HET DROGEN MET BEHULP VAN INFRA-RODE STRALEN.

BIJ REFERTE AAN TE HALEN:
T. A. 235.

UITGAVE VAN DE ALGEMENE TECHNISCHE AFDELING
T. N. O.
BURNIERSTRAAT 1 'S-GRAVENHAGE.

Algemene Technische Afdeling
van de Organisatie T. N. O.
's-Gravenhage

Het geheel noch tekstgedeelten mogen worden
overgenomen of voor reclamedoeleinden worden
gebruikt zonder goedkeuring van de Algemene
Technische Afdeling T.N.O. te 's-Gravenhage.

Rapport T.A. 235

van de Algemene Technische Afdeling T.N.O.

Titel: Het drogen met behulp van infra-rode stralen.

Auteur: J. Kreyger.

Opdrachtgeefster: Algemene Technische Afdeling T.N.O.

Goedgekeurd door: Ir H.A. Leniger.

Datum: Augustus 1947.

Korte inhoud: Dit rapport bevat een overzicht van de literatuur over het infra-rood drogen vanaf de aanvang van de toepassing van dit proces (1935) tot op heden. Zowel op de literatuur betreffende de stralingsbronnen en de theoretische grondslagen van het proces als op de practische toepassingen wordt ingegaan.

- - - - -

INHOUDSOPGAVE.

		Pag.
1.	Inleiding.	5
2.	Doel en opzet van deze nota.	5
3.	Aard van de warmtetransmissie door infra-rode stralen.	7
4.	Stralingsbronnen.	13
4.1.	Algemene bespreking.	13
4.2.	Electrische stralingsbronnen.	15
4.2.1.	Inleiding.	15
4.2.2.	Uitvoering van electrische lampen als stralingsbronnen en van de reflectoren.	15
4.2.2.1.	Lampen.	15
4.2.2.2.	Reflecterende laag.	17
4.2.2.3.	Het reinigen van reflectoren.	17
4.2.2.4.	Vorm van de reflectoren.	18
4.2.2.5.	Het toepassen van frontlenzen.	19
4.2.3.	"Dull-emitters" en andere electrische stralingsbronnen, werkend bij lagere temp. dan lampen.	20
4.3.	Gasgevoede stralingsbronnen.	20
4.3.1.	Inleiding.	20
4.3.2.	Gasgevoede straalovens met gematigde temp.	21
4.3.3.	Gasgevoede stralers met hoge temperatuur.	23
4.3.4.	Aparte gasbranders.	25
4.4.	Vergelijking electrische- en gasgevoede stralers.	25
5.	Practische toepassingen van warmtetransmissie door infra-rode stralen.	26
5.1.	Inleiding.	26

5.2.	Het drogen met infra-rode stralen, waarbij het gaat om het verdampen van andere stoffen dan water.	27
5.2.1.	Het drogen en verharden van lakken e.d.	27
5.2.1.1.	Beschouwing van de proeven van Tiller en Garber e.a.	27
5.2.1.2.	Aanpassing van de lak of verf aan het infra-rode droogproces.	29
5.2.1.3.	Apparatuur.	30
5.2.1.3.1.	Open eenheden.	30
5.2.1.3.2.	Gesloten eenheden.	31
5.2.1.3.3.	Berekeningen.	33
5.2.1.4.	Nabeschouwing.	34
5.2.2.	Het drogen van electrotechnische artikelen.	36
5.2.3.	Het drogen van andere producten, waaruit een organische stof verdampt moet worden.	37
5.3.	Het drogen met behulp van infra-rode stralen, waarbij het gaat om het verdampen van water.	37
5.3.1.	Inleiding.	37
5.3.2.	Droogmechanisme en droogsnelheid bij infra-rode straling.	38
5.3.3.	Keuze van de stralingsbron en apparatuur.	40
5.3.4.	Infra-rood drogen in de Keramische industrie.	40
5.3.4.1.	Practische toepassingen.	41
5.3.4.2.	Proefnemingen.	44
5.3.4.3.	Samenvatting resultaten infra-rood drogen in de Keramische industrie.	44
5.3.5.	Het infra-rood drogen van gietvormen.	45
5.3.6.	Infra-rood drogen in de Textielindustrie.	45
5.3.6.1.	Practische toepassingen.	45
5.3.6.2.	Proefnemingen.	47

		Pag.
5.3.7.	Infra-rood drogen van papier en inkt.	51
5.3.8.	Infra-rood drogen van plantaardige stoffen.	52
5.3.8.1.	Inleiding.	52
5.3.8.2.	Mogelijke voordelen van het infra-rood drogen.	52
5.3.8.3.	Genomen proeven.	53
5.3.9.	Diverse toepassingen.	56
5.3.10.	Berekeningen t.a.v. het drogen met behulp van infra-rode stralen.	57
	Literatuurlijst.	60
	Nomenclatuur.	64

HET DROGEN MET BEHULP VAN INFRA-RODE STRALEN.

1. Inleiding.

Het practisch toegepaste droogproces, waarbij voor het op temperatuur brengen van de te drogen stof gebruik wordt gemaakt van warmtestralen, dateert van 1935 toen de Ford Motor Comp. patenten aanvroeg betreffende straaldrogers voor het drogen van reparaties van beschadigingen, ontstaan aan de lak van automobiel bodies tijdens het fabrikatieproces. Deze reparaties waren n.l. bij de toen in zwang komende synthetische emaillelakken zeer lastig op de tot dat tijdstip gebruikelijke methode uit te voeren. Met de straaldrogers was het mogelijk plaatselijk de lak op de vereiste temperatuur te brengen, zonder dat het nodig was glaspanelen e.d. te verwijderen. De droogduur was daarbij zeer kort.

Het duurde dan ook niet lang of de methode werd niet alleen voor bovenbedoelde reparaties toegepast, doch ook aangewend voor de droging van alle gelakte onderdelen.

Aangezien de eerste toepassingen met lampen werden uitgevoerd, was het succes aanleiding dat de electriciteitsmaatschappijen hun belangstelling aan deze kwestie schonken en het resultaat was een snelle ontwikkeling. De successen droegen bij tot het zoeken naar andere toepassingsmogelijkheden en ook waren ze aanleiding, dat gasmaatschappijen zochten naar andere stralingsbronnen met gas als energiebron.

De stand van zaken is nu zo, dat de toepassing voor het drogen van lakken het meest verbreid is, doch dat ook op ander gebied infra-rode droging met meer of minder succes toepassing vindt, of begint te vinden.

Ook in Nederland bestaat voor het infra-rood drogen grote belangstelling. Er is echter over dit betrekkelijk jonge procedee reeds een zeer uitgebreide literatuur, welke bovendien erg verspreid is. Het is daarom voor iemand, die over toepassing van het infra-rood drogen denkt, moeilijk zich te orienteren over de mogelijkheden en de voor- en nadelen.

In verband hiermede word het wenselijk geacht de bestaande literatuur in een gecomprimeerde vorm samen te vatten.

2. Doel en opzet van deze nota.

Het doel van dit rapport is dus in de eerste plaats een overzicht te verkrijgen over alles wat tot nu toe op het gebied van infra-rood drogen is gedaan en geschreven in het vertrouwen, dat dit overzicht zal bijdragen tot de kennis van en het inzicht in dit interessante procedee.

Dit rapport heeft echter ook nog een ander doel. Overziet men de literatuur, dan komt men tot de conclusie, dat de practijk van het infra-rood drogen ver vooruit is op de theorie. Er blijken slechts weinig publicaties te zijn, waarin dieper op

het mechanisme van de droging wordt ingegaan. De meeste artikelen zijn van min of meer populair wetenschappelijke aard. Bij het doorlezen van de literatuur rijzen dan ook tal van vragen. Het doel van het rapport is nu voornamelijk geweest een inzicht te verkrijgen in hetgeen ontbreekt aan de kennis van het infra-rood drogen, teneinde in staat te zijn op basis van dit rapport een research-plan op te stellen. Aan dit plan wordt thans gewerkt.

De opzet van het rapport is zodanig, dat in hoofdzaak getracht werd de literatuur kort en overzichtelijk samen te vatten. Slechts in beperkte mate worden critische beschouwingen gegeven over de uitspraken en de cijfers van de geciteerde schrijvers. Men dient het rapport derhalve voornamelijk als een documentatie op te vatten.

Gezien de uitgebreidheid van de literatuur was het nodig zeer beknopt te schrijven. De leesbaarheid moest daardoor hier en daar noodzakelijkerwijze enigszins worden benadeeld. Wenst men dieper op de verschillende onderwerpen in te gaan, dan zal het in alle gevallen nodig zijn de originele literatuur te raadplegen.

- - -
- -
-

3. AARD VAN DE WARMTETRANSMISSIE DOOR INFRA-RODE STRALEN.

Men kan drie, in wezen verschillende vormen van warmteoverdracht onderscheiden n.l.:

1 warmtetransmissie door geleiding of conductie

2 " " stroming of convectie

3 " " straling of radiatie.

De in deze studie speciaal ter zake doende vorm van warmtetransmissie is de sub 3 genoemde (welke in tegenstelling tot die sub 1 en 2 genoemd, zonder medium plaats vindt.)

Overigens zal het in de practijk voorkomen, dat naast de sub 3. genoemde warmteoverdracht ook altijd die sub 1 en 2 genoemd in meerdere of mindere mate wel zullen optreden

Stelt men zich een lichaam voor in het luchtledige, welk lichaam op een of andere wijze een hoge temp. bezit; m.a.w. waarin zich een hoeveelheid energie heeft opgehoopt, dan denkt men zich deze energie aanwezig in de snelheid van de electronen, welke in bepaalde banen lopen. Het evenwicht komt tot uiting in de formule $K = \frac{m \cdot V^2}{R}$. Bij toename van de energie (temp.) is de straal van de baan van het electron trapsgewijze toegenomen en daarmede dus V. Het omgekeerde is nu eveneens mogelijk, bij dalende temp. springt het electron trapsgewijs in een nauwere baan terug. De hierbij vrijkomende energie (quanten energie) uit zich in electromagnetische trillingen. Hoe hoger de temperatuur, des te hoger de frequentie en des te kleiner is de golflengte van deze trilling.

Het totaal bekende gebied van electromagnetische golven is als volgt:

Kosmische stralen	golflengte:	2.10^{-4}	- 6.10^{-4}	Å
Gamma "	"	5.10^{-3}	- 1,0	"
Röntgen "	"	6.10^{-2}	- 10^{3}	"
Ultraviolette "	"	$1,36.10^{2}$	- $3,9.10^{3}$	"
Zichtbare "	"	$3,9.10^{3}$	- $7,6.10^{3}$	"
Infra-rode "	"	$7,6.10^{3}$	- 5.10^{6}	"
Hertz Golven	"	10^{6}	- 5.10^{14}	"
Radio "	"	10^{11}	- 5.10^{14}	"

(1 Å 1 Ångstrom - eenheid $\frac{1}{10000}$ μ

Treffen deze stralen een ander lichaam, dan kunnen zich, evenals bij lichtstralen, de volgende gevallen voordoen:
1. De stralen worden aan de oppervlakte geheel teruggekaatst.
2. De stralen worden gedeeltelijk teruggekaatst.

a. Het niet teruggekaatste deel wordt aan de oppervlakte geabsorbeerd.
b. Het niet teruggekaatste deel wordt niet geabsorbeerd maar doorgelaten.
c. Het niet teruggekaatste deel wordt gedeeltelijk geabsorbeerd en gedeeltelijk doorgelaten.

Worden deze stralen geabsorbeerd, dan kan het lichaam in temperatuur stijgen als gevolg van het in zich opnemen van de stralingsenergie (waarbij dus het omgekeerde plaats vindt van wat met de stralen gebeurt). Bij de stralen, waarbij het hier om gaat; de infra-rode stralen, wordt deze energie in warmte omgezet, vandaar dat ze ook wel warmtestralen worden genoemd. Zij zijn het in ieder geval, die zich speciaal lenen voor warmte transmissie door straling. Elk lichaam is in staat al naar gelang van de omstandigheden, warmte uit te stralen dan wel te absorberen, doch de mate, waarin dit kan gebeuren, varieert zeer met de aard en de hoedanigheid (b.v. aggregatie toestand en toestand van het oppervlak). Gering is deze eigenschap bij gassen (zuurstof en stikstof b.v.) en groot is ze voor een dof zwart vast lichaam. In het algemeen zijn goed absorberende lichamen tevens goede stralers.

Een lichaam, waarvan men zich voorstelt, dat het 100% van de stralen absorbeert, wordt een "zwarte straler" genoemd, dat dan tevens de maximale stralingscapaciteit bezit. Elk ander lichaam zal een mindere straling, resp. absorbtie bezitten en men drukt de verhouding daarvan t.o.v. die van de "zwarte straler" uit in de zwartheidsgraad (Z).

Voor een zwarte straler liggen aard en grootte van de straling, in afhankelijkheid van de temperatuur vast in drie wetten (straler gedacht in omgeving met temp. 0° K).

1. Wet van Stefan - Boltzmann:

De totale energie aan uitgestraalde aethertrillingen is evenredig met de 4e macht van de absolute temp. van de straler.

$$\text{Emissie totaal} = C_1 T_s^4$$

Kiest men de eenheden Kcal, m^2, h, dan wordt C_1 volgens de wet van Stefan - Boltzmann $4{,}95.10^{-8}$ Kcal/m^2h of $4{,}95.10^{-12}$ Kcal/cm^2 h.
Schrijft men de formule in de vorm:

$$Q_s = C_s \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ Kcal/h}$$

of

$$Q_s/m^2 = C_s \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ Kcal/}m^2\text{h}$$

dan wordt C_s = 4,95 Kcal/m^2 h = stralingsgetal v/d zwarte straler.

Voor een willekeurig lichaam met een zwartheidsgraad Z wordt de waarde dus ZC_s.

2. Hoewel volgens de bovengenoemde wet van Stefan - Boltzmann de totale waarde aan uitgestraalde energie dus vastligt met de temp. van de straler, wordt er geen uitsluitsel gegeven betreffende de verdeling van de energie over de verschillende golflengten. Op deze verdeling slaat de betreffende wet van Planck.
Onder de uitgestraalde aethertrillingen komen alle mogelijke golflengten voor van klein tot groot, maar er is één golflengte bij, waarvoor de straling op zijn sterkst is.
De emissie ter weerszijden van deze golflengte met maximale emissie neemt af tot practisch 0 (volgens een curve uitgedrukt door een door Planck ontwikkelde vorm).
De maximale emissie is evenredig met de vijfde macht van de abs. temp. v.d. straler.

$$\text{Emissie}_{max} = C_2 \; T_s^{\,5}$$

3. De golflengte, waarbij de maximale emissie plaats vindt, is in grootte omgekeerd evenredig met de absolute temp. (Verschuivingswet van Wien.)

$$\lambda \text{ max emissie} \cdot T_s = C_3$$

Wanneer λ wordt uitgedrukt in μ, krijgt C_3 de grootte 2880.

In fig. 1 is deze wet grafisch in beeld gebracht. Hierbij moet worden opgemerkt, dat de drie curven I, II en III een zelfde totale energie vertegenwoordigen (een zelfde oppervlak beslaan) zodat hier, terwille van de overzichtelijkheid in de figuur, geen gelijk stralende oppervlakken van de stralingsbronnen verondersteld zijn (26).

In fig. 2 zijn veronderstelde emissiecurven van een zelfde zwarte straler bij vier verschillende temperaturen. De bovengenoemde drie wetten zijn hierin grafisch gedemonstreerd. De oppervlakken, besloten door de curven, stellen de totale energie voor. Verder ziet men het verloop van E_n en λ_m bij verschillende temperaturen (69). In de practijk heeft men nooit te doen met een zwarte straler, maar altijd met een "grijze straler", waarbij dus een zekere Z in rekening moet worden gebracht. In fig. 3 is de afhankelijkheid van de uitgestraalde energie t.o.v. de temp. van de straler aangegeven bij verschillende waarden van Z (69). Een onderzoek van Beakes, waaraan door verschillende schrijvers gereferereerd wordt (76, 92 e.a.) bracht aan het licht, dat de factor Z t.a.v. de kleur van het bestraalde oppervlak afnam van koolzwart via blauw, groen, groengeel, geel naar wit. De rode kleuren stonden tussen geel en groen in. Zeer kleine toevoegingen van blauw b.v. bij geel of zwart bij wit, verhoogden de factor Z aanzienlijk. (Zie ook 5.2.1.2., proeven van Ernst en Schuhmacher, tabel 7)

Elke willekeurige stralingsbron bezit een eigen emissiespectrum, dat een min of meer grillig verloop kan hebben voor bepaalde stoffen. Hierbij krijgt men niet de vorm van de emissie van een zwarte straler (fig. 1 en 2) maar een selectieve straling. Dit komt speciaal voor bij niet-metalen. In fig. 4 ziet men b.v. het emissie spectrum van een stralend gas-paneel bij 1500° F, terwijl tevens in de figuur is getekend het emissie spectrum van een zwarte straler onder dezelfde omstandigheden (ook bij 1500° F) (69).

Hierboven werden de stralers beschouwd als zich bevindend in een omgeving met een temp. van 0° K. en de formules gegeven, betrekking hebbend op de warmte transmissie, welke in dit geval dus eenzijdig was. De straler verloor energie en ontving geen energie terug. Alle lichamen, welke een bepaalde temperatuur bezitten, stralen ononderbroken. Beschouwen we een straler in de omgeving met een bepaalde temp T_a. De warmte transmissie wordt dan weergegeven volgens de wet van Stefan

$$Q_s = Z A_s C (T_s^4 - T_a^4)$$ zie nomenclatuur)

Hierbij is Q_s het saldo aan warmte, dat door de straler per tijdseenheid verloren wordt, terwijl T_a in dit geval de abs. temp. v.d. omgeving voorstelt.
C heeft de grootte $4.95.10^{-12}$ Kcal/cm^2 h.

Bij berekeningen in de practijk ligt de zaak niet eenvoudig. Een nauwkeurige berekening van de hoeveelheid warmte, welke door straling wordt overgebracht van een straler naar een absorberend oppervlak is niet wel doenlijk. Er zullen uiteraard allerlei taxaties moeten worden verricht.

DISTRIBUTIE VAN DE UITGESTRAALDE ENERGIE VAN EEN ZWARTE STRALER BU VERSCHILLENDE TEMPERATUUR.

Nº KROMME	T	VERHOUDINGS GETAL OPPERVLAKTE STRALER
I	2500	1
II	1200	18,8
III	600	30,2

FIG. 1

FIG. 2

T. A. 235

FIG. 3
A
B
C
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
B.T.U./SQ.FT/H.
A = ZWARTE STRALER
B = "GRUZE" STRALER (Z = 0,8)
C = "GRUZE" STRALER (Z = 0,6)
(TEMP. OMGEVING VERONDERSTELD 0°K)
Verhouding uitgestraalde energie in afhankelijkheid van de temperatuur bij enkele waarden van de zwartheids graad Z.
TEMPERATUUR °F.
0
100
200
300
400
500
750
1000
1250

FIG. 4
„STRALINGSINTENSITEIT"
ZWARTE STRALER 1500 °F.
GASPANEEL 1500 °F.
1
2
3
4
5
6
7
GOLFLENGTE μ

T.A. 235

Men kan onderscheiden:

a Hoeveelheid energie, toegevoerd aan de stralingsbron.
b Hoeveelheid energie, uitgestraald door de stralingsbron, waarin het "overall" rendement van de stralingsbron te pas komt, waarin weer allerlei factoren zijn verdisconteerd.
c Het percentage uitgestraalde energie dat op het absorberend oppervlak terecht komt, waarbij ook de afstand en de hoek van uitstraling een rol spelen.
In de practijk wordt meestal de in de straler ingevoerde energie uitgedrukt per oppervlakte eenheid bestraald oppervlak, een waarde dus die omtrent het rendement betreffende de tussenphasen niets zegt.
d De hoeveelheid energie welke van de opvallende energie wordt geabsorbeerd.

Opmerkingen.

ad a De toegevoerde energie laat zich in het algemeen wel berekenen of bepalen.

ad b Hier krijgt men te maken met de volgende moeilijkheden:

1. welke temp. krijgt de straler.
2. welk gedeelte gaat via reflector en door convectie verloren.
3. welke bijzonderheden bestaan er t.a.v. emissie spectrum of
wat is de zwartheidsgraad?

ad c 1. De stralingsintensiteit is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.
2. Getameerd moet worden welk gedeelte van de straling het absorberende oppervlak treft.

ad d Hiervoor dient men het transmissie- en absorbtiespectrum van de bestraalde stof te weten en de reflectiviteit van het oppervlak. Deze kwestie zal hierna nader worden besproken.

