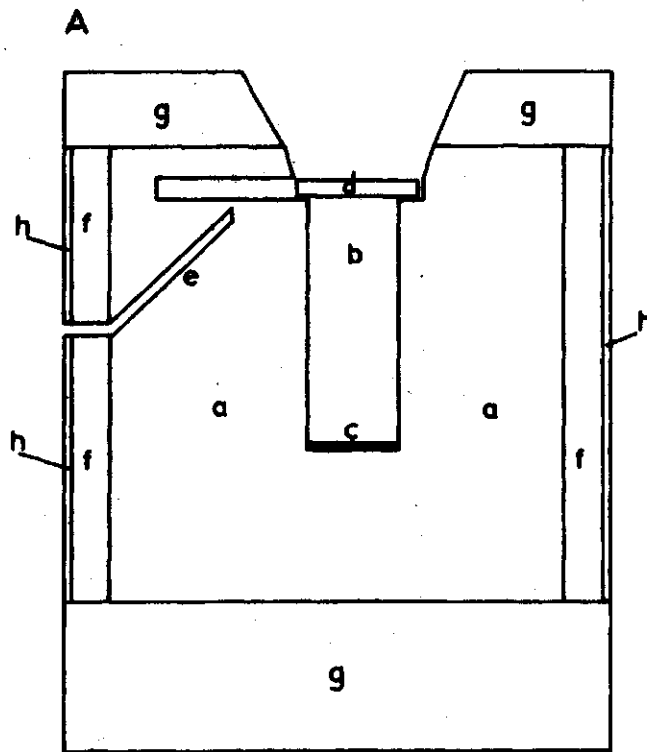
112

112

112

112

fig 1



schaal 1:1

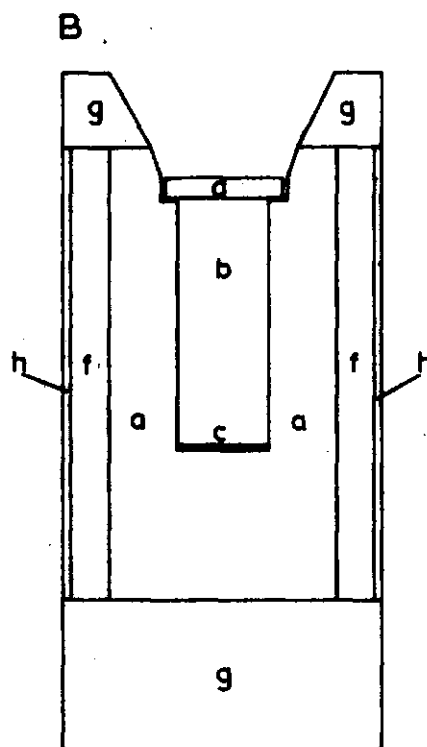


Fig. 1a en 1b. Doorkneden van de infrarood-radiometer. De betekenis van de letters in de figuren is in de beschrijving van het apparaat op pag. 3 en 4 toegelicht.