Groron onderzocht de transmissie en absorbtie van infra-rode stralen, afkomstig van een gloeiende draad (1000°K) een kooldraadlamp (2140°K) en een metaaldraadlamp (3130°K) t.o.v. water. (43, 76, 103 c.a.) Deze drie stralingsbronnen hadden hun maximale emissie dus (volgens de wet van Wien) bij resp. 2.9 μ, 1.34 μ en 0.9 μ. Uit het onderzoek bleek, dat stralen met de kleinste golflengte voor maximale emissie het grootste doordringend vermogen t.o.v. water bezitten, terwijl die voor maximale emissie bij 2.9 μ voor verreweg het grootste deel op een diepte van 1 mm reeds waren geabsorbeerd. Het beste wordt c.c.a. geillustreerd in fig. 5 (59). Voor een infra-rode lamp (z.g. droogstraler) is de lijn gestippeld getekend. Op een diepte van 1 mm zijn de stralen voor 50% geabsorbeerd; op een diepte van 3 mm voor 60%.

Groven deed dit onderzoek, aannemende, dat lakken (in dit geval emaillelakken) zich in dit opzicht zouden gedragen als water. Hij concludeerde, dat de stralingsbron van weerstandsdraad ongeschikt was omdat de warmte te weinig doordrong, hetgeen bij een laklaag met slechte geleiding geen goed resultaat zou opleveren. Aan de andere kant vond hij dat de metaaldraadlamp (verlichtingslamp) niet geschikt was omdat hierbij de straling te ver doordrong en op deze wijze de kans groot was, dat de metalen onderlaag te veel verwarmd zou worden. Hij concludeerde dus, dat de kooldraadlamp het beste voldeed. (Later evenwel ging men over op metaaldraadlampen, werkend met lager temp.) Dat lakken zich overigens niet gedragen als water is later onderzocht. Manders (75) e.a. (59) geven een transmissiespectrum dat het gemiddelde voorstelt van dat van verschillende lakken.
Men vond

bij 1.3	μ	2%	transmissie
1.7	μ	5%	"
2.5	μ	21%	"

Hierbij zal rekening gehouden moeten worden met de laagdikte (welke niet werd opgegeven). Uit de cijfers blijkt intussen, dat de aanname van ongeveer gelijk gedrag van lak en water in dit opzicht niet juist was. Bij een maximale emissie bij 3 μ zou bij een laklaag juist de grootste transmissie optreden, terwijl bij water dan juist de grootste oppervlakkige absorbtie optreedt.

In fig. 6 ziet men getekend het transmissie spectrum van water (filmdikte 0.01 mm) (69, 40 e.a.), waaruit is te zien, dat grote absorbtie optreedt bij 3 μ en 6 μ (Klopt met cijfers van Groven).

In fig. 7 is geschetst het transmissie spectrum van water bij filmdikte 1 mm en 1 cm (60). Hier ziet men voor een 1 mm laag dus absorbtie banden bij 1.5 μ en 1.9 μ - 2.0 μ

Het absorbtie spectrum van een en dezelfde stof kan, afgezien van de dikte en aggregatietoestand, nog verschillen al naar gelang de stof in rust is of in beweging. Ter illustratie hiervan zie fig. 8 (69). Hierin ziet men de kromme A, voorstellende de emissie van een bepaalde stralingsbron (in dit geval een electrische haard). De restant-emissie, nadat de stralen door een glasplaat zijn gegaan, is weergegeven door B. Indien zich een laagje in rust verkerend water op deze glasplaat bevindt, blijft de emissie volgens C over, terwijl, als er water over de glasplaat stroomt, de emissie volgens D overblijft. Ook met de temperaturen wijzigt zich de transmissie (zie fig. 9).

Voor elk speciaal geval of doel zal dus experimenteel moeten worden vastgesteld, welke golflengte voor een bepaalde stof onder bepaalde omstandigheden is te prefereren.

Hiermede komen wij aan het punt, waarop kan worden vastgesteld, waarin de technische toepassing van infra-rode straling, als methode van warmtetransmissie, zich onderscheidt van andere verwarmingsmethoden.

FIG. 5

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
% ENERGIE
0
1mm
2mm
3mm
LAAGDIKTE VAN HET WATER
Ts ± 3000 °K
Ts ± 2500 °K
(DROOGSTRALER)
Ts ± 2000 °K
Ts ± 1000 °K

T. A. 235

FIG. 6

FIG. 7

T.A. 235

FIG. 8

FIG. 9

T. A. 235

Het gaat er dus om:

1. Andere warmtetransmissie dan door straling uit te schakelen.

2. Al naar gelang aard van de stof en omstandigheden betreffende gewenste diepte van straling, intensiteit van straling en maximale temp. een stralingsbron en verdere apparatuur te ontwikkelen, welke hier aan het beste voldoet. Het grote voordeel hierbij is dat, doordat er geen medium bij te pas komt, zeer grote temp. verschillen tussen stralingsbron en absorberend oppervlak aangelegd kunnen worden, resulterend in een zeer vlugge en efficiente warmtetransmissie (evenredig met de vierde macht van het temp. verschil).

4. Stralingsbronnen.

4.1. Algemene bespreking. (69, 40, 26, 59 e.a.)

Als No. 1 in de rij van mogelijke stralingsbronnen zou de zon moeten komen te staan. Het zonlicht heeft een maximale emissie voor $\lambda = 4700$ Å (groen) waaruit volgens de wet van Wien als temp. volgt:

$$T = \frac{2880}{0.47} = 6100\ ^{\circ}\ K.$$

Door de grote afstand komt de energie, mede door invloed van de atmosfeer, op aarde neer op ± 700 Kg cal/m^2 h. Als No. 2 zou men zich kunnen denken de electrische lichtboog (temp. 4000°K), hoewel toepassingen als zodanig niet zijn voorgekomen.

Als No. 3 zou kunnen volgen de electrische lamp, dienende voor verlichtingsdoeleinden. Hoewel een dergelijke lamp is geconstrueerd om licht te geven, is het nuttig effect in dit opzicht maar klein (± 6%).

Dit vindt zijn oorzaak in het feit, dat de optimale temp. van de gloeidraad bij een optimale $\lambda = 0.555\ \mu$ dus $\frac{2880}{0.555} = \pm\ 5200^{\circ}$ K zou moeten bedragen, een temp., welke bij toepassing van de beste gloeidraden, bij lange na niet is te bereiken. Bij gasgevulde lampen is de temp. ± 3000° K, bij luchtledige lampen ± 2600° K, waarbij resp. $\lambda = 0.96\ \mu$ en $\lambda = 1.1\ \mu$ behoren, m.a.w. de stralingsmaxima liggen in het infra-rode gebied van het spectrum.

Een dergelijke electrische lamp is dus meer een warmteuitstraler te noemen dan een lichtuitstraler. Verlaagt men de spanning iets en laat men de temp. wat dalen (b.v. van een gasgevulde lamp) dan heeft men een ideale infra-rode stralenbron.

TABEL 1 Overzicht stralingsbronnen voor infra-rode stralen

golflengte in μ van de emissie-piek	Absolute Temp. van de stralingsbron °K.	Energie op basis Z = 1.0		Type stralingsbron	
		Kcal/m²h	BTU/sq f.h.		
1.0	2970	3.560.000	1.300.000	electr. lampen	gasgevoede stralers
1.4	2270	1.230.000	450.000		
1.7	1760	875.000	320.000		
2.0	1470	220.000	80.000		
2.1	1370	170.000	62.000		
2.2	1280	123.000	44.700		
2.5	1150	79.000	28.800		
2.9	1000	52.000	19.000		
3.0	970	40.300	14.700		
3.6	820	21.600	7.900	electr. gloei-weer-standen	
4.0	710	14.200	5.200		
4.6	610	7.900	2.900		
4.8	590	6.600	2.400		
5.0	570	5.600	2.050		
5.6	520	3.700	1.350	door damp of vloeistof verwarmde buizen	
7.0	390	1.260	460		
7.8	360	850	310		
9.0	320	550	200		
9.6	300	437	160		
12.0	270	300	110		

In tabel 1 vindt men een overzicht van toegepaste infra-rode stralers, waarvoor de gegevens ten dele zijn geput uit een publicatie van Machadam en Jansen (69). De in de tabel opgegeven waarden voor de ontwikkelde energie hebben betrekking op het stralende oppervlak (zie in dit geval ook nogmaals fig. 1 en 3).

Bij electrische lampen zijn deze oppervlakken uiteraard zeer klein, zodat ondanks de grote waarden per oppervlakte eenheid voor deze categorie de totale energie uiteraard veel kleiner kan zijn dan b.v. bij gasgevoede stralers het geval zal kunnen zijn, niettegenstaande de lagere temp. in het laatste geval, doch dankzij het grotere oppervlak.

In de practijk wordt de energie vaak opgegeven in eenheden electrische energie of warmteeenheden per eenheid bestraald oppervlak per tijdseenheid.

Voor electr. droog-lampen b.v. $2\frac{1}{2}$ - 4 Watt/sq. in.
(in sommige gevallen tot 9 Watt/sq.in.
Voor gaspanelen kan dit zijn (bij temp. van 650° F) 6 Watt/sq.in.
Voor gasbranders met witgloeiend materiaal kan de waarde oplopen tot 80 Watt/sq.in.

De in tabel 1 vermelde stralingsbronnen, bestaande uit door damp of vloeistof gevulde buizen, komen voor technische droogprocessen in het algemeen niet in aanmerking en zullen dan in deze studie ook niet verder worden behandeld.

4.2. Electrische stralingsbronnen.

4.2.1. Inleiding.

Op technisch gebied waren het electrische stralingsbronnen, die het eerst werden toegepast en als gevolg van het feit, dat verlichtingseenheden als zodanig direct konden worden gebruikt ging de ontwikkelingsgang vrij geruisloos en snel. De grote electriciteits maatschappijen zagen direct het belang in en de electrische bronnen hadden een voorsprong op de andere zich later ontwikkelende infra-rode stralers.

De kooldraadlampen, welke oorspronkelijk als het meest geschikt werden geoordeeld, zijn op de achtergrond geraakt, omdat deze lampen na betrekkelijk korte tijd inwendig zwart aanslaan en het rendement achteruit gaat.

4.2.2. Uitvoering van electrische lampen als stralingsbronnen en van de reflectoren.

4.2.2.1. Lampen.

In fig. 10a is het eenvoudigste type geschetst, zonder reflector. Een zwaardere uitvoering ziet men in 10c met een z.g. bi-post fitting (bestand tegen hogere temp.).

In fig. 10b is een gewijzigd model gewone lamp geschetst, waarbij een speciale reflector-vorm is toegepast. Deze glazen reflector is van binnen bedekt met een reflecterende laag (gespoten Al.). De fitting (Edison-model) is speciaal versterkt.

In 10d is geschetst een z.g. "Sealed beam-unit", een van de laatste Amerikaanse uitvoeringen (tot 1000 Watt), bestaande uit een speciale lens van glas (1), welke zorgt voor de juiste verdeling van de stralen) en een glazen gedeelte (2) met reflecterende deklaag. Bij (3) zijn deze twee gedeelten luchtdicht verbonden. Deze lamp is eveneens uitgevoerd met een bi-post-fitting. De vorm van de gloeidraad is van groot belang.

Tiller en Garber (92) vermelden, dat de driehoekige vorm het beste voldoet en het meest wordt uitgevoerd. Dit wordt bevestigd door Seymour (88). Daarnaast zijn ook spiraal- en hoefijzervormige draden in toepassing en zig-zag-vormen.

Nelson en Silman (76) vermelden dat moderne eenheden, werkend met Wolfram-draadlampen, een hoeveelheid energie overbrengen van 2½ - 4 Watt/sq.in. abs. opp. (1000-2000 B T V/sq.ft.h.). Tiller en Garber (92) kwamen bij hun proefnemingen met een Therma-lamp van de Hall Co. tot 9 Watt/sq.in.

In Engeland worden de types b, c en d niet gemaakt of gebruikt; men past daar hoofdzakelijk type a toe. Met trogreflectoren (zie 4.2.2.4.)(26). Connell schrijft, dat de enige in Engeland verkrijgbare lamp een gasgevuld type a is van 115 V. en 250 Watt. Een laag voltage werd gekozen, omdat daardoor een steviger gloeidraad constructie mogelijk is. Ze worden meestal in serie geplaatst op 200-250 Volt (2 lampen), waardoor ze dus soms op een hoger voltage komen dan op 115 V. Dit is geen ernstig bezwaar, omdat de gloeidraad temp. betrekkelijk laag is. Connell schrijft, dat hoewel in Amerika sterkere lampen worden gebruikt, de energiestroom per eenheid bestraald oppervlak niet groter is doordat Engeland trogreflectoren toepast. Anderen (b.v. Nelson en Silman) zijn niet zo enthousiast over trogreflectoren.

De Philipsdroogstraler is van het type b. Manders (75,75b, 25) geeft enkele gegevens . Op een afstand van 20 cm is de bestralingssterkte op een vlak van 80 cm ø ongeveer 0.5 W/cm² (3 W./sq.in) (van een enkele lamp). Manders geeft eveneens de afmetingen van de Philips droogstraler. Verdere gegevens 250 W. 5000 branduren.

Doribere (40) geeft enkele cijfers betreffende een Mazda-lamp van 250 Watt (voor infra-rode stralen).

Tiller en Garber (92) vermelden voor de sterkte van kooldraadlampen als maximaal 375 Watt. Deze lampen vertonen volgens hen na 100 branduren reeds een vrij grote achteruitgang. Sommige Wolframdraadlamp-installaties zijn volgens hen reeds meer dan 10000 uur in gebruik. Volgens andere bron (8) worden kooldraadlampen gefabriceerd van 125 W - 1500 W.

FIG. 10

FIG. 11

T.A. 235

4.2.2.2. Reflecterende laag.

De keuze van het reflectormateriaal, speciaal wat betreft de reflecterende laag, is van het grootste belang. De eisen zijn: een zeer grote reflectiviteit t.o.v. de stralen welke toepassing vinden, niet aanslaan of oxyderen en voldoende hard zijn (bestand tegen steeds weerkerende noodzakelijke schoonmaak).

Groven kwam tot de conclusie, dat goud het beste was (44). Later paste hij ook geanodiseerde aluminium toe. (1, 2, 3.) Het komt neer op het vormen van een kleurloos, hard en voor infra-rode stralen doorlatend oxyde laagje op een van te voren glad gemaakt oppervlak. Beide bewerkingen vinden plaats bij doorvoering van een electrische stroom met het oppervlak als anode en met gebruikmaking van respectievelijk speciale electrolyten. Zilver is aanvankelijk zeer goed; de goede eigenschappen houden evenwel spoedig op als gevolg van aantasting. Geanodiseerd Al kan het brengen tot 80 - 85% reflectiviteit. Nelson & Silman noemen voor het aanbrengen enige processen ("Alzak" en "Brytal"). De zuiverheid van het Al speelt een grote rol.

Zuiverheid Al 99.2% reflectiviteit 60%.
" " 100.0% " 90%.

De meest schadelijke verontreinigingen zijn C en Si.

Tiller & Garber (92) achten Al (in de vorm van "vaporised" Al) beter dan goud, wanneer men de prestatie over de gehele levensduur van de reflector in aanmerking neemt.

Ook Rhodium (op Ag of Ni-onderlaag) is zeer goed, maar nogal duur. Het wordt practisch niet aangetast en is zeer hard. Het wordt toegepast door de Gen. Electr. Comp. Volgens Connell (26) werd Rhodium in de oorlogsjaren ook daarom toegepast omdat Al. schaars was. Het is niet onmogelijk dat nu de omstandigheden anders liggen en het dure Rhodium verdrongen zal worden door het goedkopere Al. De reflectiviteit is lager, voor al voor golflengten in de buurt van 1.2 μ . Verschillende door diverse auteurs gepubliceerde grafische voorstellingen betreffende reflectiviteit lopen nogal uiteen.

Men kan evenwel aannemen, dat goud- zilver en geanodiseerd of "vaporised" Al. het beste zijn en dat Rhodium en vooral Cr. lager liggen. (Voor het laatste metaal is de reflectiviteit het beste in de buurt van blauw en violet, dus beter voor zichtbare stralen).

4.2.2.3. Het reinigen van reflectoren.

Het is van groot belang de reflectoren in schone staat te houden; ze in elk geval op gezette tijden met geijkte middelen te reinigen. Bij bepaalde processen zullen de reflectoren sterk aanslaan, bij andere minder.

Nelson en Silman (76) noemen methyleenchloride speciaal bij branden van lakken als middel voor het reinigen. Ze noemen nog enkele stoffen op. Bij goud moet men met oppoetsen erg oppassen; de goudlaag is zacht en slijt snel.

4.2.2.4. Vorm van de reflectoren.

De reflectoren werden oorspronkelijk vrij plat uitgevoerd, aangezien de gloeidraad nog geen geconcentreerde vorm had en de afstand tot het te verwarmen object vrij groot was. Later werden de gloeidraden compacter en d e reflectoren dieper. Ioris en Haynes (59) geven de doorsnede(met maten) van "Concentrating" en parabolische reflectoren (fig.11 a en b Deze zijn volkomen rond, waarbij dus tussen de reflectoren ruimten komen. Om hieraan tegemoet te komen is men overgegaan op vierkante en zeskante vormen en ook op z.g. trogreflectoren Bij deze laatste krijgt men een doorlopend reflecterend oppervlak, terwijl de aanmaak eenvoudig is. De Gen. Electr. Comp. in Engeland maakt deze trogreflectoren. Connell (26) wijst op het feit, dat een enkelvoudige reflector zeer effectief werkt, wanneer een klein oppervlak bestraald moet worden. Toepassingen als deze komen evenwel weinig voor; meestal gaat het erom betrekkelijk grote oppervlakken te bestralen. Men komt er daarom toe een groep lampen meer als een geheel te beschouwen.

TABEL 2.

Maximum stralingsintensiteit (uitgedrukt in eenheden van toegevoerde electrische energie per oppervlakte eenheid van de stralende lampencombinatie) bij verschillende reflectorvormen.

aparte reflectors (lampen 250 W)			Trogreflector met lampen 250 W. afstand lampen 4" langs de as van de trog. Afst. hartlijnen troggen $10\frac{3}{4}$".
8"	9"	10"	
650 W/Sq ft.	513 W/ Sq ft.	415 W/ Sq ft.	837 W/Sq. ft.

FIG. 12a

FIG. 12b

GEN. ELECTR. COMP. (ENGL.)

FIG. 12c

T.A. 235

FIG. 13

"EVENRAU" SUSTEEM (U.S.A)

FIG. 14

WABASH CORP (U.S.A)

FIG. 15

"SEALED LENS THERMA LAMPS"
HALL LAMP COMP. (U.S.A.)

T.A. 235

FIG. 16

"EVENRAY" U.S.A.

FIG. 17

"BLACK EMITTER" GAS PANELS

FIG. 18

EENHEID VAN DE "REDRAY" GAS BURNER

T.A. 235

Chamberlain, welke de wijze van warmtetransmissie vaststelden op een metalen plaat, opgehangen in een convectie-oven, op zodanige wijze, dat deze plaat in de gelegenheid was vrijelijk straling te ontvangen van de ovenwanden.

In tabel 3. ziet men de relatieve invloed van straling en convectie (plaat werd verwarmd van 60°F op 220°F.) Men ziet welk een belangrijke invloed de straling heeft in een oven, welke speciaal ontworpen is voor warmtetransmissie door convectie. De invloed van de geforceerde convectie is duidelijk te onderkennen. De bedoeling hiervan is de isolerende luchtfilm in de nabijheid van de te verwarmen oppervlakken te verbreken en zodoende de weerstand tegen warmteoverdracht van de hete lucht op de te verwarmen stof te verkleinen. Het is merkwaardig dat deze luchtfilm t.a. van de warmteoverdracht door straling niet alleen niet van nadeel is, maar m.h.o. op vermijden van verlies van geabsorbeerde stralingswarmte door convectie, zelfs van voordeel.

4.3.2. Gasgevoede straalovens met gematigde temperatuur.

Op grond van successen met electrische stralingsbronnen en naar aanleiding van de sub 4.3.1. genoemde proeven kwam men tot het fabriceren van gasgevoede stralingsovens, waarbij straling dus de hoofdwijze van warmtetransmissie werd met convectie als min of meer onvermijdelijk bijverschijnsel. Pionier in dit opzicht was de Gas Light and Coke Comp. te Londen.

Een voorbeeld van een dergelijke straaloven is de Matthew Hall gas fired Infra-red Black Emitter o.a. beschreven door Machadam (70).

In fig. 17 is een doorsnede geschetst van een black emitter unit., bestaande uit 2 helften (ϕ 2, 3 of 4 ft.; lengte 3 ft.). Deze units kunnen achter elkaar geplaatst worden en vormen dan een tunnel. Elke unit heeft aparte branders in beide helften. Deze gevormde tunnels zijn bestemd en geeigend voor het drogen van gelijksoortige voorwerpen aan de lopende band. De voorwerpen zijn meestal opgehangen aan de transportband, zodat boven in de aaneengesloten series van helften een sleufvormige opening moet vrijblijven.

De temp. van de stralende wand is 650°F, waarbij een golflengte van maximale emissie behoort van ± 50000 Å; ook Nelson en Silman (76) beschrijven dergelijke apparaten, n.l. die van Joseph Lucas Ltd.

Metingen hebben aangetoond, dat per sq.ft. absorberend oppervlak ± 2900 BTU/h worden overgebracht, hetgeen aequivalent is met 6 W/Sq.in. Deze gasgevoede eenheden behalen dus een grotere stralingsdichtheid dan electrische lamp eenheden. Andrew en Chamberlain (4) verrichtten proefnemingen met deze units en geven verschillende verdere bijzonderheden. (Zie ook 5.2.1.3.3.)

Witte synthetische refrigeratorlak werd in dergelijke eenheden wat betreft de primaire laag gedroogd in 3 min. en wat betreft de secundaire laag in minder dan 2 min. Een convectieoven (waarbij de platen beschermd worden tegen straalwerking) deed over hetzelfde resp. 30 en 16 min. (350°F) (76). Latere uitvoeringen zijn voorzien van gegolfde straalplaten, waarbij een vrij aanzienlijke gasbesparing verkregen schijnt te worden (76).

De temp. controle moet worden uitgevoerd met behulp van een, aan de stralende wand vastgelaste, contactthermometer,

TABEL 3

Type oven	wijze van warmteover-dracht	oven Temp. °F. 250	300	400	500	600
natuurlijke convectie	straling %	64.5	65.3	68.2	72.2	76.0
	convectie "	35.5	34.7	31.8	27.8	24.0
geforceerde convectie (5 ft. per sec)	straling %	47.7	48.1	49.0	52.0	57.4
	convectie "	52.3	51.9	51.0	48.0	42.6

welke met een temp-registreertoestel is uitgerust, hetwelk tevens de gastoevoer naar de branders commandeert (76).

Infra-rode straalplaten, door gas verwarmd, worden ook gefabriceerd door de South-Metropolitan Gas Comp., Londen (in de handel gebracht door de la Rue Gas Development Ltd., Londen (6).

Deze platen zijn uitgevoerd in rechthoekige vorm en laten zich samenstellen tot kasten e.d. van allerlei afmeting en vorm. De volgende gegevens worden vermeld:
Het stralende gedeelte wordt gevormd door een speciaal gietijzeren plaat, verwarmd door 10 lichtgevende gasbranders. Aan de achterzijde is de plaat voorzien van een isolerende laag. Het geheel is samen gevat in een metalen kast lang 585 mm., breed 305 mm. en diep 100 mm. Deze eenheden zijn voorzien van steunen voor bevestiging aan het ovenframe. De wandtemp. wordt na 20 min. 200 - 275°C. Al naar gelang van de temp. is de golflengte voor maximale emissie 3 - 13 μ. De totale warmtestroom is daarbij 60 - 100 Kg cal/h. per paneel. Het gasverbruik is 570 L/h bij een druk van 75 - 25 mm W. Ook de Gas Light and Coke Comp. ontwierp dergelijke panelen 4 ft 8" X 3 ft 5" voor het cure proces van "fabrics" met polyvinyl chloride.(12)(13) In Londen werd in 1947 gehouden de "Infra-red heating by gas-exhibition" (14). Ook de lak op artikelen als frames van fietsen, kinderwagens e.d. is met succes in deze gas-ovens met middelmatige temp. te behandelen.

4.3.3. Gasgevoede stralers met hoge temperatuur.

Deze werken met gloeiende stralende oppervlakken van een of ander poreus vuurvast materiaal. Hierbij wordt de straling meer verschoven naar het zichtbare deel van het spectrum. Nelson en Silman (76) geven een vluchtige beschrijving van een dergelijk paneel. Zij geven als warmtestroom op 40000 BTU/Sq ft.h. (ruim 80 W/Sq.in.) Deze bedragen gelden als het te verwarmen voorwerp geheel omringd is door de straalwand. Mackadam (70) geeft op tot 100 W/Sq.in. (50000 BTU/Sq.ft.h.). Andrew en Chamberlain (4) geven eveneens een beschrijving van een z.g. "High temp gas fired Infra-red Unit". De constructie ervan is zo, dat er verticale staven van vuurvast materiaal geplaatst zijn voor een vuurvaste wand. De ruimte tussen de staven en de wand is taps; de verbrandingsgassen stijgen in deze tapse ruimte op. Het stralend oppervlak per unit is 104 sq.in. De panelen kunnen rechtopstaand gebruikt worden, doch ook onder 45° (met de voorkant schuin naar boven) of onder 15° (met de voorkant schuin naar beneden.) Bij een nuttig effect van 55% levert een paneel 18000 BTU/h. Het emissiespectrum is van 15000 Å - 60000 Å met een piek bij 20000 Å.

De auteurs geven cijfers betreffende het verband tussen de warmtestroom en de temp. van de stralingsbron. (De cijfers zijn opgegeven voor straling uit alle richtingen; voor een metalen plaat b.v. valt de helft van de opgegeven waarde op elke zijde van de plaat. Tabel 4.)

Een in Amerika ontwikkeld type is de z.g. "Infra-red-ray gas burner" van de Red ray Manuf. Comp. (56,7). Ze worden gefabriceerd in eenheden van 5½" X 7" welke kunnen worden verenigd tot grotere eenheden (horizontaal of verticaal opgesteld). In fig. 18 is een dergelijke eenheid geschetst. De gastoevoer en luchttoevoer kunnen zodanig worden geregeld, dat de branders van donkerrood tot witgloeiend kunnen branden.(max. temp. 2600°F.).

TABEL 4.

Gegevens stralend gaspaneel.

Temp. stral. bron. °F.	Warmtestroom BTU/Sq.ft.h.	Effectieve warmtestroom voorwerp op 220°F. Indien het voorwerp op temp. komt wordt de effectieve warmteoverdracht geringer. Het verschil is van geen betekenis als de temp. v.d. stralingsbron boven de 600°F. komt. BTU/Sq.ft.h.
400	1600	900
600	4000	3300
1000	9000	8300
1500	25000	24300
2000	63000	62300

Een bezwaar kan zijn, dat de verbrandingsgassen in de droog- of verwarmingsruimte terecht komen, een bezwaar, dat voor de gehele groep van eenheden van hoge temp. geldt.

Hughes (56) becijfert, dat de kosten aan gas minder dan 1/3 bedragen, vergeleken bij die van electriciteit. (Aangenomen, dat er redelijk goedkoop gas te verkrijgen is). Bij deze vergelijking moet voor ogen worden gehouden, dat het gerefereerde artikel verscheen in de Z-W. staten van Amerika.

Hughes acht deze branders bijzonder geschikt voor doeleinden, waarbij het gaat om het verdampen van water. Voor het drogen van producten welke daarbij ontvlambare gassen afgeven zijn deze en dergelijke branders uiteraard ongeschikt. Betreffende het ontvlammingsgevaar bij drogen van lakken werden proeven genomen door Krupp (61). In het algemeen bleek het ontvlammingsgevaar niet zo heel groot te zijn.

Ook Miedendorp (74) en Van Kampen (63) beschrijven deze branders, speciaal in verband met hun geschiktheid voor het textielbedrijf. De gastoevoer wordt vaak electrisch geregeld (automatisch). Voor deze laatste (red ray) branders wordt nog als voordeel opgegeven, dat ze vrij snel afkoelen. Dit kan onder bepaalde omstandigheden van groot belang zijn omdat te lang na-stralen na uitschakeling ongewenst kan zijn.

Tesmer (94, 95) noemt van deze branders de volgende voordelen op: laag brandstofverbruik, min of meer onafhankelijke droging t.a.v. vorm en dikte der werkstukken, geen instellen van de branders zoals bij lampen, ruim bereik van kleuren in laksoorten en zuivere afstelling mogelijk waardoor de snelheid van de transportband onder verschillende omstandigheden niet behoeft te veranderen. Opgemerkt kan worden, dat al dergelijke branders of panelen behalve straalwarmte, ook convectie warmte overdragen (48).

Tot slot kan nog melding worden gemaakt van een patent van Fickle en Wolfe (64). Dit betreft een oven met een verwarmings- en een koelingszone. De verwarming vindt plaats door afgegeven straalwarmte door gloeiende eenheden van weerstands-

draad, tot gloeiing gebracht door vlammen (gas). Op korte afstand boven de gebogen draadeenheden bevinden zich vuurvaste bogen. Het geheel ziet er nogal ingewikkeld uit. Toepassingen werden in de literatuur niet aangetroffen.

4.3.4. Aparte gasbranders.

De "Burdett-burner" heeft een plat cylindervormig stuk gloeimateriaal, aan een zijde uitgehold in de vorm van een reflector, in het centrum waarvan de eigenlijke brander uitkomt, werkend met hoge druklucht. De branders geven zowel straal als convectiewarmte. Temp. 2300°F. Afm. Ø 2½" tot 12" (76,91). (Capaciteit 10000 - 350000 BTU/h.)

Een ander type brander verwarmt een ronde plaat van een warmte-resistent alliage tot 900°F. Werkdruk brander 3 lb/Sq.in. De verbrandingsproducten komen hierbij niet in de oven terecht (76).

De "Carbomatic Radiant Heat Generator" is een type brander, dat veel overeenkomst vertoont met de Red-ray brander (100). Ze branden op gas en druklucht. (Natuurlijk aardgas, gefabriceerd gas of gemengd gas, etc.) Deze branders werken apart; veiligheidsinrichtingen verhinderen het ontijdig ontsteken van een brander door een brandende andere brander. Ze worden, waar nodig, uitgevoerd met een mechanische ontsteking. De lucht wordt geleverd door een fan; indien de brander wordt uitgemaakt blaast de lucht door en zorgt voor een snellere afkoeling.

4.4. Vergelijking Electrische- en gasgevoede Stralers.

Bij electrische stralers wordt de straling direct opgewekt onder invloed van de electrische stroom (verhitting). Bij gas-stralers hebben we meer te maken met een secundaire emissie. Slechts een deel van de warmte wordt hierbij omgezet in straal-warmte; de rest wordt in afvalgassen weggevoerd. Het nuttig effect van gasstralers is in dit opzicht 40-60% (69), hetgeen overigens niet kwaad genoemd kan worden.

Het grootste verschil tussen de twee systemen (waarbij we de gasbranders, die afgassen vrijelijk in de werkruimte lozen, buiten beschouwing laten) is gelegen in de werktemperatuur en daarmede in de piek van maximale emissie.

Bij de "electrische - straling" is de band van 7700 Å - 40000 Å met een piek bij 12000 Å, terwijl bij gaspanelen de band 15000 Å - 180000 Å is, met een piek bij 40000-60000 Å. Men heeft hierbij b.v. al het merkwaardige verschil, dat de droogtijden bij verschillende kleuren verf bij gasstralers niet op dezelfde wijze uiteenlopen als die bij "electrische stralers". (76, 69, 70 e.a.) Bij voorbeeld: bij de zelfde straalenergie waren de tijden, nodig voor het verwarmen van een zwarte plaat en een witte (tot 300°F) bij een black-emitter gas straaloven 150 - resp. 170 seconden, terwijl deze tijden bij electrische straling 150 - resp. 270 seconden waren. Voor het verwarmen van de witte kleur was hier de gasgevoede straler in het voordeel. In het algemeen lopen de droogtijden voor de verschillende kleuren bij "gasbestraling" minder uiteen dan die bij "electrische bestraling". Nelson en Silman (76) sommen de volgende voordelen op voor gasgevoede toestellen:

1. Eenvoudig van constructie, steviger, goedkoper, geen schoonmaak reflectoren.

2. De lagere thermische efficiency wordt goedgemaakt door de lagere kosten van het gas.
3. Gemakkelijk regelbaar door meer of minder gastoevoer.
4. Voor lak-droogdoeleinden kunnen de gasovens goed dienst doen; in sommige gevallen beter dan de electrische tunnels.

Ze besluiten met als hun opinie mede te delen, dat de gassystemen nog een goede toekomst hebben; ze zijn iets in het nadeel omdat hun ontwikkelingsgang achter staat bij die van de, het eerst in toepassing gebrachte, electrische eenheden.

Machadam (70) publiceert een vergelijking van de kosten van een gas-installatie en een electrische installatie, welke precies hetzelfde verrichtten en in een fabriek waren opgesteld (Zie tabel 5).

TABEL 5.

	electrische straler	gasgevoede straler
Tijd van bestraling in min.	6,6	1,7
Lengte verhittingszone ft.	32	9
Brandstof per uur	96 Kw	480 cu ft.
Brandstofkosten voor 600 verwerkte artikelen per uur	4/9	1/-

Uit de cijfers blijkt, dat hier het voordeel wel zwaar aan de kant van de toepassing van gas is gelegen. Dit behoeft natuurlijk niet in alle gevallen op te gaan, maar wijst toch wel op het feit, dat de toepassing van gas in bepaalde gevallen zeer zeker grote mogelijkheden biedt. Andere bronnen noemen gas straalovens eveneens goedkoper (11). In gevallen waar incidenteel verwarmd moet worden, kan electrische straling voordeel opleveren. Hier kan het in en uitschakelen automatisch gebeuren, de warmte wordt a la minute overgebracht en uitgeschakeld. Iets dergelijks is bij gas natuurlijk niet mogelijk.

Een voordeel van gas kan zijn de grotere warmtestroom. Weliswaar is de temp. van electrische stralers hoger, maar het uitstralend oppervlak is zeer klein. Waar het er om gaat zware voorwerpen met grote warmtecapaciteit snel op temp. te brengen, dan wel waar het erom gaat een grote hoeveelheid warmte over te brengen, b.v. bij verdampingsdoeleinden op grotere schaal, zou electriciteit te duur worden en is de gasgevoede straler compacter en goedkoper.

5. Practische toepassingen van warmtetransmissie door infrarode stralen.

5.1. Inleiding.

Aangezien het in deze studie slechts gaat om droging, komen uiteraard een aantal toepassingen van warmtetransmissie door warmtestralen voor bespreking niet in aanmerking.

Bij het bespreken van droogprocessen kan een splitsing gemaakt worden in droogprocessen, waarbij de te verdampen stof een of andere organische vluchtige stof is, en droogprocessen, waarbij de te verdampen stof water is.

Voor de eerste categorie somt Doribéré (40) de volgende mogelijke toepassingen op:
Het drogen van lakken, vernissen, verven, van artikelen uit de electrotechnische industrie, van plastische stoffen en kunstharsen, van bepaalde chemische en pharmaceutische producten en van bepaalde explosieve stoffen

Betreffende de tweede categorie kunnen als mogelijke toepassingen worden genoemd:

1. Verwijderen van water uit minerale stoffen, waarbij het water bepaalde stoffen in oplossing kan houden, waarbij het water als kristalwater kan voorkomen en tenslotte eenvoudig gemengd kan voorkomen met een in dit opzicht inactieve stof
   Voorbeelden; klei, leem, keramische producten, chemische producten, actieve- en ontkleuringskool, pigmenten, neerslagen, poeders, etc.
2. Verwijderen van vocht uit plantaardige stoffen of uit stoffen van plantaardige oorsprong.
   Voorbeelden: vruchten, groenten, zaden, meel, extracten, gommen, rubber, hout, olien, vetten, celluloze producten, papier, textiel, etc.
3. Verwijderen van vocht uit dierlijke stoffen.
   Voorbeelden: extracten, vellen, huiden, eieren, gelatine, caseine, textiel (zijde, wol), olien en vetten, vlees, haar etc.

5.2. Het drogen met infra-rode stralen, waarbij het gaat om het verdampen van andere stoffen dan water.

5.2.1. Het drogen en verharden van lakken e.d.

5.2.1.1. Beschouwing van de proeven van Tiller en Garber e.a.

Zoals reeds in de inleiding van deze studie werd vermeld, begon de practische toepassing van warmteoverbrenging door middel van infra-rode stralen op het gebied van verharden van lakken. Op dit gebied staat de toepassing nog steeds aan de spits. Dat dit proces in dit opzicht zeer goed voldoet blijkt uit zeer veel publicaties (76, 49, 97, 67, 32 e.a.).

Tiller en Garber (92) verrichtten een onderzoek op dit gebied en publiceerden, een theoretische behandeling, waarvan de resultaten belangrijk bijdragen tot een goed inzicht, en welke resultaten ook voor andere toepassingen wel degelijk waarde hebben. Vooropgesteld dient te worden, dat dit onderzoek zuiver goldt verwarmen en dus niet het droogproces. Dat desondanks de opzet juist was moge blijken uit het volgende. Synthetische emaillelakken vereisen een bepaalde "baktijd", dus een bepaalde (zo vlug mogelijke) verwarming tot een bepaalde temperatuur en het gedurende een bepaalde tijd houden op die temperatuur. In feite doet het er weinig toe of men zo'n lak op de ene, dan wel op de andere manier verwarmt, met andere woorden op welke wijze men een bepaalde temperatuur - tijdcurve bewerkstelligt. Het gaat om de temperatuur - tijdcurve zelf. Dit blijkt duidelijk uit de proeven van Ernst en Schuhmacher (41). Hierbij werd voor het bakken van zwarte en witte proefplaatjes de verkregen temperatuur-tijdcurve bij infra-rode bestraling zo precies mogelijk geimiteerd door convectieverwarming. De in beide series verkregen verharde lakken vertoonden practisch geen verschil in eigenschappen betreffende hardheid enz.

Manders (75) maakt gewag van hier te lande genomen proeven door verschillende verffabrieken waaruit de volgende algemene conclusies werden getrokken:

1. Infra-rode straling heeft geen katalytische werking (zoals bij de eerste patenten als vermoeden werd uitgesproken).
2. Uitsluitend de temperatuurverhoging van het materiaal is aansprakelijk voor de snelle droging.

In dit licht bezien zijn de proefnemingen te beschouwen van Tiller en Garber. Het snel op temperatuur komen van de laklaag hangt af van de metaaldikte. Is deze zeer dun, dan zal het b.v. gebeuren, dat lak aan beide zijden even snel verwarmd wordt, dus b.v. ook de zijde, die van de lampen is afgekeerd.(5).
In 3. werd reeds uiteengezet, dat voor berekeningen aangaande practische gevallen veel aannamen moeten worden verricht en dat het ondoenlijk is alles exact in cijfers vast te leggen. Tiller en Garber namen voor hun berekeningen het volgende aan:

1. Regelmatige verdeling van de straalenergie.
2. Regelmatige temperatuurverdeling in de door hun gebruikte proefplaten (dus geen randeffecten).
3. Verwaarlozing van de eventuele heruitstraling.
4. Energie overgebracht door straling dient niet voor verdamping of voor het tot stand brengen van chemische reacties, Uitsluitend dus voor verwarming.
5. Warmteverliezen door convectie zijn recht evenredig met het temperatuurverschil van het verwarmde voorwerp en de omringende lucht.

Hier kan worden volstaan met het bespreken van de verkregen resultaten. Vastgesteld kon worden, dat de empirisch verkregen waarden zeer goed overeenstemden met de on-der boven genoemde aannamen verkregen theoretische uitkomsten. Van belang is b.v. de maximale temperatuur, welke de te verwarmen stof onder bepaalde omstandigheden kan verkrijgen. Hiervoor werd een formule ontwikkeld waaruit bleek, dat deze temperatuur onafhankelijk is van de massa van de te verwarmen stof, maar wel in hoge mate afhankelijk van de temperatuur van de omringende lucht, van de absorbtieeigenschappen van de stof en natuurlijk van de intensiteit van de straling.

In fig. 19 ziet men het verband tussen behaalde temp. van de stof en de tijd voor verschillende stralingsintensiteiten (uitgedrukt in W/Sq.in. bestr. opp.) In fig. 20 is qualitatief het verband te zien tussen de hoeveelheid opgenomen energie en de toegevoegde energie ("performance ratio") in verband met de tijd. Hieruit is duidelijk te zien, dat deze verhouding afneemt naar mate de temperatuur van het verwarmde lichaam stijgt en dus het temperatuursverschil afneemt. In fig. 21 is qualitatief het verband te zien tussen "performance ratio" en luchttemperatuur bij verschillende temperaturen van de verwarmde stof. Duidelijk springt in het oog, dat de "performance ratio" kleiner is als de temperatuur van de lucht lager is dan die van de verwarmde stof. Als de luchttemperatuur hoger is dan de verwarmde stof wordt alle geabsorbeerde energie omgezet in voelbare warmte.

Indien b.v. electrische energie gebruikt zou worden als warmtebron zou het zeer oneconomisch zijn, als de luchttemperatuur indirect door convectieverliezen van de verwarmde stof op de evenwichtstemperatuur gebracht zou moeten worden. Hier zouden dan aparte luchtverhitters (gas- of oliegevoed) moeten worden toegepast. Hierover rapporteert ook Seymour (88). De eerste infra-rode ovens waren open en tochtschilden of iso-

FIG. 19

TEMP. (°F.) VERWARMDE STOF.
500
400
300
200
100
9 WATT/S.I.
6 WATT/S.I.
4 WATT./S.I.
3 WATT./S.I.
1
2
3
4
5
6
TUD IN MINUTEN

T. A. 235

FIG. 20

FIG. 21

T. A. 235

latie werden niet toegepast. Men was van mening, dat alle straling, welke het werkstuk trof, benut werd en dat weinig of geen energie verloren ging. Ervaring veranderde deze opvatting en thans is er neiging om goed geisoleerde ovens toe te passen met reflecterende binnenwanden. Dat hieraan toch nog wel veel man keert tonen soms foto's van betrekkelijk nieuwe installaties.