fig 2

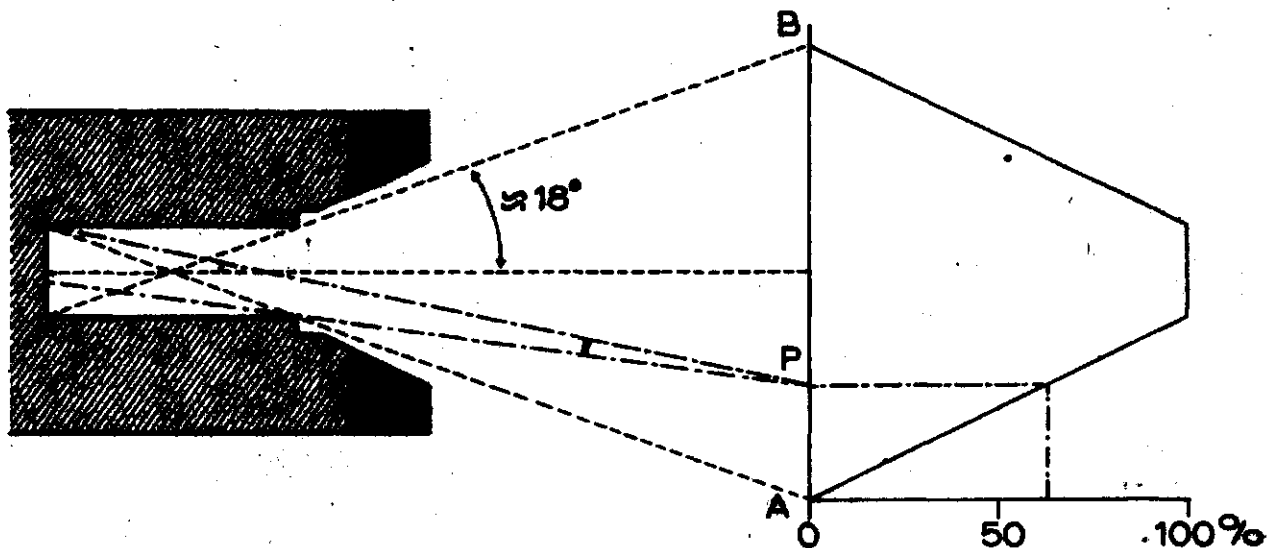


Fig. 2. Het verloop van de invalende stralen van objectoppervlakte AB. Voor punt P is de stralengang getekend.
 Rechts in de figuur is uitgemeten het percentage van de thermische oppervlakte dat door een punt van het object "gezien" wordt verrees de plaats van dat punt op het object.

fig 3

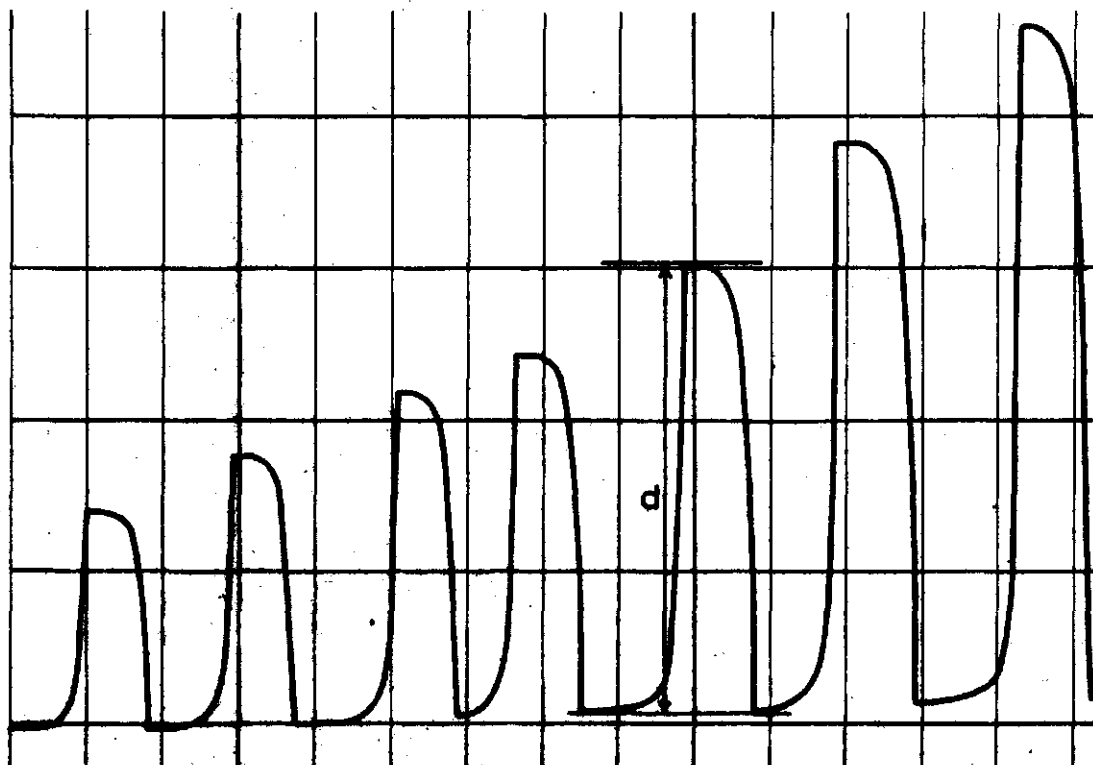


Fig. 3. Registratie bij de meting van de oppervlaktetemperaturen : 41,3; 38,8; 36,8; 35,0; 34,3; 33,8; resp. 32,0° C. De radiatortemperatuur was 27,0° C.
 N.B. De registratie werd gemaakt van rechts naar links.