Als samenvatting mogen de volgende conclusies worden genoemd:

1. Het temperatuursverschil tussen stralingsbron en te verwarmen stof moet zo groot mogelijk zijn wil men een efficiente warmtetransmissie bewerkstelligen.
2. Warmtetransmissie door straling kan onder de juiste omstandigheden de meest efficiente vorm van warmtetransmissie zijn. Dit vindt zijn oorzaak in het feit, dat bij straling de overgebrachte hoeveelheid warmte evenredig is met de vierde macht van het temperatuursverschil terwijl deze bij de andere wijzen van warmteoverdracht direct evenredig is.
3. De luchttemperatuur in de oven is van groot belang. In het algemeen is deze luchttemperatuur een middel om de maximum temperatuur van de te verwarmen stof binnen bepaalde grenzen te regelen.

5.2.1.2. Aanpassing van de lak of verf aan het infra-rode droogproces.

Verwezen kan worden naar verschillende publicaties (76, 31, 41, 42, 73, 79, 4 e.a.) Het is duidelijk dat een eventueel succes van het toepassen van infra-rood drogen evenzeer afhangt van het gebruik van de juiste lak als van de goede apparatuur. Men kan de lakken etc. als volgt indelen:

1. Lakken, waarvoor het oplosmiddel verdampt wordt, achterlatend een bestanddeel (gemengd met pigment) dat geoxydeerd moet worden(type A). Dit oxydatieproces verloopt langzaam bij een temperatuur van 100 - 180°F; het kan evenwel versneld worden bij hogere temperatuur. Toch blijft het geheel proces betrekkelijk langzaam verlopen beneden de graad, waarbij verbranding optreedt.
   b.v. 2 uur nodig bij 200°F.
   10 min. " " 300°F.
   2 " " 350°F. resultaat verbrand
2. Lakken, waarbij het oplosmiddel verdampt en er verder geen verandering optreedt. Deze leveren geen speciale moeilijkheden. Het zijn evenwel niet de mooie, extra hard wordende lakken zoals die worden toegepast tegenwoordig.
3. Lakken, waarbij het oplosmiddel of de verdunner verdampt, achterlatend bestanddelen, welke onder temperatuursverhoging moeten polymeriseren (type B). Dit proces verloopt langzaam bij 100 - 150°F., maar boven een critische temperatuur verloopt het proces zeer snel. Deze critische temperatuur ligt beneden die temperatuur, waarbij verbranding optreedt.
   b.v. 1 uur nodig bij 180°F.
   1 min. " " 230°F. (klaar)
   indien 5 min. " 230°F. is de glans verdwenen.

De sub 3 genoemde lakken lenen zich speciaal voor bakken met infra-rode stralen.

In het algemeen kan er sprake zijn van een mengsel (type A en type B). De proefnemingen van Ernst en Schuhmacher zijn in dit opzicht zeer illustratief. Ze bereidden lakken alle met een chroom-groen pigment en alle met dezelfde hoeveelheid vluchtige bestanddelen. Uitgaande van twee basislakken

werden nog drie tussenvormen gemaakt (zie tabel 6.).

TABEL 6.

	gew.% type A	gew. % type B
groen 1	100	0,0
" 2	87,5	12,5
" 3	75,0	25,0
" 4	50,0	50,0
" 5	0,0	100,0

In fig. 22 ziet men het verband van de "Sward"-hardheid van de film en de bakprocesduur. De bereikte temperaturen van de proef plaatjes na bepaalde tijden zijn eveneens aangegeven.

Men ziet dus het effect van de aanwezigheid van een polymeriserende hars (B) in toenemende graad. In fig. 23 ziet men, dat bij de 50% verhouding de hardheid na 6 - 9 - 24 min. practisch gelijk is, of anders gezegd: een minimale verhouding van 50% is nodig in dit geval.(langere baktijden komen uiteraard niet in aanmerking) Ernst en Schuhmacher bepaalden nog het temp. verloop van verschillende proefplaatjes met verschillende lak bedekt na bepaalde tijden bestraling. In tabel 7 zijn de factoren Z opgegeven, alsmede de maximale temperaturen van de proef plaatjes na 9 min. bestraling.

TABEL 7.

Kleur van de lak op proef-plaatjes	Ta max °F	Ta begin °F	T_1 °F	Z
lampenzwart	506	77	150	0,96
zwart droog	441	69	130	0,89
zwart nat	440	69	126	0,87
groen	415	75	120	0,73
rood	393	74	124	0,64
geel	354	78	130	0,56
wit	306	73	114	0,38

De factoren Z zijn berekend op basis Z is 0,96 aangenomen voor het plaatje met lampenzwart.

De bruikbaarheid van de verschillende pigmenten, welke in de lak of verf zouden kunnen worden toegepast, hangt voornamelijk samen met de specifieke eigenschappen betreffende het absorberend vermogen bij verschillende golflengten. Nelson en Silman (76) geven hierover waarden in een tabel. Ook hier blijkt dat bij grotere golflengten minder reflectiviteit optreedt. Bij de kortere golflengten is de reflectiviteit speciaal groot in de lichte kleuren.

5.2.1.3. Apparatuur.

5.2.1.3.1. Open eenheden.

De eerste toepassingen betreffende infra-rode straling betroffen reparaties. Het was de Ford Motor Comp. die al

FIG.22

FIG.23

T. A. 235

eerste de infra-rode lampbestraling voor het drogen van lakken op auto's toepaste. Eerst speciaal voor de herstelling van de beschadigingen waarbij het grote voordeel verkregen werd, dat glaspanelen e.d. niet verwijderd behoefden te worden. Later ook voor alle "baking of finishes".(43) Het is voor dit soort werk, dat nog steeds open eenheden worden toegepast, omdat gesloten eenheden hier onmogelijk zijn. Open eenheden worden toegepast in alle gevallen waarbij een min of meer incidenteel karakter is te onderkennen. Bij speciaal gevormde en grote werkstukken en waarbij een zekere vrijheid van beweging nodig is. Het feit dat deze eenheden minder efficient werken moet op de koop worden toe genomen. Ze worden vaak transportabel uitgevoerd (met lampen of dull-emitters). Soms worden meerdere eenheden om het werkstuk opgesteld. Vaak worden losse tochtschilde gebruikt om afkoeling door trek tegen te gaan.

5.2.1.3.2. Gesloten eenheden. (76 e.a.)

Deze worden o.a. speciaal gebruikt voor het bakken van de "finishes" van metalen artikelen van plaatijzer aan de lopende band. In het algemeen dus van artikelen met een grote verhouding oppervlak/massa. Hierbij is uitsluitend van belang de factor bereikte temperatuur/tijd van bestraling. De luchttemperatuur moet zo mogelijk even hoog of iets hoger dan het werkstuk zijn (Tiller en Garber), de warmteverliezen moeten tot een minimum beperkt blijven. De wanden zijn, voor zover niet in beslag genomen door reflectoren inwendig voorzien van een reflecterende laag ("Alzak"- proces)en de oven dient geisoleerd te zijn. Het zal uiteraard onmogelijk zijn een oven te construeren waarin werkelijk alle warmte alleen door straling wordt overgebracht. Maar wel zal vermoedelijk beter aan het "zuivere stralingsprincipe" tegemoet gekomen kunnen worden dan bij een convectieoven aan een "zuiver convectie principe"(zo dit laatste gewenst ware).

In fig. 24 is aangegeven de op elk ogenblik bestaande verdeling van de straalenergie bij het bestralen van een plaatje met droge zwarte verf (dus onder laboratoriumomstandigheden), gevonden bij een onderzoek van Ernst en Schuhmacher (41).

De reflectieverliezen zijn als constant aangenomen (zwartheidsgraad van een"zwart lich" onafhankelijk van de temperatuur). Hier was dus geen sprake van enige verdamping, doch daar de hiervoor benodigde energie bij het bakken van emaillelak zeer gering is, gaat de vergelijking goed op. Aangezien de luchttemp. Tl hoger was dan de oorspronkelijke temp. van het plaatje Ta_o, werd ook warmte overgebracht door convectie totdat Ta is Tl. Vanaf dit moment vonden er convectieverliezen plaats (koel effect).

De in fig. 24 aangegeven verhoudingen liggen in een goede practijksoven anders, doch in principe geeft fig. 24 het juiste beeld. In een goede oven moet een behoorlijk hoge luchttemp. heersen, waardoor weinig convectie verliezen. Belangrijk in dit opzicht is het onderzoek van Carne (29).

Deze komt o.a. tot de conclusie, dat de luchttemperatuur voldoende hoog gehouden moet worden en wel speciaal in het geval, dat voorwerpen met sterk gekromde oppervlakken of dat verschillende voorwerpen met uiteenlopende vorm in een oven zouden worden behandeld.

FIG. 24

100
80
60
40
20
% ENERGIE.
CONVECTIE EN UITSTRALINGS VERLIES
NUTTIG VERBRUIKTE ENERGIE
REFLECTIE VERLIES
0
1
2
3
4
5
6
7
TUD IN MINUTEN

T. A. 235

In het laatste geval verdient het aanbeveling om een oven toe te passen met een relatief hoge luchttemperatuur en een middelhoge temperatuur van de stralingsbron (gaspanelen). In fig. 25 ziet men het verband tussen bereikte evenwichtstemp. voorwerp en de warmtetransmissie. In de eerste plaats zijn lijnen aangegeven voor verschillende temperaturen van stralingsbronnen. In de tweede plaats lijnen voor verschillende voorwerpen en verschillende luchttemperaturen. Een voorwerp met ϕ 1/8" zal bij een T_s is 550°F en een luchttemp. van 100°F een evenwicht temp. bereiken van 330°F (warmtetransmissie 9.7 BTU/Sq ft.h). Is de luchttemp. 400°F dan is de evenwichtstemp. 500°F (warmtetransmissie 3,5 BTU/Sq ft.h) en is de luchttemp. 550°F dan is de evenwichtstemp. natuurlijk ook 550°F en vindt er geen warmtetransmissie plaats.

Bij het drogen van lakken en verven is het nodig een zekere afvoer tot stand te brengen van gassen e.d., afkomstig van deze lakken zelve. Hierin vindt een onvermijdelijk warmteverlies plaats. De luchtstroom wordt meestal voorgewarmd door dat de lucht bij het binnentreden eerst de hete contactplaatsen aan de achterzijde van de lampen afkoelt.

Vervolgens vindt een verdere voorwarming plaats door gebruik te maken van de warmte der afvalgassen. Hiervoor moet dus een goed ingericht gescheiden warmte uitwisselingssysteem aanwezig zijn (76 e.a.).

Tegenwoordig kunnen infra-rode straalovens ontworpen worden met verschillende zone's (28). Als minimum heeft men de eerste zone voor het op temp. brengen van de voorwerpen in de kortst mogelijke tijd, en de tweede zone voor het op temp. houden gedurende de vereiste "curing" tijd. Voor de eerste zone is in het algemeen meer energie nodig dan voor de tweede. Bij b.v. vier zones heeft men:

1. een vóór-verwarmingszone, welke gerecirculeerde lucht gebruikt, en waaruit de eerst ontwijkende vluchtige oplosmiddelen worden afgevoerd.
2. een zone om de voorwerpen op de vereiste temp. te brengen.
3. een zone, waarin de voorwerpen gedurende de juiste tijd op de juiste temp. gehouden worden.
4. een laatste zone, waar geen straalenergie meer wordt toegevoerd, maar waarin het laatste deel van de "curing"-periode plaats vindt onder invloed van temp. werkstuk en temp. omringende lucht.

De constructie van de ovens bestaat meestal uit een frame, waaraan de hoofdvorm van de oven is te onderkennen en welke vorm is aangepast aan de te behandelen voorwerpen. De lampen zijn meestal aangebracht in panelen van standaardvorm, passend op de frameconstructie. Speciale voorzieningen moeten het mogelijk maken de reflectoren te reinigen, lampen te verwisselen, reparaties te verrichten zonder dat het gehele bedrijf behoeft te stagneren. Soms zijn de panelen omklapbaar uitgevoerd. (76, 75 b e.a.)

De bestraling moet homogeen zijn en alle delen van het werkstuk moeten gelijkelijk bestraald worden. Volgens Guen en Deribere doet men het beste de lampen te plaatsen in een gelijkzijdig-driehoeks verband (zijden 205 mm) (103). Zij werkten met Mazda-lampen en constateerden daarmede, dat op bovenbeschreven wijze van plaatsing de plaatselijke afwijkingen van de bestralingsintensiteit maximaal 7% bedroegen van de gemiddelde bestralingsintensiteit. De lamp-afstand tot het te drogen materiaal was eveneens plus minus 205 mm.

BEPALING VAN DE EVENWICHTS TEMP. VA
WERPEN VAN VERSCHILLENDE DIKTE BIJ
LENDE LUCHTTEMPERATUREN EN VERS
DE STRALINGS-TEMPERATUREN, ALSME
DAARBIJ PLAATS VINDENDE WARMTETR
(NAAR CARNE ,29)
LIJNEN VOOR STELLENDE CONVECTIE VERLIEZEN
VOOR VER-SCHILLENDE OVEN TEMPERATUREN
LIJNEN VOOR ABSORBTIE VAN DE STRALING VOOR VERSCHILLENDE OVENWAND TEMPERATUREN
Ts=750 °F
Ts=700 °F
Ts=650 °F
Ts=600 °F
Ts=550 °F
Ts=500 °F
Ts=450 °F
Tl=100 °F
Tl=200 °F
Tl=300 °F
Tl=400 °F
Tl=500 °F
1/8"
1/2"
1 1/2"
WARMTE TRANSMISSIE BTU/SQ.FT./H.
EVENWICHTS - OPP. TEMP. VOORWERP °F = Ta
100
200
300
400
500
600
700
800
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

Fig

T. A

Andere, (Amerikaanse) opgaven zijn hiervoor 6"-24" (150-600mm)(5). Men ziet bij Amerikaanse uitvoeringen ook een vierkant verband en bij de Engelse trogreflectoren (18,17). Meestal wordt de uiteindelijke ovenvorm en lamp-verdeling en afstand nagegaan aan de hand van proeven met verstelbare proefovens (66). In dit verband kan nog gewezen worden op het gebruik van proef-meetverven (Faber,Stein bei Nürnberg) welke 2, 3 of 4 omslagkleuren vertonen bij bepaalde temperaturen en welke in dunne strepen worden aangebracht en zodoende geen eigen invloed op de bereikte temp. uitoefenen (5). De voorwerpen worden, indien mogelijk, zoveel mogelijk opgehangen, waardoor alle vlakken bestraald kunnen worden. Verder is het van voordeel, dat de voorwerpen onder de bestraling door bewegen, zodat hierdoor ook alle bestralingsonregelmatigheden zoveel mogelijk worden vereffend (5). De capaciteit van de ovens kan gewijzigd worden door het uitschakelen van bepaalde groepen van lampen,(66). Voor massaproductie bij vliegtuigonderdelen is het systeem van het werken met lampen combinaties welke automatisch aan en uitgaan (elke groep individueel volgens een van te voren precies uitgezocht schema) wel tot in de perfectie opgevoerd. Hierdoor krijgt elk onderdeel van een oppervlak de juiste bestralingsduur en op tijd. Als alle lampen automatisch uit zijn is de finish klaar. Het spreekt vanzelf dat iets dergelijks alleen bij automobiel- en vliegtuig- massafabricatie kan worden doorgevoerd (20). Overigens is het wel merkwaardig dat men hierbij ovens toepast, welke nog min of meer open zijn uitgevoerd.

In fig. 26 is zeer schematisch aangegeven een doorsnede van een tunnel met lampbestraling; in fig. 27, eveneens schematisch een gasoven (speciaal voor experimenteel onderzoek drogen automobiel body's)(86).

Bij gasovens moet de constructie zodanig zijn, dat brandgevaar vermeden moet worden. In dit opzicht zijn ze niet in alle gevallen toe te passen.

Het behoeft geen betoog, dat het meten van de heersende temperaturen van groot belang is en dat hiervoor goede meetinstrumenten aanwezig dienen te zijn (95).

Tot slot kan voor de goede orde nog melding worden gemaakt van een patent, n.l. dat van Bates (23), daterend van 1939 betreffende een tunnel, voorzien van stralingsbronnen en reflectoren met transporteur en "slot-like" openingen voor het drogen van lakken op kleine voorwerpen.

5.2.1.3.3. Berekeningen.

In fig. 28 ziet men een voorbeeld van de wijze, waarop lampenfabrikanten de berekeningen hebben vergemakkelijkt. Men kan uit deze grafische voorstelling, uitgaande van een bepaalde "cure"-tijd en een bepaalde temperatuur, bij een bepaalde kleur van de lak, met inachtname van de dikte van de metalen plaat, vinden welke intensiteit van stralingsenergie nodig is. Deze figuur geldt uiteraard uitsluitend voor lampbestraling (45). Het is duidelijk, dat het hierbij gaat om massaproductie, waarbij de "cure"-tijd experimenteel zeer precies moet zijn uitgemaakt en waarbij de afstand van de stralingsbronnen tot de verschillende te bestralen oppervlakken volkomen moet zijn aangepast aan een gelijkmatige bestralingsintensiteit.

Proefovens zijn dan ook onmisbaar. Ook voor toepassing van gasgevoede ovens. Verwezen kan worden naar publicaties

FIG. 26

FIG. 27

T. A. 235

Bepaling van de benodigde tijd bij bepaalde stralingsintensiteit (of omgekeerd) voor verschillende plaatdikte en kleur.

C.M. HALL. LAMP. Co.
DETROIT. MICH.

FIG.28

T.A. 235

hierover (29, 4). Men kan wel aannemen, dat het experimenteel onderzoek met proefovens en vervolgens het experimenteren met eigenlijke apparatuur belangrijker is dan het trachten om alles in de finesses vooraf door berekening vast te stellen. Dit geldt vooral voor gasovens en dan nog wel zeer speciaal voor gas-stralers met hoge temperatuur en dikkere voorwerpen. Bij deze laatste kloppen de berekeningen van de te verkrijgen oppervlakte temperaturen niet met de werkelijk verkregene, zodat een kortere bestraling, dan volgens berekening nodig, voldoende is.

TABEL 8.
Tijden nodig om een plaat 1 ft. square (opp. 2 ft. sq.) door en door in temp. te doen stijgen van 60°F tot 220°F. (minuten)

gauge No.	dikte inch	In een convectieoven x) met temp.				In een infra-rode tunnel met temp. paneel.	
		350°F	400°F	500°F	600°F	600°F	1600°F
22	0,0312	1,5	1,2	0,7	0,45	0,4	-
14	0,0785	3,5	3,0	1,8	1,2	1,0	-
10	0,0125	6,2	4,4	2,8	1,9	1,6	0,125
4	0,25	12,0	9,9	5,7	3,9	3,2	1,25
-	0,5	24,0	19,8	11,4	7,8	6,8	0,5

x)					
BTU/h	450	490	763	1018	door convectie overgebracht
BTU/h	946	1275	2200	3492	" radiatie "
BTU/h	1396	1765	2963	4510	totaal

Andrew en Chamberlain (4) voerden berekeningen uit. In Tabel 8 ziet men het resultaat van enige berekeningen. Men ziet, dat in een gewone oven, vooral bij toepassing van hoge temp. het aandeel van de radiatie aanzienlijk is. Deze cijfers slaan op gelijkmatige, door en door verkregen warmte, terwijl bij drogen van verf alleen de oppervlakte temp. van belang is.

In Tabel 9 ziet men het verschil tussen berekende en gevonden waarden voor de oppervlakte temp. Voor infra-rode bestraling is alleen een tabel gegeven voor de middelmatige temp. (630°F). Bij deze temp. kloppen de waarden vrij goed, voor panelen met hoge temp. zijn de verschillen vrij groot. Voor het drogen van lakken e.d. gaat het alleen om de oppervlakte temperatuur. De cijfers in Tabel 9 geven een idee van de orde van grootte van de aanwarmtijden onder bepaalde omstandigheden. Voor de infra-rode tunnel hebben ze betrekking op een black-emitter. Voor een berekening moet men ten naaste bij de gewenste stralingsbron vaststellen in verband met de warmtecapaciteit der gelakte voorwerpen en in verband daarmede gewenste warmtestroom (zie Tabel 4). Practische proeven moeten de uiteindelijke werkwijze in details uitmaken.

5.2.1.4. Nabeschouwing.

Indien men moet uitmaken of in een bepaald geval infra-rode straling de geijkte wijze van droging van gelakte voorwerpen zal zijn moet men bedenken dat het niet aangaat of

TABEL 9.

		gewone oven						infra rode tunnel			
		tijd in minuten						tijd in seconden			
temp. oven/ paneel		250°F		400°F		600°F		630°F		630°F	
bereikte epp. temp.		220°F		220°F		220°F		350°F		220°F	
gange No.	dikte "	bere-kend	gevon-den	bere-kend	gevon-den	bere-kend	gevon-den	bere-kend	gevon-den	bere-kend	gevon-den
22	0.0312	2.4	3.0	0.77	1.2	0.34	0.4	45	50	15	17
16	0.0625	4.7	5.0	1.54	1.5	0.68	0.5	78	91	29	34
14	0.0785	5.9	6.2	1.94	1.7	0.86	0.75	96	112	37	41
12	0.0991	7.4	8.4	2.5	2.3	1.1	1.0	122	138	46	50
10	0.125	9.3	9.5	3.08	2.5	1.36	1.2	155	160	58	60
4	0.25	18.6	14.2	6.16	4.5	2.72	1.5	313	303	116	110
-	0.5	37.2	19.0	12.32	7.0	5.44	2.2	626	585	232	214

convectie of radiatie als een panacé voor alle "finish curing" problemen voor te stellen. Elk geval heeft zijn eigenaardigheden. Clauser (28) somt de volgende punten op, welke in beschouwing dienen te worden genomen:

1. het type van de finish en de kleur,
2. de kwaliteit van de finish,
3. de snelheid van het proces in verband daarmede,
4. de vorm, dikte etc. van de voorwerpen,
5. de ruimte beschikbaar voor de installatie,
6. de gewenste soepelheid, karakter (massa productie of niet),
7. werkomstandigheden,
8. kosten.

Infra-rode lak-droging is speciaal daar op z'n plaats waar het gaat om massa productie, eenvoudig gevormde voorwerpen met een vrij grote verhouding opp./massa, in het algemeen indien het proces bewerkstelligd kan worden bij betrekkelijk hoge temp. en in korte tijd. In deze gevallen kunnen zowel electrische als gasgevoede eenheden worden toegepast. Electrische lenen zich beter voor precies "afgetimed" werk. Gasgevoede lenen zich beter voor voorwerpen met grotere warmtecapaciteit of met uiteenlopende kleuren. Indien deze omstandigheden niet aanwezig zijn zal men aangewezen zijn op convectiedroging.

In dit verband kan worden opgemerkt, dat de convectieovens grote verbetering hebben ondergaan de laatste jaren, juist als gevolg van de verkregen inzichten betreffende de radiatie. De oven temperatuur mag dan niet komen boven de temp. waarbij de lak zou verbranden. Als de wanden dan goed geisoleerd zijn krijgen ze de temp. van de lucht en men krijgt op deze wijze ook een soort straaloven gecombineerd met convectie (4,42). Ook zal het voor zware voorwerpen met b.v. diepe groeven e.d. welke zich moeilijk voor een gelijkmatige bestraling lenen, aanbeveling verdienen de oven zo in te richten, dat eerst de voorwerpen binnen de kortst mogelijk tijd op temp. gebracht worden door straalwarmte en dat ze daarna een soort convectie compartiment passeren, waarin de temp. goed gelijkmatig kan doordringen, waar de juiste luchttemp. convectie verliezen voorkomt en waar geen kans meer is op verbranden van de finish. Men plukt dan toch de vruchten van de efficiente warmtetransmissie door straling als gevolg van het mogelijke grote temp. verschil stralingsbron en absorberend oppervlak (warmtetransmissie bij straling evenredig met 4e macht temp. verschil).

5.2.2. Het drogen van electrotechnische artikelen.

Het drogen van isolerende lakken en vernissen van wikkelingen in de electrotechnische industrie is nauw verwant met het droog- en verhardingsproces van lakken op metalen voorwerpen. Alle mogelijke onderdelen en artikelen zijn vaak geïmpregneerd met isolerende vernissen, welke ge"cured" moeten worden. Een temp. grens van 150°C. is nodig voor het isolerende organische materiaal (17). In een convectieoven was de benodigde tijdsduur niet zelden 24 uur. Daar verschillende van deze onderdelen een vrij grote warmtecapaciteit kunnen bezitten is er veel tijd nodig voor het op temperatuur brengen. Hierbij kan infra-rode straling aanzienlijke tijdsbesparing geven. Dat droogtijden voor dergelijke voorwerpen tot 2 - 3 uur worden teruggebracht is een voorkomend verschijnsel (bij gebruik van moderne synthetische vernissen).

De omstandigheden en problemen lopen goeddeels parallel met die betreffende het drogen van lakken e.d. zodat gevoeglijk kan worden verwezen naar hoofdstuk 5.2.1.

5.2.3. Het drogen van andere producten waaruit een organische stof verdampt moet worden.

In verband met het gevaar voor ontvlamming zal meestal electrische straaldroging de aangewezen weg zijn. Het transmissiespectrum van de te verdampen stof zal aanwijzingen moeten geven betreffende de optimale golflengte, waarna de keuze kan vallen op een der electrische stralingsbronnen. De technische uitvoering zal van elk geval in het bijzonder afhangen en de verdere principes verschillen niet van die welke in het voorgaande, en in het volgende (betreffende het verdampen van water) behandeld werden en worden.

Van Olsen bestaat een van 1942 daterend patent (77) betreffende het drogen van gekorreld organisch nitro-explosief materiaal op een transportband onder lampbestraling (droogtijd minimum 5 min.; temp. 65°C.).

5.3. Het drogen met behulp van infra-rode stralen, waarbij het gaat om het verdampen van water.

5.3.1. Inleiding.

Het drogen van oppervlakken en stoffen, waarbij de te verdampen stof water is, is een veelvuldig voorkomend industrieel probleem. In 5.1. werden voorbeelden opgenoemd.

In een convectieoven wordt de warmte door convectie overgebracht door een verhitte luchtstroom, waarbij deze luchtstroom dan tevens moet zorgen voor het verwijderen van de door de te drogen stof afgestane waterdamp. Het is duidelijk, dat voor het verwarmen van de stof en het daardoor tot verdamping brengen van het vocht erin straalwarmte op zichzelf voldoende is en een luchtstroom als medium onnodig zou zijn. Toch zou men zich kunnen indenken, dat voor het afvoeren van de ontstane waterdamp een bepaalde luchtstroom nodig zou kunnen zijn, daar anders een verzadigde atmosfeer zou ontstaan, waardoor als gevolg van het intreden van een bepaalde evenwichtstoestand de verdere verdamping zou worden geremd. Ook zou de mogelijkheid, dat de min of meer verzadigde waterdampatmosfeer te veel van de infra-rode straling zou absorberen, kunnen ontstaan. In dit verband is het nuttig het absorbtie spectrum van waterdamp te kennen (zie fig. 29). Hieruit is te zien dat voor verschillende technische stralingsbronnen de absorbtie vrij hoog is. Waar evenwel een luchtstroom tevens convectieverliezen tot gevolg heeft is het zonder meer duidelijk, dat de mate ervan proefondervindelijk zal moeten worden bepaald.

Een verder voordeel van straalwarmte tegenover convectie zou kunnen zijn, dat in het eerste geval de warmte als gevolg van het meer doordringen van de infra-rode stralen meer door en door zou worden overgebracht met als gevolg een drogende werking van binnen uit. Intussen is het doordringend vermogen van warmtestralen in water vrij gering zodat men hiervan in dit opzicht niet te veel verwachtingen dient te koesteren (hoofdst. 3., fig. 5, 6 en 7).

In de practijk is het van groot belang of het water eenvoudig gemengd of gebonden voorkomt of in hydraatvorm. Verder kan het met een stof gemengd of gebonden voorkomen met een oppervlak, dat warmtestralen goeddeels reflecteert. Voor elk practisch geval zal men zich dan ook empirisch op de hoogte moeten stellen omtrent mogelijkheden en resultaten.

5.3.2. Droogmechanisme en droogsnelheid bij infrarode straling.

Stout, Caplan en Baird verrichtten een grondig onderzoek in zake het droogproces met behulp van warmtestralen, waar bij dit proces vergeleken werd met atmosferische- en vacuumdroging (91).

Ze deden de proeven met grof, middel en fijn zand, met verschillende soorten zeep en met Mg -Stearaat.

De oven welke ze gebruikten was gefabriceerd van Masonite-board (¼"dik), aan een zijde verbonden met een fan (verbindingspijp 8"). Als stralingsbron in de oven fungeerde een stel lampen (19 stuks 250 Watt R 40 lampen, geplaatst in een gelijkzijdig driehoeksverband op afstanden van 6"). De luchtsnelheid werd gemeten door een speciaal geconstrueerde Al nor-Velometer voor lage snelheden, nauwkeurig tot op 3% voor snelheden van 50-450ft/min. Teneinde de vochtverdeling in de te onderzoeken stof te weten moest deze stof worden bemonsterd in lagen van bekende dikte. Hiervoor werd een speciale inrichting ontworpen, waardoor het mogelijk was laag voor laag te scheiden en te onderzoeken. De temperaturen werden gemeten door een koper-constantaan contactthermometer (No. 40 B & S gage) geplaatst in de koek (de stof werd n.l. in de vorm van een koek van bepaalde dikte onderzocht).

Telkens na een bepaalde tijd werden de temp. van de koek en van de lucht opgenomen; de thermometer van de koek werd verwijderd en door de speciale inrichting werden telkens laagjes, bij zand b.v. ter dikte van 1/16 " gescheiden en onderzocht (gedroogd bij 175°C tot constant gewicht).

Bij de proeven met drogen in vacuum werd een "Standard Buflovac B-5 Vacuum Shelf Dryer" toegepast, welke verwarmd werd door stoom met een druk van 25 lb/s.i. Voor het bemonsteren na een bepaalde drogingsperiode (nadat de temp. van de koek was bepaald) werd de koek wederom op dezelfde wijze als bij straaldroging bemonsterd en geanalyseerd. Bij de onderzoekingen betreffende gewone luchtdroging werd op overeenkomstige wijze gehandeld bij de bemonstering. De luchttemp. werd gemeten met een kwikthermometer. Het zand werd voor de proeven verzadigd met water; de zeep niet. Deze werd wel ter dege homogeen gemengd. De zeep werd bemonsterd in dunnere schijfjes (1/32") en het vochtgehalte werd bepaald door drogen bij 150°C tot constant gewicht. Er werd een groot aantal waarnemingen verricht onder verschillende omstandigheden. Een onderzoek werd ingesteld teneinde een vergelijking te kunnen maken tussen het gedrag van zand bij drogen door infra-rode stralen en drogen volgens andere werkwijzen.

De omstandigheden, die werden aangelegd, waren hierbij:

1. Verschillende afstanden van de stralingsbron, terwijl de l luchtsnelheid 500 ft/min. bedroeg.
2. Verschillende soorten zand werden gebruikt.
3. Bij een der soorten zand werd onder vacuum gedroogd bij 29-20-10- en 0 inch kwik en 25 lb/s.q. stoomdruk.

FIG. 29.

ABSORBTIE VAN WATERDAMP
100%
80%
60%
40%
20%
0%
ABSORBTIE %
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
GOLFLENGTE IN 1000 A°

T.A. 235

4. Bij dezelfde soort zand, waarmede de vacuumdroging werd verricht, werd eveneens een gewone luchtdroging verricht bij kamertemp. en zonder luchtstroom.

Ook werd een onderzoek ingesteld naar de verdampsnelheid (in dit geval uitgedrukt als lb verdampt water per Sq.ft.). Hierbij werd dezelfde apparatuur gebruikt. Het monster moest evenwel voortdurend gewogen kunnen worden, zodat de tijden konden worden genoteerd, waarin een bepaald verder gewichtsverlies was opgetreden. Dit werd voortgezet tot een tijdstip, waarop minder dan 1 gr. gewichtsverlies in 15 min. werd geregistreerd.

Onderscheid werd gemaakt tussen constante verdampsnelheid, welke optreedt totdat het vochtgehalte is gedaald tot een bepaalde kritische waarde (bij zand plus minus 10% van het droge materiaal), beneden welke kritische waarde verdampsnelheid niet meer constant blijft, doch dalend wordt.

De verdampsnelheid werd bepaald bij wisselende luchtsnelheden en vergeleken bij straal- en convectiedroging met dezelfde temperaturen.

Conclusies uit de proeven van Stout, Caplain en Baird.

Het is in dit bestek onnodig de resultaten in detail te vermelden. Volstaan wordt met een overzicht van het essentiele van de conclusies.

1. Aard van de droging zelf.
In fig. 30 zijn getekend drie stel curven, respectievelijk betrekking hebbend op drogen met behulp van warmtestralen, op drogen onder vacuum en op drogen aan de lucht. Deze curven zijn samengesteld uit punten, aangevend het gemiddelde vochtgehalte van de zandlaag boven een bepaald punt in de koek. Hoe dichter men aan de oppervlakte komt, hoe lager het gemiddelde vochtgehalte is van de totale laag boven het betreffende punt (aannemende dat het droogproces reeds voor een deel gevorderd is). Elk stel curven bestaat uit 5 stuks, respectievelijk betrekking hebbend op 5 verschillende etappen van het droogproces. (Deze curven zijn min of meer analoog met die, welke bij zeefanalyses worden gebruikt.) Uit de curven blijkt, dat het schijnbare verdampingsvlak bij de 3 droogmethoden op geheel analoge wijze zakt. Dit wil evenwel niet zeggen, dat het mechanisme van droging in alle drie gevallen geheel en al identiek is. Wel is het een indicatie, dat het mechanisme van de vochtstroom naar de oppervlakte bij de drie methoden niet verschilt. Bij deze vochtstroom spelen in alle drie gevallen diffusie, capillaire werking en s.g. een rol.

2. De stralingsenergie is slechts een snellere methode van warmtetransmissie, welke plaats vindt onafhankelijk van enige weerstand van luchtfilm of geleiding.

3. Het doordringingsvermogen is niet groter dan 1/16".

4. De verdampsnelheid daalt bij stijgende luchtsnelheid. (zie fig. 31.) Als gevolg van het feit, dat straling onafhankelijk is van luchtweerstanden.
Ter toelichting het volgende:
De warmteuitwisseling tussen stof en lucht door convectie vindt plaats volgens

$$Q_c = V_c\,(t_l - t_a) \qquad \text{,(zie nomenclatuur)}$$

welke waarde positief wordt voor $t_l > t_a$.

In dit geval (bij infra-rode straling) is de lucht niet verwarmd en is Qc dus negatief. Het totale saldo warmteopname (absorbtie- verlies door convectie) is dus Qs - Qc. Een vergroting van de luchtsnelheid brengt mede een verhoging van U_c dus een vergroting van Qc, dus een verkleining van het saldo Qs - Qc, m.a.w. er zijn minder calorien beschikbaar voor verdamping.

5. De waarden van de verdampsnelheid, verkregen bij het drogen van zand met straalwarmte waren meer dan twee maal zo hoog dan die verkregen door convectie droging met dezelfde temp. in de koek, luchtvochtigheid en luchtsnelheid.

6. Vergroting van de afstand voor de stralingsbron bracht verlaging van de verdampsnelheid mede; bij toepassing van grote luchtsnelheden vervaagt het verschil (zie fig. 31).

7. Variatie in koekdikte (tussen 1/8" en 1") had geen invloed op de constante verdampsnelheid.

8. Hoewel de luchtvochtigheid niet speciaal werd beinvloed en men dus alleen de invloed van de eventueel toevallig voorkomende fluctuaties in de vochtigheid van de toegepaste buitenlucht kon nagaan, bleek deze niet van merkbare aard te zijn op de grootte van de constante verdampsnelheid.

9. Betreffende de phase van dalende verdampsnelheid deden de onderzoekers de ontdekking, dat er een rechtlijnig verband bestaat tusson log. verdampsnelheid en log. vochtgehalte van de stof, waardoor de curve van dalende verdampsnelheid t.o.v. vochtgehalte stof van het karakter $y = cx^n$ bleek te zijn.

10. Het drogen van magnesiumstearaat door infra-rode stralen. De constante verdampsnelheid voor deze stof was aanzienlijk lager dan die voor zand. De hoofdoorzaak van dit feit kan hierin worden gezocht, dat de kleur van het Mg-stearaat helder wit was en dus t.a.v. de infra-rode straling een veel geringer absorbtievermogen moest hebben dan het bruingele zand. Het bleek nogal moeilijk te zijn het watergehalte te doen dalen tot een redelijk laag peil, zonder dat er plaatselijk oververhitting optrad. De temp. van de stof moest daarom laag gehouden worden door toepassing van een voldoend hoge luchtsnelheid (250-450 ft/min).

11. Het drogen van zeep door infra-rode stralen. Dit bleek moeilijk, omdat er snel oppervlakkige harde laagjes ontstonden, moeilijk doordringbaar voor vocht. De straaldroging bood hierbij geen voordelen boven de gebruikelijke wijze van droging, t.w. zeer langzame droging met lucht van grote vochtigheid.

5.3.3. Keuze van de stralingsbron en apparatuur.

Voor het probleem drogen met behulp van infra-rode stralen geeft het onderzoek van Stout, Caplan en Baird belangrijke aanwijzingen, zij het ook, dat het probleem met dat onderzoek lang niet volledig is opgelost. Door de eenzijdige keuze van stralingsbron rijzen er allerlei onopgeloste vraagpunten. Het bleek, dat met lampen als stralingsbron, de penetratie toch zeer gering was te noemen. Daarbij was het droogproces

FIG.30
HOEVEELHEID VOCHT IN % BEREKEND OP DROOG ZAND
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
DIEPTE ONDER DE OPPERVLAKTE IN 1/16 INCHES.
DROGEN MET INFRAROOD STRALEN EN LUCHTSTROOM
DROGEN ONDER VACUUM (10")
DROGEN AAN DE LUCHT ZONDER LUCHTSTROOM.

T. A. 235

FIG. 31.

FIG. 32.

T.A. 235

voor zover betreft het dalen van het schijnbare verdampingsvlak vrijwel identiek met convectiedroging. Men kan hieruit concluderen dat men hetzelfde kan bereiken met een stralingsbron van lagere temp. en (voor gevallen overeenkomende met het drogen van zand) grotere capaciteit b.v. gasgevoede stralers.

Stralingsbronnen met lagere temp. hebben verder het voordeel, dat de reflectiviteit van lichtgekleurde oppervlakken hierbij kleiner is. In dit verband is het onderzoek van Rees en Ogden (82) interessant. Deze onderzoekers gingen de emissie en absorbtie na van verschillende kleuren textiel betreffende warmtestralen. Het bleek hun dat de absorbtie factor Z bij lagere temperaturen voor de verschillende kleuren niet zo veel uiteenloopt (behalve voor metaaloppervlakken). Zij stelden in dit opzicht de maximale temp. van de stralingsbron op 900°F. Neemt men als voorbeeld het drogen van Mg.stearaat, dan blijkt als negatieve conclusie uit het onderzoek van Stout, Caplan en Baird, dat lampen als stralingsbron gecombineerd met een oneconomisch grote luchtsnelheid, niet de juiste oplossing is. Beter had men voor deze witte stof een gaspaneel kunnen nemen van 650°F, daarbij de stof in zeer dunne lagen drogende. Men had dan hoogstwaarschijnlijk kunnen volstaan met een economisch lage luchtsnelheid.

Voor het geval van het drogen van zand (of van daarmede te vergelijken gevallen als gietvormen, of kleivormen e.d.) kan wel een stralingsbron genomen worden als lampen, wat betreft de temp. Hier behoeft de luchtsnelheid niet oneconomisch te worden opgevoerd, kan in werkelijkheid uiterst klein gehouden worden. Doch ook eventueel goedkoop werkende gasstralers met hoge temp., (Red-ray- of gloeiende panelen) kunnen hier met succes toepassing vinden. Een keuze hangt in dit geval af van de kostenvergelijking electriciteit-gas. Betreft het gevallen van massa-verwerking van gelijksoortige artikelen, dan zal een oven met behoorlijk hoge luchttemperatuur het beste zijn Hier kunnen de ervaringen opgedaan met het bakken van finishes, vrijwel direct worden toegepast. Ging het daar om stukken met grote warmtecapaciteit (zware gietstukken b.v.), hier gaat het erom in korte tijd voldoende calorien over te brengen om de verdampingswarmte te leveren. Open eenheden, hoewel soms niet te vermijden, zullen oneconomisch zijn, gesloten ovens met geijkte luchttemperatuur en zodanige trek als nodig is (maar ook niet meer) zullen het beste zijn.

Voor het geval men warmte gevoelige stoffen moet drogen is de luchtsnelheid een middel om de temp. te regelen. Hier wordt de factor economie op de achtergrond gedrongen. Ook hier zal de keuze van de stralingsbron van gewicht zijn, in vele gevallen zal ook hier een stralingsbron met matige of zelfs lage temp. te prefereren zijn.