fig 4

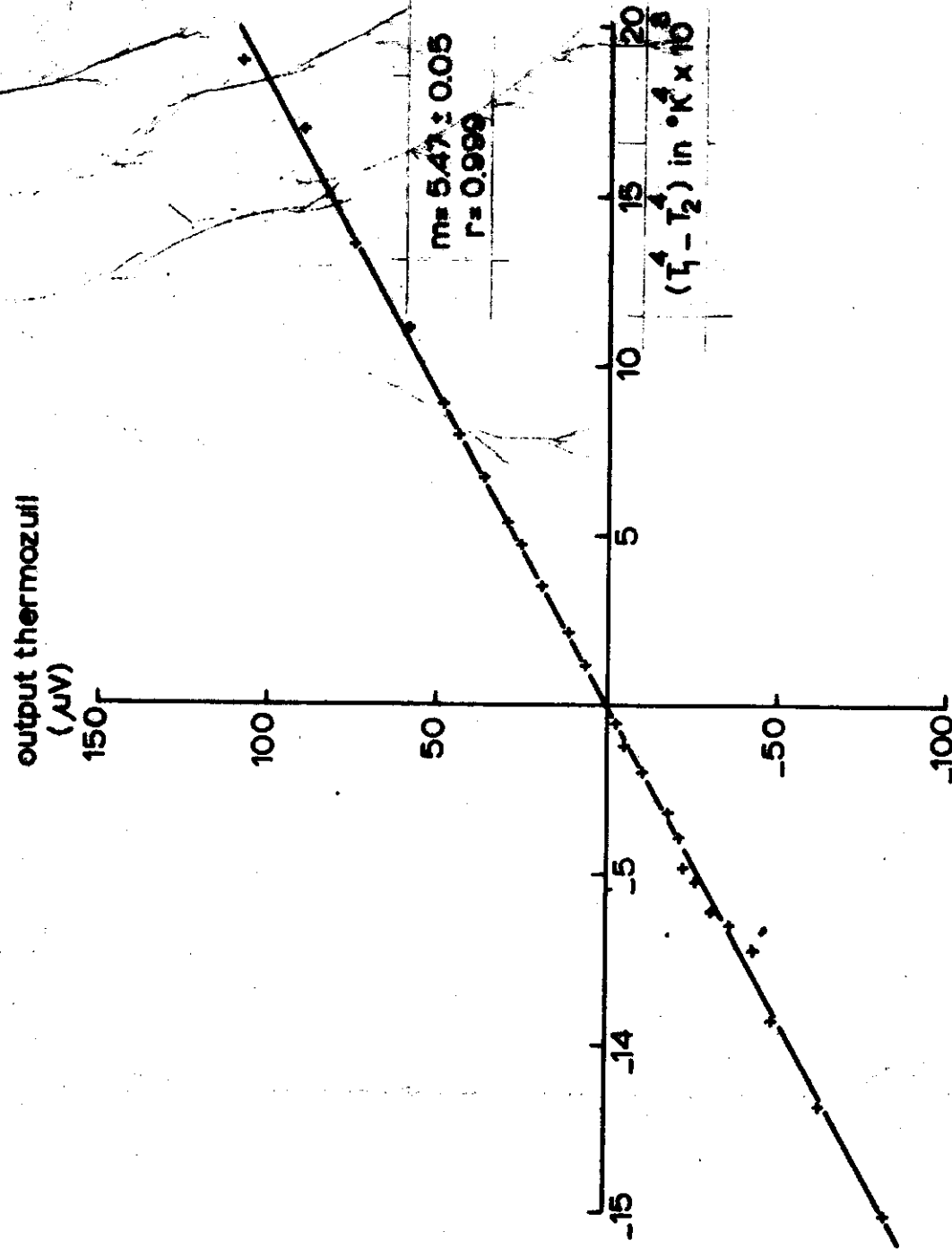


Fig. 4. IJdijjn van de lichtrood-waaijmeter.

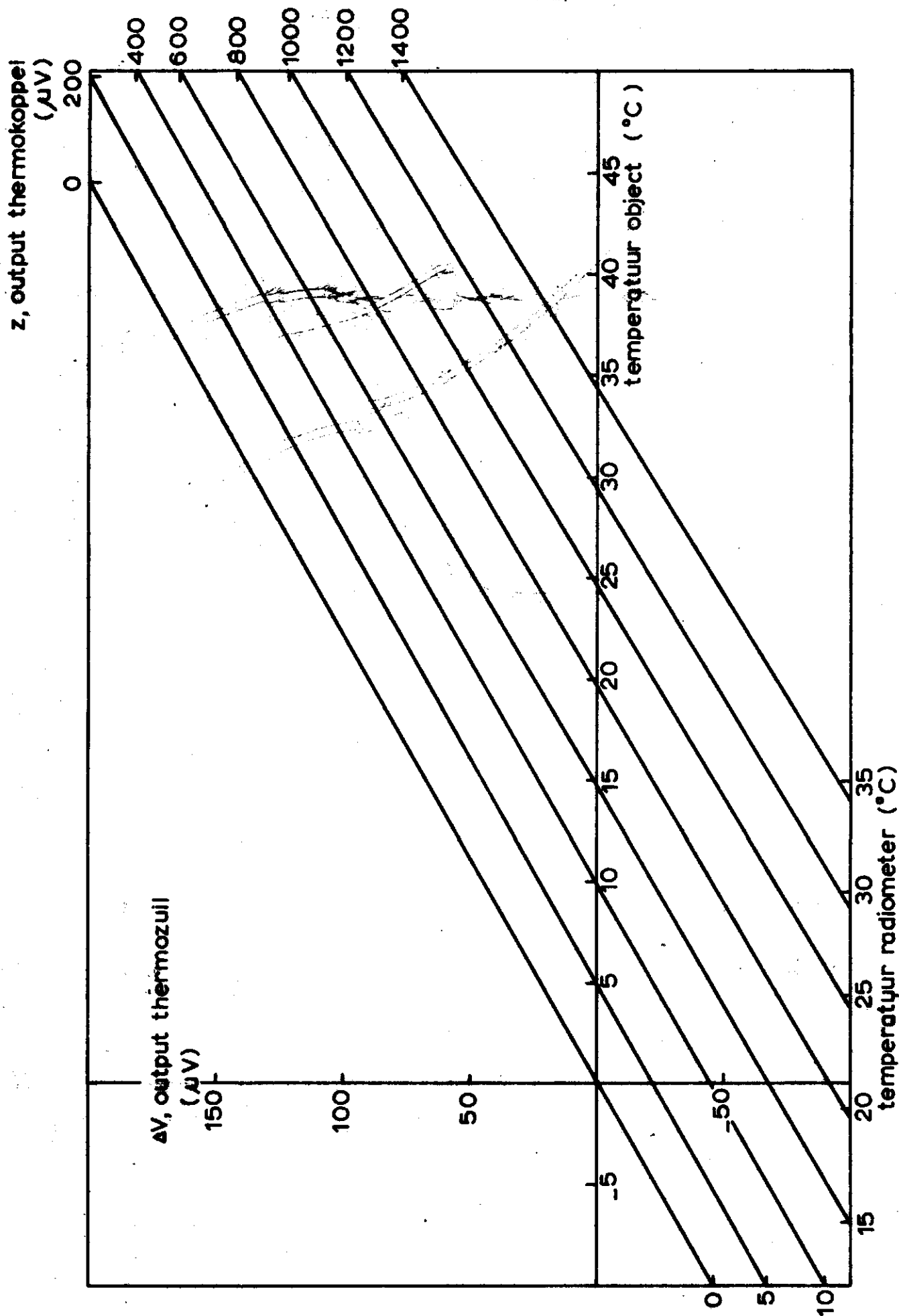


fig 5

Fig. 5. Door de formule (8) worden voor n te vullen, ontstaan de formules van de 20 te 11, jans de in dit diagram zijn gegeven.