5.3.4. Infra-rood drogen in de Keramische industrie.

5.3.4.1. Practische toepassingen.

Hepner (57) beschrijft het infra-rood drogen van de kleivormen van badkuipen en waskuipen e.d., welke tot 42" lang waren en een wanddikte hadden van 1". De inrichting was vrij eenvoudig. De lampen (250 W-110V-R40 drooglampen) waren bevestigd aan een ruwhouten frame, dat om het te drogen voorwerp

werd geplaatst. De wanden worden slechts aan een zijde bestraald. Voor een wasbak van 4'6" waren 20 lampen nodig (5Kw). In 12 uur was de vorm (ter plaatse waar de vorm was gemaakt) gedroogd. De kosten waren lager dan van elk ander toegepast droogsysteem met veel kleiner benodigde ruimte. Voordien moest een dergelijke vorm eerst 2 dagen worden gedroogd aan de lucht op de plaats waar de vorm gemaakt was, na afloop van welke 2 dagen de vorm getransporteerd kon worden naar de door stoom verhitte droogkamer. In deze droogkamer was dan nog een droogtijd nodig van 10-12 dagen (bij 100°F). Het infra-rood drogen gaf dus een tijdsvoordeel van bijna twee weken in de productie cyclus van deze voorwerpen. Hepner somt de volgende voordelen op:

1. Vermijding van de schade, welke voordien het gevolg was van breuk in verband met het transport naar de droogkamer.
2. Geen droogkamer nodig, waardoor meer dan driemaal zoveel ruimte beschikbaar kwam voor het vormen.

Hij geeft als de meest geschiktste lampafstand tot werkstuk op 8". Toch vermeldt hij, dat ook wel grotere afstanden worden toegepast. In elk geval moet gezorgd worden voor een regelmatige stralingsdichtheid, om welke reden voor elk soort werkstuk een speciaal gevormd houten frame beschikbaar moet zijn.

Elders(16) worden toepassingen vermeld waarbij de droogperiode tot 1/10 a 1/12 werd teruggebracht. Ook in een fabriek van slijpstenen konden de drooginstallaties aanzienlijk vereenvoudigd en ook minder omvangrijk gemaakt worden. Er werden 500000 slijpstenen per jaar gefabriceerd; bijzondere zorg voor het afstellen der lampen was niet nodig. Door geleiding werd de geabsorbeerde warmte spoodig gelijkmatig verdeeld.

Volgens een andere bron (34) worden de beste resultaten verkregen door combinatie van infra-rode stralen met hete lucht. Green (46) noemt de volgende toepassingen en resultaten

1. Drogen van het glazuur op tegels en bakstenen. Vroeger 60 min. nodig bij luchtdrogen; thans met straalverwarming 30 sec. (4Kw installatie; 375 W lampen).
2. Toepassing infra-rood drogen verhoogde in een bepaald geval de productie van 2600 op 4800 stuks per dag, waarbij de kosten met 40% daalden.

Green noemt o.a. 3 toepassingsmogelijkheden op:

1. Drogen van pasgevormd materiaal.
2. Drogen van de glazuurlaag voor het bakken.
3. Drogen van de op de glazuurlaag aangebracht decoraties.

Gould, Evans en Flannigan (47) belichten het voordeel van een aanzienlijk verkorte droogtijd in verband met het veel kleiner benodigd aantal mallen of vormen. Heeft men minder mallen nodig, dan behoeft men, terwijl men de levensduur van deze mallen toch volledig uitnut, van een bepaald model keramisch product ook minder stuks te fabriceren en komt men voor een bepaalde automatische vormmachine tot betere productiecijfers voor dat bepaalde model.

Dit productiecijfer lag dus voorheen, bij de langer droogtijd, volgens commerciele overwegingen veel te hoog. Men komt b.v. van 35000 dozijn (wat veel te hoog was) op 5000 dozijn (hetgeen een goed aantal geacht werd voor een model), indien men de droogtijd van 90-150 min. terugbrengt tot 15 mi (Het aantal mallen daalt daarbij van 150-200 dozijn op 25 dozijn). Laboratoriumproeven toonden aan dat infra-rood drogen aan deze eisen kon voldoen en een infra-rode drooginstallatie

werd op basis van de proefresultaten ontwikkeld. Deze had b.v. 12-15 minuten nodig om een gevormd bord hard genoeg te maken om het uit de vorm te kunnen nemen. De vormen werden hierbij niet verzadigd, d.w.z. na 16 uur kwamen de borden even droog uit de vorm als in het begin. De infra-rode droging bleek het meest efficient voor droging tot op het moment dat de voorwerpen uit de mallen konden worden genomen. Voor de afwerking in droging daarna achten de onderzoekers luchtdroging nodig. Voorwerpen, welke bepaalde gebreken vertonen, barsten tijdens het infra-rood drogen, hetgeen de onderzoekers een voordeel achten omdat ze op deze wijze tijdens het fabricatieproces tijdig kunnen worden geelimineerd.

Geen verschil werd ontdekt bij drogen van natte- of betrekkelijk droog gevormde voorwerpen; evenmin bij toepassing van "harde" of "zachte" klei. Wel diende het vormen zelf nauwkeurig te geschieden. Donkere klei droogt sneller en daarom is toevoeging van een kleurstof in bepaalde gevallen van voordeel.

Tesmer (96) breekt een lans voor de toepassing van gasgevoede infra-rode droogovens in de keramische industrie. Hij noemt als voorbeeld een porceleinfabriek, waar men een oven had van de afmetingen: lang 60', hoog 6' 10" en breed 36". Voor heen zorgde een oliebrander in een vuurvaste ruimte voor de vereiste warmte, waarbij in de droogruimte een max. temp. behaald werd van 175°C.

Nadat infra-rode gasbranders waren geinstalleerd met fan en automatische controle kon de snelheid van de transporteur worden opgevoerd van 6'/min. tot 8'/min. en hoger. De brandstofkosten daalden hierbij met 20%. Hij somt de volgende voordelen op:

1. lager brandstofkosten
2. geen speciale eisen betreffende kleurstof e.d.
3. geen invloed als gevolg van afmeting en dikte der voorwerpen
4. geen speciale afstelling stralingsbronnen
5. alle mogelijke voorwerpen met alle mogelijke kleuren kunnen tegelijkertijd behandeld worden
6. temperaturen kunnen worden ingesteld over een bereik van 175° - 400° F.

Het artikel van Tesmer heeft een wel wat propagandistisch karakter, doch dit neemt niet weg, dat het zeer wel is aan te nemen, dat evenals in het "metal-finish" bedrijf, ook hier voor de gasgevoede stralers en ovens een goede toepassingsmogelijkheid aanwezig is en dat de door Tesmer opgesomde voordelen inderdaad alle overweging waard zijn.

Ook Hayman (58) noemt gasstraalovens als toepassingsmogelijkheid voor de keramische industrie. Hayman acht straaldroging speciaal geschikt voor kleine keramische producten. Bij de grotere heeft hij vaak barsten geconstateerd en voor deze acht hij straalverwarming, gecombineerd met convectieverwarming waarschijnlijk het beste. Hij acht de maximale wanddikte mogelijk tot 1" - 1¼". Deze ervaring, betreffende de toepassingsmogelijkheid voor grote voorwerpen, wijkt dus af van de ervaringen van Hepner, uit Amerika gerapporteerd.

Ook Roberts (80) zegt, dat voor kleine artikelen straaldroging ongetwijfeld voordelen biedt; voor grotere acht hij een nader onderzoek nodig.

Malins (72) acht voor grotere en gecompliceerde stukken dull-emitters het beste; hierbij kan door regeling van de spanning een zekere mate van voorzichtigheid betracht worden, terwijl door de, bij lagere temp. optredende grotere golfleng-

te, aanvankelijke penetratie niet te groot is en er dus geen kans is op inwendige stoomvorming, gepaard gaande met barsten.

5.3.4.2. Proefnemingen.

Uit laboratoriumproeven van Gould, Evans en Flanniga (47) kwam vast te staan, dat de diepte van penetratie in de kleilaag maar zeer gering was. Witte klei met een zwart oppervlakkig laagje, werd vrijwel even snel verwarmd als geheel zwarte klei. Indien de oppervlakte laag wit was, was de snelheid van verwarming kleiner, ook al lag onder deze witte oppervlakte laag de zwarte klei. Hoe dikker de laag, des te lager was de behaalde eindtemperatuur (zie Tabel 10 , waarin enkele resultaten werden opgenomen).

De resultaten van de proeven van Stout en zijn medewerkers (5.3.2.) zijn voor kleivormen van groot belang.

TABEL 10.

Na 25 min. bestraling behaalde temperatuur in °C.

laagdikte lamp afstand	1" 1⅛"	1" 3½"	¼" 1½"	¼" 3½"
1 alleen witte deklaag	66	52	72	62
2 door en door wit	59	50	62	58
3 inwendig wit, zwarte deklaag	70	55	150	82
4 door en door zwart	76	62	150	98

5.3.4.3. Samenvatting resultaten infra-rood drogen in de keramische industrie.

1. Snelle verwarming, grote capaciteit met aanzienlijke besparing aan plaats, mallen etc. en soepeler bedrijf.
2. Mogelijkheid van aparte snelle droging ter plaatse van grot stukken, waardoor grote plaatsbesparing en minder breuk. He moge zijn dat de droging in dit geval (open eenheden) op zichzelf geen staaltje van economisch drogen is; het alternatief, luchtdroging waarna transport naar de drooginrichting, is nog veel oneconomischer. Hoewel in deze gevallen lampen als stralingsbronnen zijn gerapporteerd lijkt het waarschijnlijk dat dull-emitters of andere bronnen met lagere temp. en grotere stralingsdichtheid hier beter op hun plaats zijn.
3. Het lijkt waarschijnlijk dat in vele gevallen een splitsing van aanwarm periode en periode van afwerking van het droogproces min of meer apart bewerkstelligd moeten worden, waar bij de stralingsintensiteit in de eerste phase groot- en in de tweede phase kleiner zal moeten zijn, dan wel dat de twe de phase door convectie bewerkstelligd kan worden. Tot een dergelijke conclusie kwamen ook Gould en zijn medewerkers (47).
4. Uit een oogpunt van droogmechanisme zelf is er geen bepaald voorkeur voor gasgevoede of electrische stralers. De mogelijkheid bestaat dat een te snelle droging niet te preferer

is, speciaal niet als de snelheid waarmede het schijnbare verdampingsvlak daalt niet groot genoeg kan zijn als gevolg van de capillaire verhoudingen in de klei.
Exacte proeven dienaangaande werden niet aangetroffen.
Men kan wel aannemen, dat b.v. in het beschreven geval van het drogen van slijpstenen (5.3.4.1.) ook gevoegelijk (of misschien beter) gasgevoede stralers gebruikt hadden kunnen worden, omdat men hier met een betrekkelijk grofkorrelig materiaal te doen had, waarbij grote bestralingsintensiteit toegepast kon worden (gasbranders met hoge temperatuur b.v.). Toepassing van lampbestraling lijkt hier onnodig duur.

5.3.5. Het infra-rood drogen van gietvormen.

Gietvormen moeten, voordat tot gieten wordt overgegaan, worden gedroogd. Deed men dit niet, dan zou er kans bestaan op gietgallen als gevolg van ontstane stoom bij het gieten. Meestal is het niet nodig de vorm geheel door en door te drogen, een diepte tot 1" is meestal voldoende. Bij massa-werk en indien de vormen niet al te grillig zijn (b.v. met diepe voren, die in de "schaduw" zouden blijven) is ook hier infra-rode droging met succes toe te passen. De droogtijden kunnen b.v. varieren van 5 min.-30-45 min., afhankelijk van zandtype, vochtgehalte, vereiste diepte van droging en vorm.

Gen. Electr. Comp. beschrijft een installatie bestaande uit 38 eenheden met totaal 1368 Osram infra-rode lampen. Totale krachtsverbruik 342 KW. De vormen van verschillend type bevinden zich op transportbanden. Ook de gietkernen worden op dezelfde wijze gedroogd. Bij kleine vormen was een penetratie van 1/8 - zelfs van 1/16 inch reeds voldoende om mooie gave gietstukken te verkrijgen (17).

Na kennisname van het onderzoek van Stout en zijn medewerkers betreffende het drogen van zand behoeft er geen twijfel aan te bestaan dat het infra-rood drogen van gietvormen een uitermate goede oplossing kan zijn.

Immers:

1. Men kan in vele gieterijen het karakter van massaproductie hebben waarvoor deze droging zich goed leent.
2. Door de snelle warmtetransmissie en de grote mogelijke tijdsbesparing wint men zeer veel aan ruimte.
3. In de keuze van stralingsbron is men geheel vrij, behalve voor grote stukken. Het hangt er dus naar van af welke stralingsbron in een bepaald geval het goedkoopst zal zijn.
4. Grote vormen zal men evenals in de keramische industrie het beste ter plaatse met lampen kunnen drogen of dull-emitters waarbij een enorme tijdwinst t.o.v. het vroeger noodzakelijke luchtdrogen zal optreden. Het voordeel ligt hier dan niet zozeer in het economisch infra-rood drogen dan wel in het vervallen van het nog veel oneconomischer alternatief: lucht-drogen.

5.3.6. Infra-rood drogen in de Textielindustrie.

5.3.6.1. Practische toepassingen.

De toepassing van warmtetransmissie door middel van infra-rode stralen kan betreffen een zuiver droogproces, waar-

bij water wordt onttrokken of ook een "curing"-proces van textiel geimpregneerd met of bedekt met een hars, een rubbersoort e.d. (natuurlijk of synthetisch).

Juist in deze industrie schijnt de onderhavige methode goed toepasbaar te zijn aangezien de vereiste bewerkingen aan de lopende band gebeuren, waarbij het droogproces op volkomen uniforme wijze verloopt. Hierbij is het nodig, dat in korte tijd vrij aanzienlijke hoeveelheden warmte worden overgebracht, waarvoor dus een vrij grote stralingsintensiteit nodig is (63). Hiervoor zijn gloeiende gasgevoede eenheden bij uitstek geschikt (4.3.3. en 4.3.4.). Van Kampen (63) schrijft in dit opzicht, dat de toepassing van straaldroging een oplossing geweest is bij de moeilijkheden voortvloeiende uit de "drying bottleneck" in de textielindustrie (U.S.A.). Hij zet uiteen dat bij toepassing van gasbranders de kleur van de verwerkte goederen er weinig toe deed. De witte stoffen droogden vrijwel even snel als de gekleurde. Ook Miedendorp (74) rapporteert over het met succes toepassen van gasbranders (in dit geval "Red-ray burners,"4.3.3.) in de textielindustrie, waarbij de verbrandingsproducten eveneens tot het droogproces bijdroegen.

Weiss (100) geeft een beschrijving van het toepassen van "Carbonatic radiant gas generators" (4.3.4.) in 1940 door de "Pilgrim Piece Dye Works". Het resultaat was een verbeterde "finish" en 35% capaciteitstoename. In fig. 32 is schematisch aangegeven hoe de branders waren geplaatst.

Ook lampen worden toegepast in de textielindustrie. Vaak vinden bepaalde eenheden toepassing als extra drogers in bestaande installaties, waar het drogen met verhitte trommels remmend werkte op het gehele bedrijf. Miedendorp noemt gevallen op waarbij de totale capaciteit van de drooginstallaties werd opgevoerd met 20-25% (voor licht materiaal tot 35%). Een ander rapport spreekt van een capaciteitstoename van 40% bij toepassing van een infra-rode drooginstallatie, bestaande uit 120 Westinghouse drooglampen (250 W-110 Volt). Snijder (87) beschrijft de toepassing van infra-rode straaldroging als vergroter van de droogcapaciteit met minimale uitbreiding aan oppervlak. Hij somt vele voordelen op. Krupp (62) beschrijft een aantal toepassingen, ook van infra-rode bestraling als uitbreiding van de bestaande drooginstallatie, speciaal als voordroging, waarbij het materiaal in korte tijd alvast op de juiste temperatuur gebracht wordt alvorens het in de bestaande drooginrichting treedt. Deze is dan wel bij machte het proces in de vereiste tijd af te maken.

Uit verschillende van deze voorbeelden blijkt duidelijk, dat het vaak mogelijk is op eenvoudige wijze extra (infra-rode) drogers aan te brengen in verschillende phasen van het proces, juist omdat deze eenheden weinig plaats innemen. Ook Hannay (54) acht de methode speciaal van belang als voordroging.

Heeft de toepassing van infra-rood drogen dus succes gehad voor uitbreiding van bestaande drooginstallaties, werken volgens andere principes; het is aannemelijk, dat voor nieuw te bouwen installaties in de textielindustrie 100% infrarood drogen soms op zijn plaats is.

Connell (27) geeft een beschrijving van een infrarode lampbestraling van textiel, voorzien van een laag synthetische rubber, waarbij eenheden 150 ft materiaal ter breedte van 42" maximum per uur verwerken, waarbij de ingevoerde energi

regelbaar is tot een maximum van 42 KW. (Het gaat hier weliswaar niet om het verdampen van water, doch terwille van de overzichtelijkheid worden dergelijke voorbeelden in dit hoofdstuk mede genoemd.)

Deribere (35) beschrijft de toepassing van een infrarode drooginstallatie met 100 lampen van 250 W. voor het drogen van geprepareerd textiel. Schematisch is de inrichting geschetst in fig. 33 (zie hieromtrent ook hoofdstuk 5.3.6.2.). Hij noemt ook nog het drogen van vilt ter dikte van 5 - 10 mm. De lampafstand bedroeg 20 - 30 cm. Hierbij was 1 - 1,5 Kwh per kg. te verdampen water nodig.

Ten slotte moge worden opgemerkt, dat niettegenstaande de successen hier en daar behaald er toch nog lang geen sprake is van een algemeen verbreide toepassing van infra-rood drogen in de textielindustrie. In 1946 b.v. werd nog vastgesteld, dat deze droging in Schotland het stadium van laboratoriumonderzoek nauwelijks had verlaten (53).

Preston en Chen (78) achten toepassing van infra-rood drogen in het textielbedrijf niet zo zeer gewenst uit een oogpunt van beter rendement, want dit is volgens hen niet beter dan dat van andere droogmethoden. Ze achten toepassing gewenst op grond van de volgende mogelijke voordelen:

1. snel in bedrijf stellen,
2. kleine apparatuur, waardoor kleine verliezen als gevolg van niet gebruik nu en dan,
3. soepelheid in het bedrijf,
4. gemakkelijk hoge temperatuur te bereiken,
5. betere kwaliteit van het gedroogde product.

Manders (75a) ten slotte geeft een korte opsomming van toepassingen in de textielindustrie. Deze toepassingen betreffen uitsluitend lampbestraling.

5.3.6.2. Proefnemingen.

Deribere (35) geeft de resultaten van bedrijfsproeven met de infra-rode drooginstallatie volgens fig. 33.

De droogprestatie steeg met:

1. toename van de luchttemp. bij de uitgang en met toename van de vochtigheidsgraad,
2. toename van de luchttemp. bij de ingang en met toename van de vochtigheidsgraad,
3. met de verkleining van de lampafstand,
4. met betere absorbtie van het weefsel,
5. met betere reflectiviteit van de wanden en het scherm a.

Men was van mening, dat de ideale oplossing zou zijn deze, dat men met een vacuum kon werken (met condensor). Practisch is een dergelijke oplossing niet wel mogelijk. Men dient te volstaan met een zo goed mogelijke afsluiting, met zo weinig mogelijk luchttoevoer en daarnaast toch een zo goed mogelijke ontluchting.

De droogduur was 3-4 min., de snelheid van het weefsel 10 m/min. Het weefsel bewoog 4-6 maal onder de lampen heen en weer. Men verwijderde 900 gr. water per KWh.

Ook Rabold (81) wijst op het feit, dat het voor het verkrijgen van een goed rendement nodig is gebruik te maken van zo goed mogelijk gesloten ovens met reflecterende wanden. Ook hier zal een gedeelte van de straalwarmte werkelijk worden geabsorbeerd, doch een ander deel zal door convectie nuttig moeten worden gebruikt. Soms maakt men hierbij gebruik van een

ander medium dan lucht teneinde elke mogelijke oxydatie te vermijden. Hij noemt dan rendementen van 80-90% wat overigens wel wat aan de hoge kant lijkt (Bedoeld worden lampstralers).

Laurie (65) vermeldt in een discussie, dat het rendement van 20% (wit) tot 30% (zwart) bevonden werd bij het drogen van textiel. Men had getracht de methode toen als nadroging in te voeren (beneden een vochtgehalte van 10%, in het algemeen dus bij de phase van dalende verdampsnelheid). Toen evenwel was het rendement slechts 5%. Men zou trachten de bruikbaarheid verder te onderzoeken (dit was in 1944).

Howell (53) vermeldt dat het rendement voor een goed deel samenhangt met de geaardheid van het materiaal. Dunne witte zijde b.v. reflecteert veel van de straling, terwijl van het niet gereflecteerde deel nog vrij veel wordt doorgelaten. Hij raadt daarom aan in dergelijke gevallen de straling door meerdere lagen te laten gaan (dus in de geest zoals weergegever in fig. 33). Hij geeft als rendementsgrenzen 15% voor een enkele laag witte zijde tot 40-50% voor zwaar donkergekleurd materiaal.

Manders (75) haalt eindconclusies aan van het Vezelinstituut te Delft (89). Uit de resultaten van de desbetreffende proeven bleek, dat als gevolg van infra-rood drogen breukkracht, rek en tint niet waren achteruitgegaan bij wollen, katoenen, linnen en kunstzijden weefsels.

Wilhelm (101) stelde een onderzoek in naar het droogmechanisme bij toepassing van straaldroging op wollen, vilt en absorberende katoenweefsels. Evenals Stout, Caplan en Baird constateerde hij een grote overeenkomst met convectiedroging door lucht. Ook hier zijn 2 perioden te onderscheiden; de laatste waarbij een dalende verdampsnelheid optreedt, n.l. beneden een bepaald kritisch vochtgehalte. In de laatst bedoelde phase moet het water verwijderd worden uit de vezels door middel van diffusie. De droogsnelheid was bij straaldroging groter dan bij convectiedroging, zowel in de eerste- als in de tweede phase.

Uit bovenstaande zou men kunnen constateren, dat men met toepassing van straaldroging voor de beide phasen verschillende warmtestromen zou moeten toepassen. B.v. gedurende de eerste phase een stralingsbron met voldoend hoge temp. en grote stralingsintensiteit; gedurende de tweede phase een meer voorzichtige droging met een kleinere en goed regelbare stralingsintensiteit. Dus b.v. bij de 1e phase gasbranders, bij de 2e phase lampen of gaspanelen met gematigde temp. (650°F) zoals wel worden toegepast voor het "cure"-proces van "fabrics" (12, 10) zie ook 5.3.6.1. opmerkingen Krupp en Hannay (62, 54).

Grapnel (48) verrichtte enige onderzoekingen met betrekking tot het gebruik van gasgevoede gloeistralers voor het drogen van textiel.

De opzet was:

1. De waarde na te gaan van de theoretische vergelijking van droging.
2. De invloed na te gaan van de zwaarte van de stof (als functie van weefdichtheid en dikte) op de mate van droging.
3. De invloed na te gaan van de afstand van de stralingsbron.
4. De invloed na te gaan van de kleur.
5. De invloed na te gaan van de grondstof.

De stralingsbron was een 24 " "Carbomatic Radiant Heat Generator" (4.3.4., 100), welke zodanig was afgesteld,

FIG. 33.

FIG. 34.

T.A. 235

dat het gloeimateriaal wel goed gloeide, doch dat er van zichtbare gasvlammen geen sprake was (temp. 1500°F-1600°F). De gastoevoer werd zo constant mogelijk gehouden. Hierover werden proefstukken bewogen, gespannen op een raam (36" x 12").

Een proefstuk werd gewogen, waarbij het verondersteld kon worden in evenwicht te verkeren met de vocht-omstandigheden in de werkruimte.

Vervolgens werd het proefstuk nat gemaakt, uitgewrongen zodat er geen water meer uitdroop en weer gewogen. Na opgespannen te zijn werd het over de brander bewogen met een gelijkmatige snelheid, waarbij de droogtijd werd opgenomen met een chronometer, waarna het nogmaals werd gewogen. Voorop gesteld dient te worden, dat de inrichting dus zodanig was, dat alleen qualitatieve waarde aan de verkregen resultaten mocht worden gehecht en de resultaten dus zeer zeker niet als direct toepasbaar op industriele omstandigheden mochten worden beschouwd.

De theoretische vergelijking van droging luidt:

$$\ln \frac{Gn - Go}{Gd - GO} = C\ D.$$

m.a.w. de droogduur (tijdens de periode van dalende verdamping) is evenredig met de natuurlijke logarithme van het quotient van oorspronkelijk en later aanwezig vrij vocht. Uit de resultaten der proeven bleek bovenstaande inderdaad met de waarnemingen te kloppen. Bij jute alleen was ook na droging het vochtgehalte nog zo hoog, dat bij de proeven het kritische punt van overgang op dalende verdampsnelheid nog niet was bereikt. Ten aanzien van de kleur kon geen bepaalde invloed worden ontdekt. Ten aanzien van de zwaarte kan worden opgemerkt, dat deze minder invloed had dan het Karakter van het weefsel. Ten aanzien van de afstand van de stralingsbron kan worden opgemerkt dat verkleining hiervan met 1/3 tot resultaat had een 45% grotere verdampprestatie. Ten aanzien van het rendement werd gevonden:

$$\frac{\text{energie nodig voor verdamping}}{\text{energie aanwezig in gebruikt gas}} = 0{,}1.$$

m.a.w. slechts 10% rendement.

In zijn slotconclusie zet de auteur uiteen dat volgens zijn opinie de verdamping bij toepassing van deze stralers goeddeels tot stand komt door warmtetransmissie volgens de weg van convectie. Nader onderzoek zal evenwel nodig zijn. Toch acht hij deze brander een nuttige toepassing voor het drogen van textiel, d.w.z. drogen tot op een bepaalde vochtigheidsgraad, waarbij nadroging door een meer getemperde warmtebron zal moeten plaats vinden.

Hij doet voor eventuele verdere research de volgende suggesties:

1. Gasgevoede en electrische stralingsbronnen gebruiken (om de beurt) met dezelfde ingevoerde energie (met continue passeren van de stof).
2. Te trachten convectiewarmte en straalwarmte te scheiden b.v. door een dun glazen scherm (1/8") waarvan mag worden aangenomen, dat er slechts 4% van de straalwarmte wordt geabsorbeerd, ten einde de juiste verhouding van de convectiewarmte te onderzoeken t.o.v. de straalwarmte.
3. Opname van de temp. v/h bestraald opp.

Men heeft de indruk, dat de techniek van de proeven van Grapnel min of meer primitief is.

Voorlopige, nog niet gepubliceerde resultaten van een onderzoek van Wilhelm en Paul (Textile Research Inst. U.S.A.).(202).

Het onderzoek vond plaats van een geweven wollen vilt en absorberende katoen (als twee uiterste typen van weefsels) hetwelk dubbelzijdig door lampen bestraald en gedroogd werd. De monsters werden onderzocht van verzadigd tot droog (evenwichtstoestand). Variabele omstandigehden waren:
stralingsintensiteit (hartafstand lampen).
luchtsnelheid.
luchttemperatuur.
luchtvochtigheid.

Conclusies.

1. De luchtstroom (kamertemp.) verlaagde de temperatuur van het bestraalde monster onder alle omstandigheden van vochtgehalten.
2. De verdampsnelheid evenwel werd door de luchtstroom slechts weinig verlaagd. (Dit is een merkwaardige conclusie, afwijkend van die, welke Stout en zijn medewerkers trokken. De omstandigheden waren hier anders; een betrekkelijk dunne laag weefsel, vermoedelijk beter doordringbaar voor de infra rode stralen, met daarbij dubbelzijdige bestraling).
3. De temp. verlagende invloed van de lucht was oppervlakkig; de straling drong door en door. Als gevolg hiervan was de temp. binnen in het monster hoger dan aan de oppervlakte. Bi een dikte van het vilt van 0,95 cm was dit temp. verschil 8°C in natte toestand en 30°C in droge toestand. (Zie fig. 34, waarop het verloop van de oppervlaktetemp. en de inwendige temp. gedurende het droogproces is te zien. Men ziet het droogproces afgebeeld in de met de tijd dalende lijn voo het vochtgehalte.) Bij luchtdroging alleen was de temperatuur aan de oppervlakte en binnenin vrijwel gelijk.
4. In dit rapport onderscheiden de onderzoekers 4 phasen t.w.:
   a. het verdampen van de overmaat vrij water (constante verdampsnelheid),
   b. het verdampen van het vrije water uit het monster zelf (licht dalende verdampsnelheid; lineair),
   c. het verdampen van het water uit de vezels zelf (snel dalende verdampsnelheid, stijgende temperatuur),
   d. geheel droog met constante temperatuur.
5. Grotere bestralingsintensiteit resulteert in een hogere temp van het monster, een grotere verdampsnelheid en een iets hoger nuttig effect (warmte benut voor verdamping/warmte doo stof geabsorbeerd).
6. Verhoging van de luchttemp. resulteert in een lichte temp. stijging van het weefsel, lichte stijging van verdampsnelheid en iets hoger nuttig effect.
7. De vochtigheidsgraad van de lucht had practisch geen uitwerking.
8. Het mechanisme van straaldroging en convectiedroging was pre cies eender, althans betreffende de verschillende phasen en de daarbij behorende kritische temperaturen.
9. De verdampsnelheid evenwel is bij straaldroging aanzienlijk groter.

Wilhelm en Paul stelden een vergelijking op voor de warmtebalans bij droging door straling, welke neerkomt op:

$$Qs\ Z = h(t_a - t_1) + Kr\ (p_a - p_1)$$

(geabsorbeerde energie) is (convectie verlies) plus (benodigd voor verdamping).

De verdampsnelheid Vs is $K(p_a - p_1)$ (zie nomenclatuur).

Uit de resultaten der proefnemingen worden K en Vs berekend, zodat berekeningen eigenlijk achteraf werden uitgevoerd. Voor eventuele berekeningen van te voren (t.b. van het ontwerpen van een installatie) heeft e.e.a. dan ook weinig waarde. De waarde ligt in het verdiepen van het inzicht en de mogelijkheid het verloop op te stellen van Vs in verband met b.v. het vochtgehalte van het monster op een bepaald tijdstip (fig. 35). In deze figuur ziet men grafisch voorgesteld de verdampsnelheid bij convectiedroging en stralende droging bij een zelfde oppervlakte temp. t_a en luchtsnelheid.

Preston en Chen verrichtten eveneens experimenteel onderzoek aangaande de temperatuur van textielmonsters bij dubbelzijdige infra-rode bestraling en aangaande de verdampsnelheid (78). Geen onderscheid werd gemaakt tussen oppervlaktetemperatuur en inwendige temperatuur. De gepubliceerde curve aangevende het verband van deze grootheden met de tijd komt kwalitatief geheel overeen met die van Wilhelm en Paul (fig. 4). Preston en Chen maken slechts onderscheid tussen 2 perioden, n.l. die van constante en die van dalende verdampsnelheid, met als grens een critisch vochtgehalte. Voor verschillende textielsoorten geven zij deze critische waarden op. Belangrijk is hun conclusie dat er geen risico is verbonden om hoge temperaturen en grote verdampsnelheden toe te passen, mits dit slecht plaats vindt voor het critische vochtgehalte is verkregen. Daarna moet men de energiestroom reduceren, anders treedt zeer spoedig oververhitting en beschadiging op. Bij voorbeeld bleef de temperatuur van flanel bij droging door gasgevoede panelen (circa 600°K) op 67° C tijdens de periode van constante verdampsnelheid. Zodra de critische waarde van het vochtgehalte was gepasseerd begon de temp. snel te stijgen tot een constante waarde van 220°C, waarbij het witte flanel zich geel kleurde.

Uit de onderzoekingen van Preston en Chen bleek verder dat textiel een aanzienlijk grotere absorbtie vertoont in natte- dan in droge toestand. Zou dit niet het geval zijn, dan zou de temp. in droge toestand nog meer oplopen dan nu reeds het geval is.

Een ander feit is dit, dat bij lagere temp. van de stralingsbron de absorbtie groter is dan bij hoge temp. van de straler, (zowel voor droge- als natte textiel, relatief voor droge textiel nog in sterkere mate) m.a.w. bestraling door gematigde stralers is gunstiger betreffende rendement.

5.3.7. Infra-rood drogen van papier en inkt.

Manders (75) vermeldt, dat in Belgie droogstralers met succes werden toegepast voor het nadrogen van papier. Vroeger had deze nadroging plaats met behulp van weerstanden van een vermogen tot 18,5 KW. Het vermogen van droogstralers voor het zelfde werk was 4,2 KW. Ook in de papierindustrie ligt het, evenals in de textielindustrie voor de hand, dat infra-rode droging zeer goed toepassing zal kunnen vinden, juist door de aard van het bedrijf. Ook beschrijft hij een mo-

FIG. 35.

FIG. 36.

T.A. 235

stof. De convectie verliezen moeten gering zijn en uit een economisch oogpunt zal een infra-rode droger natuurlijk moeten kunnen concurreren met de tot nu toe gebruikelijke droogmethoden.

5.3.8.3. Genomen proeven.

Door Gasser en Stampa werden vergelijkende proeven genomen, aangehaald door Zimmermann (103), betreffende het drogen van graan volgens de convectiemethode en volgens de infrarode stralingsmethode. De omstandigehden waren bij deze laatste methode:

stralingsbron : open gloeiende weerstandsdraadspiralen.
laagdikte : 15 min. maximaal.
snelheid : 1,5 m/min.

In Tabel 11 ziet men de verkregen resultaten. Men ziet dat bij een vrij goed overeenkomend oorspronkelijk vochtgehalte en vochtverlies de tijdsduur bij infra-rood drogen sterk in het voordeel is, waarenboven de kiembaarheid niet is achteruitgegaan.

TABEL 11.

	benodigde droogduur	oorspr. vochtgehalte	vochtverlies	kiemkracht
gewone droogwijze	72 min.	21,6%	4,1%	- 7,5%
infra-rode droogwijze	16 "	19,8%	3,4%	+13,0%

De onderzoekers schreven dit toe aan het feit dat de warmte door en door gedrongen was, terwijl aan de oppervlakte in tegenstelling met de gewone droogwijze, de temp. juist lager was (dit laatste was de oorzaak van de behouden kiembaarheid).

In Amerika deden Nicholas en Musser dergelijke proeven, eveneens aangehaald door Zimmermann (103). Het ging hierbij om zaden welke bij opslag boven 20°C en bij een vochtgehalte boven de 10% in kiemkracht achteruit gingen en waarvoor dus een geschikte droogmethode moest worden ontwikkeld om het vochtgehalte tot beneden de 10% te drukken.

De resultaten vindt men in Tabel 12. Ook hier is het infra-rode proces in alle opzichten in het voordeel, althans wat de droogresultaten op zichzelf betreft. Zijn deze proeven dus interessant gebleken, in nog hogere mate geldt dit voor de proefnemingen van Zimmermann zelf (103) omdat hier exacte parallelproeven werden genomen met:

dezelfde hoeveelheden stof (gras)
dezelfde droogtijden
dezelfde ingevoerde hoeveelheid energie
dezelfde hoeveelheid lucht

In het geval van hete luchtdroging werd de lucht verwarmd door spiralen van chroom-nikkeldraad waarbij 2,2 KW per uur werd gebruikt, een energie hoeveelheid die door weerstanden op dit bedrag kon worden afgesteld en gelijk was aan het gebruik van de Philips-infra-rode lampen, welke bij het infrarood drogen werden gebruikt. Op deze wijze was de energie per cm^2 stof 0,6 Watt per uur.

TABEL 12.

	gewone hete lucht roterende droogtrommel	infra-rode droogwijze
droogduur in min.	9,0	4,5
vochtverlies in % (van 12½%-9½%)	3	3
Temp.v.h.zaad aan het einde van het droogproces °C.	95	77
Kiembaarheidsgraad (verandering hierin in %)	- 3,0	+ 3,5

Het enige dat men niet geheel in de hand had, was de temp. en de vochtigheid der buitenlucht, welke werd aangezogen. Intussen kan men de zuiver op toeval berustende invloed hiervan bij de in totaal 16 parallelproeven, wel verwaarlozen. De resultaten vindt men in Tabel 13.

TABEL 13

		Convectie droging		Infra-rood drogen
verwijderd vocht (bij convectiedroging gesteld op 100)		100		113½
temp.in het droogsysteem		42,8°C		40 °C
Verteerbaar eiwit na drogen in % van totaal eiwit		64,1%		64,9%
energie toevoer		1892 Cal		1892 Cal
Calorien in de circulerende lucht (zonder waterdamp)	1238Cal		1159 Cal	
Warmteverliezen uit het systeem	344 "		300 "	
	1582 "	1582 "	1459 "	1459 "
Warmte voor het verdampen van het water in totaal beschikbaar		310 "		433 "

Dat de resultaten hier niet zo sprekend zijn vindt zijn oorzaak vermoedelijk in het feit, dat Zimmermann bij zijn proefseries steeds evenveel lucht liet circuleren.

In de hoofdstukken 5.2.1.1. en 5.3.2. werd de invloed van luchttemp. en luchtsnelheid besproken. In dit licht bezien heeft Zimmermann de luchtsnelheid vermoedelijk voor de infrarode proevenserie te hoog gehouden en zouden er betere resultaten te voorschijn gekomen zijn voor deze methode bij b.v. een

hoogstens half zo grote luchthoeveelheid.

Verder is de stralingsbron in dit geval de electrische lamp. Het zou interessant zijn de resultaten te weten als men b.v. de gloeiende weerstandsdraden in het ene geval als stralingsbron en in het andere geval als luchtverhitters had gebruikt (ook met dezelfde energietoevoeging). Ten slotte moge nog worden opgemerkt, dat het gras bij de proeven van Zimmermann tijdens de droogperiode meerdere malen gekeerd werd. Dit scheen absoluut nodig te zijn; gebeurde dit niet, dan kreeg men bij de bestralingsmethode ongewenste oppervlakkige verkleuringen.

Manders (75 en 75a) rapporteert over hier te lande genomen proeven betreffende het drogen van gras, waaruit de conclusie getrokken werd dat het rendement (totaal aan het water in het gras afgegeven verdampingsenergie gedeeld door de totaal gebruikte energie door de lampdroogstraler) gelijk was aan dat van een goede cokesinstallatie. Dit impliceert dat bij gelijke energie de stroomkosten dus belangrijk hoger zijn. De kwaliteit was goed. Manders komt in zijn artikel, daterend van 1943 niet verder dan bespiegelingen t.a.v. de toepassingsmogelijkheden voor groenten en vruchten.

Selling (90) komt tot de conclusie dat vlas met succes door warmtestralen gedroogd kan worden. Het energieverbruik was 1 KWh voor 1 Kg water. Als groot voordeel werd aangemerkt het feit, dat de omstandigheden, waaronder de droging op het veld plaats vindt, goed benaderd worden, terwijl ook het feit dat men deze droging op ieder moment van de dag kan gebruiken en dat daarbij geen enkele voorbereiding nodig is(het droogproces begint onmiddellijk) van groot belang is in de praktijk.

Ook Meeuse (71) bericht, dat infra-rood drogen voor vlas vele voordelen biedt; de stroomverbruikkosten zijn evenwel hoog volgens hem.

Bij de keuze van de stralingsbron speelt ook een rol de reflectiviteit van bladgroen welke soms zeer groot is.(40). Groene bladeren van loofbomen kunnen in de 10000-24000 Å band tot 45% van de stralen reflecteren.

Deribere geeft bij een bespreking van de droogmogelijkheden van zaden, meel, sojabonen producten enz. enkele cijfers betreffende het infra-rood drogen van een bepaalde meelsoort (40) zie Tabel 14. Het product had een vochtgehalte voor het drogen van 9% en na het drogen van 2%. Hierbij kan nog worden vermeld, dat aanvankelijk 54% van de infra-rode stralen werden gereflecteerd, welk percentage bij het droger worden van het product opliep tot 57%.

TABEL 14.

dikte	gewicht in Kg/m²	Droogtijd minuten	krachtverbruik in KWh/kg.
5 min.	3.3	12	0.38
10 "	6.6.	17	0.265
20 "	13.2	63	0.475
30 "	19.8	103	0.54
40 "	26.4	145	0.56

De transmissie was 4.5% onder de 0.25 min.
1.2% onder de 1 min.
0.2" " " 2 "

Hierbij was de hartafstand van de lampen (250W) 20 cm evenals de lampafstand zelf. De beste resultaten werden dus verkregen bij een laagdikte van 1 cm. In fig. 36 is het verband tussen laagdikte en krachtsverbruik aangegeven.

Uit e.e.a. is duidelijk de noodzaak te onderkennen van het verrichten van proeven alvorens men tot een bepaalde technische uitvoering besluit.

In dit verband is het interessant kennis te nemen van de resultaten van proefdrogingen met infra-rode stralen vermeld door Déribéré (40a), verzameld in Tabel 15.

TABEL 15.

Product	laagdikte in mm.	duur van de droging in h.	Energie in KWh per Kg. vers product.
kool	10	1	0.90
doperwten	10	2,1	0.97
prinsesse bonen	10	2,3	0.75
aardappelen	5	4	1.20
wortelen	5	3	1.08
appelen	10	4	1.40
peren	10	4	1.35

Dit zijn uiteraard gemiddelde waarden, welke kunnen varieren met graad van rijping, soort etc. De verkorting van de droogduur, anders gezegd verkorting van de verhittingsduur en tevens het zo laag mogelijk houden van deze temperatuur is mede van het grootste belang voor het behoud van vitaminen. Deribere (40) haalt een onderzoek aan van Fournier en Digaud, waarbij bleek, dat in een bepaald geval 23% van de vitamine B, verloren ging en 0% van de vitamine B_2. Vitamine C wordt ongetwijfeld ten dele vernietigd, waarbij vooral de verhittingsduur maatgevend is. Het afbraakproces van vitamine C is een oxydatieproces; vandaar dat droging onder vacuum wordt toegepast. Het zou mogelijk in dit verband de moeite waard kunnen worden geacht proefnemingen te doen met het infra-rood drogen gepaard gaande met circulatie van een inactief gas (b.v.stikstof). Voor verdere cijfers en resultaten verkregen bij proefnemingen op het onderhavige en ook op ander gebied, kan verwezen worden naar het werk van Deribere (40).

5.3.9. Diverse toepassingen.

Proefnemingen betreffende het infra-rood drogen van caséine indiceerden de mogelijke bruikbaarheid (39). Deribere noemt alle mogelijke toepassingen (40), waarbij in het oog gehouden moet worden, dat deze ten dele nog in een proefstadium verkeren. Vast staat evenwel dat infra-rood drogen zich b.v. bijzonder goed leent voor het na drogen van biscuits, het drogen van pas geplakte envelopen en andere verpakkingen (zodat de inhoud als gevolg van de verpakking niet vochtig wordt). Dit kunnen zijn toepassingen van lampdroging, a la minute in en uit te schakelen, waarbij geen grote apparaten of vermogens in het spel zijn. Juist in deze gevallen is de bruikbaarheid van infra-rode straaldroging zeer evident. (Geen speciale maatregelen nodig voor het in werking stellen, kleine plaatsruimte, geen energieverbruik tijdens tijdelijk niet in gebruik, gemakkelijk afstelbare temperatuur van de te drogen stof. Moge-

lijkheid het gehele systeem vol-automatisch te maken.) Principieel kunnen natuurlijk ook gasgevoede eenheden en ovens voor deze doeleinden dienst doen. Deze zullen speciaal in aanmerking komen indien het gaat om een ononderbroken bedrijf en in de gevallen dat gas ter plaatse goedkoper is dan electrische energie.

5.3.10. Berekeningen t.a.v. het drogen met behulp van infra-rode stralen.

Bij de berekeningen t.a.v. het bakken van lakken (5.2.1.3.3.) ging het meer om het verwarmingsproces. Sommige onderzoekers (4) verwaarlozen eenvoudig de kwestie van het verdampen, een werkwijze waarop wel kritiek werd uitgeoefend. Overigens kan bij het onderhavige probleem, (berekeningen t.a.v. het drogen, waarbij dus wel een min of meer aanzienlijke hoeveelheid vloeistof verdampt moet worden) ook als stelregel aannemen, dat experimenteel onderzoek zowel met een proefinstallatie als met de bedrijfsinstallatie belangrijker is dan de theoretische berekening. Zoals de stand van zaken nu is, is er op dit gebied ook veel minder vergelijkingsmateriaal voorhanden dan bij het probleem bakken van lakken, dus minder gegevens uit de praktijk om bij een berekening van een installatie van uit te gaan. Wilhelm en Paul stelden een vergelijking op voor de warmtebalans bij het drogen van textiel, doch ten slotte moest de waarde van de daarin gebruikte factoren toch volgen uit de resultaten van een experimenteel onderzoek.

Het rendement van een installatie hangt af van de volgende omstandigheden:

1. rendement totaal van de stralingsbron
2. aard van de te bestralen stof (absorbtie coeff. Z)
3. convectie verliezen door de bestraalde stof.
   Deze kunnen tijdens de aanwarmperiode negatief zijn d.w.z. de stof kan convectiewarmte opnemen, doch daarna, nadat het droogproces in werking is getreden zal er een positief verlies optreden, afhankelijk van de luchtsnelheid of trek en luchttemperatuur. Bij open eenheden zullen deze verliezen groot zijn, bij gesloten ovens zal men deze verliezen in zoverre kunnen beperken, dat de warmte a.h.w. in de oven besloten blijft en alleen verloren gaat in de vorm van afgassen en uitstraling van de oven.

Bij electrische installaties is het rendement van de stralings bron groter dan bij gasstralers. Voor electriciteit is het rendement voor omzetting in stralende energie circa 75%, voor gas circa 55% (78).

Volgens een uitspraak van Manders, aangehaald door Drs Selling (90) gaat van een 250W. drooglamp circa 80W verloren gaat door de gasvulling en het onvolkomen reflectievermogen van de reflecterende laag van de straler. Door luchtcirculatie, waarbij de verse lucht de fittings e.d. afkoelt en waarbij de anders verloren gegane warmte dus weer ten dele nuttig wordt gebruikt, kan het rendement van 64% worden opgevoerd tot 81%. Hoewel de rendementen bij electrische stralers dus hoger zijn dan bij gasstralers moet men evenwel niet vergeten, dat de energie invoer bij electrische installaties plaats vindt in een vorm welke ten koste van verliezen in het krachtstation verkregen werd, waarbij ook hier het totale rendement kleiner is. Bij

gasinstallaties mogo het rendement van de stralingsbron kleiner zijn, toch zijn ze goedkoper te noemen.

Wat betreft het totaal rendement, bleek bij het onderzoek van Grapnel (48), dat dit bij een open gasbrander slechts 10% was.

Bij de proefneming van Zimmermann in een oven kwam hij bij het drogen van gras tot een totaal rendement van 23% (lampdroging). Hierbij was de trek zeer groot, vermoedelijk groter dan in de practijk nodig zou zijn geweest.

Rendement volgens Preston en Chen (78) voor een infrarode straaldroging in het textielbedrijf (gasgevoed; temp. 1100 - 1600°K) 27 - 38%.

Volgens Howell (53), afhankelijk van het materiaal 15 - 50% (eveneens textielbedrijf; lampbestraling).

Men kan het totaal rendement voor gesloten systemen aannemen op 40 - 80% voor open eenheden 10 - 60% de waarden te kiezen al naar gelang de omstandigheden.

Déribéré meldt dat voor het drogen van wol gedurende een bepaalde phase van het verwerkingsproces waarbij het watergehalte moest dalen van 75 - 16% bij infra-rode droging (met lampen) nodig was 1,65 KWh per Kg water. Bij verwerking van katoenvezels (15% -10% watergehalte) was nodig 1 KWh/KG water. (35) Drs Selling vermeldt voor het drogen van vlas 1 KWh per Kg water (90). De hieruit te berekenen totale rendementen komen, indien men voor het aanwarmen en verdampen per Kg water rond 640 Kg cal rekent, neer op $\frac{640}{862}$ .100 is 74% tot $\frac{640}{1.65.862}$.

100 is 45% (1 KWh is 861 K cal).

In fig. 37 is weergegeven een grafische bepalingswijze voor het vaststellen van de vereiste energie voor het verdampen van een bepaalde hoeveelheid water per uur, waarbij in aanmerking is genomen het nuttig effect van de stralingsbron en dat b.v. voortvloeiende uit de gecombineerde werking van absorbtie eigenschappen en convectieverliezen. Dergelijke grafische voorstellingen zijn uitgewerkt door Haynes (59, 37, 76 e.a.) Zij zijn gemaakt in verschillende varianten b.v.

Bepaling energie, met inachtname totaal rendement, temp. stijging materiaal, soortelijke warmte materiaal. (Hierbij dus alleen het op temp. brengen in rekening gebracht zonder verdamping.)

Het is duidelijk, dat hoe interessant dergelijke uitwerkingen ook mogen zijn, men er voor elk voorkomend probleem toch niet altijd iets aan heeft. In een in de practijk voorkomend geval zal men zich moeten orienteren als volgt:

1. Vaststellen hoeveel water per uur moet worden verdampt en vaststellen welk soort stralingsbron in aanmerking komt.
2. Via een op de toe te passen wijze van droging aan te nemen totaal globaal rendement de energie bepalen.
   (omstandigheden:) open-gesloten
   luchtsnelheid-verliezen
   aard van de stof, specifieke eigenschappen oppervlak
   aard stralingsbron gas-electriciteit etc.
3. Experimenteel vaststellen laagdikte, en bij een passende bestralingstijd behorende bestralingsintensiteit en luchtsnelheid en luchttemp.
4. Aan de hand van de sub 1, 2 en 3 verkregen waarden de snelheid van de transportband en de totale energie toevoer be-

Grafische bepaling van de benodigde energie voor het verdampen van water (uitgangstemp. water 70°F) rekening houdende met nuttig effect stralingsbron (lampen) en percentage energie geabsorbeerd door te drogen stof.

NAAR H.HAYNES. (ILLUM. ENG. SOC.)
SPRINGFIELD N.J. U.S.A.

FIG.37.

T.A. 235

palen, alsmede capaciteit luchtverplaatsing.

5. De energieverdeling vaststellen, waarbij de te drogen stof in de eerste phase wordt aangewarmd en in de 2e phase wordt gedroogd. Een luchtcirculatie ontwerpen, waarbij de lucht achtereenvolgens:
   1. de lampen koelt aan de achterzijde ; droogmateriaal koelt
   2. werk doet in de droog phase en
   3. ten slotte helpt bij het voorwarmen.

Indien het gaat om artikelen, welke gedroogd moeten worden is er uiteraard geen sprake van laagdikte, doch in principe blijft de gang van zaken eender. Het gaat dan om het aantal artikelen op 1 m transportband lengte. Op die basis dient het experimenteel onderzoek dan te geschieden. Bij toepassingen betreffende textiel en papier staat de "laagdikte" bij voorbaat vast.

- - - - -
- -

LITERATUURLIJST.

1. Aluminium Comp. Ltd. B.P. 449.162 1936.
2. idem B.P. 513.530 1939.
3. Aluminium Comp. of America. U.S.P. 2.108.603 1938.
4. L.W.Andrew en E.A.C.Chamberlain. Journal of the Inst. of Fuel 1943 XVII No.92. bijlage (War time Bulletin).
5. Anon. Fette und Seife. 1942 Heft 5 p. 360 - 364.
6. " De la Rue Gas Development Ltd London. (prospectus)
7. " Infra Red Ray. Manuf. Comp. (U.S.A.) (prospectus)
8. " Vraag en Aanbod 1946 49 (7 Nov.) p. 3.
9. " Natuur en Techniek 1947 No. 1.
10. " British Plastics 1946 -18 p. 144-8.
11. " Mech. World 1947 - 121 p. 85 - 89.
12. " Gas Light and Coke Comp. Textile Weekly 1946 - 38 - p. 414 - 416.
13. " Textile Manuf. 1946 Aug. p. 407.
14. " Paint Techn. 1947 XII No. 138 p. 226.
15. " G.E.C.Journ. 1947 XIV No. 3 p. 162.
16. " Ceram. Ind. 1945 Vo. 44 No. 3 p. 48 - 50.
17. " G.E.C. Infra-red lamping equipment reprinted Dec. 1945 (prospectus).
18. " Infra-red parade (The Fostoria pressed steel Comp.) (prospectus).
19. " Birdseye Infrared lamps. (Wabash appliance Corp.U.S..
20. " Metropolitan Vickers Electr.Corp. Engineering 1944 Jan. 21 p. 46.
21. " Textile World 1944 - 94 - No. 3 p. 83.
22. J.M.Baer U.S.P. 2.339.757. 1942.
23. F.S.Bates U.S.P. 2.283.926. 1939.
24. H.D. Babcock C.A. 1945 p.4801.
25. Bechthold Het Kompas V 1947 15-22 Febr. p. 161.
26. L.J.C. Connell G.E.C. Journal 1944 XIII No. 1. p. 10 - 26.
27. " " Trans. Inst. Rubber Ind. 1946 XXI No. 5 p. 285 - 297.
28. H.R. Clauser Materials and Methods 1946 Vol 2 No. 4 p. 910 - 914.
29. J.B. Carne Gas Journal 1945 Sept. 26 No.429 p. 435 - 443.
30. J.L. Mc. Cloud Ind. and Eng. Chem. 1941 - 33 p. 225.
31. " " Automobile Eng. 1938 - April p.1
32. T.P. Cusack Am. Paint Journ. 1942 No. 44 p. 50 e.v. No. 46 p. 58 e.v.
33. Committee on Colorimetry J. opt. Soc. Amer. 1944 - 34 - p. 183 - 218.
34. M. Deribere Electricite 1947 Febr.-124-p.33-34.
35. " Teintex 1947 15 Jan.p. 13-15.

36.	M. Déribéré	Revue Gen. de l'Electricite 1941 XLIX p. 371.
37.	"	Revue Gen. de l'Electricite 1941 L p. 25.
38.	"	Chimie et Ind. 1941 - 45 - No. 6 p. 541 - 550.
39.	"	Le Lait 1943-23-p. 229 - 230. Journ. of Dairy Science 1946 Vol. XXIV No. 8 (Aug.)
40	"	Les Applications pratiques des rayon infra rouges II edition Dunod Paris 1947.
40a	"	Preprint Second Congress on Electro-heat and Electrochemistry.
41.	R.C. Ernst en E.F. Schuhmacher	Ind.and Eng.Chem.1944-36 p. 1132.
42.	Ch. C. Eeles	Gas Journal 1945 Sept.5-p.339-341. 1945 Sept.12 p. 375.
42 a.	J.A.Fulton	Rayon Textile Monthly 1942 Juni p. 62 (344).
43.	Ford Motor Comp.	U.S.P. 1.998.615. 1935. U.S.P. 2.057.776. 1936. B.P. 450.617. 1936.
44.	" " "	U.S.P. 2.186.067. 1940. B.P. 533.694. 1941.
45.	P.H. Goodell	Electr. Eng. 1941 - 60 - p. 3.
46.	R.N. Green	Bull. of the Am. Cer. Soc. 1945 - Vol. 24 - 1 - p. 8 - 9.
47.	R.E.Gould, B.B.Evans en A.M. Flannigan	Bull. of the Am. Cer. Soc. 1945 - Vol. 24 - 2 - p. 62 - 65.
48.	S.L. Grapnel	Textile Research 1943 Vol XIII - 10 - p. 18 - 28.
49.	E.Y. Goldshtein en B.A. Golynkin	C.A. 1943 p. 2596.
50.	Gen. Electr. Comp.	B.P. 557252 1943
51.	" " "	B.P. 496508
52.	L. Hartshorn	Nature - 1946 - 157 - p. 607 - 610.
53.	J.W. Howell	The Textile Manuf. 1944 Aug. p. 362.
54.	R.J. Hannay	Journ. of the Soc. Dyers and Col. 1946 - Vol. 62 - No.6. p. 173.
55.	H. Haynes	Report presented to the 34 th Ann. Conv. of the Illuminating Eng. (Spring Lake N. Jersey Sept. 1940)
56.	H.R. Hughes Jr.	Southern Power & Ind. 1945 - Maart p. 92 - 93, p. 114.
57.	L.H. Hepner	Bull. of the Am. Cer. Soc. 1945 Vol 24 - 11 - p. 415.
58.	R.F. Hayman	London South. Distr. Jun. Gas Assoc. 15/11 1946. Referaat Trans. Brit. Cer. Soc. 1947 XLVI - No. 1 - p. 7 A.
59.	L.S. Ickis Jr. en H. Haynes	Gen. El. Rev. 1939 - Vol 42 - 4 - p. 145 - 149.

60.	L.R.Koller	Gen. El. Rev. 1941 Vol. 44 - 3 - p. 167 - 173.
61.	P.H. Krupp.	C.A. 1942 p. 3688.
62.	"	Textile Recorder 1945 Nov. p.45-48.
63.	G.R. van Kampen	Rayon Textile Monthly 1943 Aug. p. 431 - 432.
64.	E. Kienle en N.J. Wolfe	U.S.P. 2.220. 928 1940.
65.	K.S. Laurie	The Textile Manuf. 1944 Aug. p.362.
66.	J.C. Lowson	Ind. and Mass. Prod. 1946 249th issue p. 299 - 304.
67.	V.A. Lelyanov	C.A. 1942 p. 2739.
68.	H.W. von Loesecke	Drying and dehydration of foods Reinhold publ . Comp. 1945 2Nd editior
69.	A.C.F. Mackadam en A.A.J. Janser	Reprint Heating and Vent. Eng. 28 Maart 1945.
70.	A.C.F. Mackadam	Journ, of the Jun. Inst. of Eng. 1944 Juli.
71.	Dr. A.D.J. Meeuse	De Vlasbode 30 Oct. 1946, 15 Nov.'46.
72.	E.C. Malins	Electrical Review 1944-135-p 370-372.
73.	R.Maxted	Paint Manuf. 1942 Vol XII-1-p.5-6.
74.	H. Miedendorp	Rayon Textile Monthly 1945 Mei. p. 239 - 240.
75.	Th. J.J.A. Manders	Polytechn. Weekblad 1943 p.153-158.
75a	idem	Preprint Second Congress on Electro-heat and Electrochemistry (1947).
75b	Philips techn. T.	Jrg 9 No. 8 p.249-256 (Aug. 1947).
76.	J.H. Nelson en H. Silman	The application of radiant heat to metal finishing. Chapman & Hall London 1945.
77.	F. Olsen	U.S.P. 2.349.300 1942.
78.	J.M. Preston en J.C. Chen	Journal of the Soc. of Dyers and Col 1946 - Vol 62 - 12 - p. 361 - 368.
79.	R. Quarendon	Paint Manuf. 1942 XII 3-p. 51 - 53
80.	A.L. Roberts	Refractories 1945-21-p. 301 - 305.
81.	C.F. Rabold	Textile Recorder 1945-Mei-p.46-48.
82.	O.W.H. Rees en Z.W. Ogden	J. Text. Inst. 1946 - 37 - T 113.
83.	F.E. Rowland	Paint Manuf. 1942 XII-12-p.221-223.
84.	"	Discovery 1944-5-p.277-280.
85.	"	Machinist 1945-88-p.293-295 E. p.299-301 E.
86.	D. Swatton	Ind. and Mass. Prod. 1947-255th. iss p. 48-53.
87.	F.D. Snijder	Text. World 1943-93-1-p. 58 - 60.
88.	H. Seymour	Electrician 1942-129-p. 200.
89.	Drs H.J. Selling	Mededeling Vezelinst. T.N.O. No. 66 en 66II (Oct. 1943 en Jan. 1944).
90.	" "	Mededeling Vezelinst. T.N.O. No. 77 (Nov. 1945.)
91.	L.E. Stout, K.J.Caplan en W.G. Baird.	Am. Inst. Chem. Engs. 1945-41-3-p. 283 - 314.

92.	F.M. Tiller en H.J. Garber	Ind. and Eng. Chem. 1942-34-p.773-781.
93.	F.M. Tiller	Chem. Prod. 1945-8-p. 35-40.
94.	W.H. Tesmer	Am. Gas Journal 1944-161-5-p. 37.
95.	"	Ind. Finishing 1945-21-6-p. 70-72-76-78.
96.	"	Bull of the Am. Cer. Soc. 1945-24-5-p. 162 - 163.
97.	H.W. Talen	Polytechn. Weekblad 1941-p. 302-303.
98.	T. Volochine	U.S.P. 2.305.396 1938.
99.	W. Wilson	U.S.P. 2.317.426 1941.
100.	M.R. Weiss	Rayon Text. Monthly 1943 Sept. p.499
101.	R.H. Wilhelm	Textile Research 1944-14-p. 400-401.
102.	Wilhelm en Paul	Voorlopig niet gepubl. rappert (Text. Research Inst. U.S.A.)
103.	G. Zimmermann	Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene Band-Vol XXXVII 1946.

- - -
- -
-

OD 311 NOMENCLATUUR.

Q_s = warmtestroom totaal door straling overgebracht Kcal/h.
Q_c = " " " convectie " "
Q_g = " " " geleiding " "
U_s = " " " straling " Kcal/cm^{2}h°C.
U_c = " " " convectie " "
U_g = " " " geleiding " "
Z = zwartheidsgraad
A_s = grootte stralendoppervlak cm^2
A_a = " absorberend opp. "
T_s = abs. temp. stralend opp. °K
T_a = " " absorb. " °K
t_l = temp. lucht °C
t_a = " abs. opp. °C
C = constante (algemene vorm)
λ = golflengte
Å = Ångström-eenheid
E_t = Emissie totaal
E_m = Emissie maximaal
Gn = Gewicht nat (vóór droging) Kg of g.
Gd = Gewicht na droging Kg of g
G_o = drooggewicht (voor de proef) Kg of g
D = Droogduur min. of sec.
p_a = part. druk behorende bij t_a mm H.g.
p_l = part. " " " t_l " "
r = verdampingswarmte bij t_a Kcal/kg.

V_s = verdampsnelheid $\frac{gram}{m^2 sec.}$

K = factor $\frac{V_s}{p_a - p_l}$ verdampsnelheid per eenheid van drukverschil. $\frac{gram}{m^2 \; sec. mm. Hg.}$

h = warmte overgangscoefficient $\frac{cal}{m^2 \; {}^oC \; sec.}$

- - -