

## TELESCOOPSPIEGELS

door H. J. MEERKAMP VAN EMBDEN.

**Samenvatting.** De vorm van het oppervlak der spiegels, gebruikt in de groote spiegel-telescopen, moet aan zeer hooge eischen voldoen. In het gebruik treden afwijkingen op door de doorbuiging onder het eigen gewicht en door kleine temperatuursverschillen aan boven- en onderzijde van het glaslichaam. Beschreven wordt een methode om de gebruikelijke dikke glazen schijf te vervangen door een gietstuk van chroom-ijzer, dat daarna aan een zijde met een dünnere glaslaag bedekt wordt, waarin het reflecteerend oppervlak wordt uitgeslepen.

De ontwikkeling der astronomie en vooral die der astrophysica is zeer nauw verbonden met de ontwikkeling der voor de waarnemingen gebruikte instrumenten. Vóór de uitvinding van de kijker kon men alleen de banen der hemellichamen waarnemen en beschrijven, maar een verder inzicht in de bouw van het heelal had men niet.

De eerste kijkers worden omstreeks 1580 door Giambettista della Porta in Italië en door Zacharias Jansen (1608) in Holland gebouwd. De Hollandsche kijker, die oorspronkelijk als oorlogsinstrument bedoeld was en als zoodanig aan Prins Maurits werd aangeboden, werd spoedig algemeen bekend en ook in Parijs verkocht, en daardoor hoorde Galilei te Padua ervan. Deze doorzag de belangrĳkheid der vinding, en bouwde deze kijker spoedig na, en nu volgt de snelle ontwikkeling van geheel nieuwe inzichten in de bouw van het heelal door de ontdekking der satellieten van Jupiter, de bergen op de Maan, de sterren van de Melkweg, de Zonnevlekken en zoo voort, welk inzicht in de 19e eeuw door de toepassing der spectraalanalyse en der fotografie zeer verdiept werd.

Naast de kijker kwam de spiegeltelescoop tot ontwikkeling. Newton (1640—1720) gaf door zijn ontdekking, dat de spiegel geen chromatische aberratie heeft in tegenstelling met de lens, een groote stoot aan de ontwikkeling van de spiegeltelescoop.

Bij de ontwikkeling van kijker en spiegeltelescoop zien we een soort wedstrijd om de voorrang tusschen deze twee instrumenten, waarbij beide om beurten een voorsprong krijgen. In de laatste jaren treedt de spiegeltelescoop meer op den voorgrond, doordat op de Mount Wilson in 1918 een telescoop met een spiegel-diameter van  $2\frac{1}{2}$  meter in gebruik werd genomen, terwijl er thans een instrument met een spiegel van 5 meter in aanbouw is. Ter vergelijking diene, dat de grootste kijker (die van het Yerkes-observatorium) een lensdiameter van één meter heeft, zoodat voor de grootste instrumenten de spiegeltelescoop onbetwist de voorrang heeft.

Toch hebben beide instrumenten hun eigen toe-

passingsgebied. Een kijker wordt in 't algemeen gebruikt voor visueele waarneming en voor astronomische doeleinden, een spiegeltelescoop en vooral die van groote afmetingen, is het aangewezen instrument voor het waarnemen van lichtzwakke voorwerpen en voor de spectrografie en fotografie. Het beeld, door de kijker gevormd, is op eenige afstand van de optische as nog scherp en in dit opzicht beter dan de afbeelding met een spiegeltelescoop verkregen, maar de laatste is door zijn groote afmetingen beter als verzamelaar van licht, dat is uitgezonden door zeer ver verwijderde objecten. Tenslotte worden spiegeltelescopen veel gebruikt door amateurs, daar zij veel eenvoudiger te maken zijn dan kijkers van overeenkomstige lichtsterkte.

Teneinde aan de chromatische aberratie te ontkomen, moet het objectief van een kijker uit minstens twee lenzen bestaan. Dat wil dus zeggen, dat aan het objectief vier oppervlakken geslepen en ten opzichte van elkaar gecentreerd moeten worden, tegen één oppervlakte van een spiegeltelescoop, terwijl hier de chromatische aberratie niet optreedt. Daarbij wordt in het kijkerobjectief een deel van het invallende licht gereflecteerd aan de oppervlakken en geabsorbeerd in het glas, en deze absorptie is sterker voor het licht met korte golflengte, waarvoor het fotografisch materiaal het gevoeligst is. Het lichtrendement van de spiegeltelescoop kan gunstiger zijn, vooral wanneer men de modernste methode, het veralumineeren van het oppervlak in plaats van verzilveren, toepast, daar het aluminiumoppervlak juist het fotografisch belangrijke deel van het spectrum goed terugkaatst. De reflectie van het verzilverde oppervlak van een telescoopspiegel daalt sterk wanneer het zilverbeslag aan de lucht dof wordt en moet door opnieuw verzilveren op regelmatige tijden verbeterd worden.

Het belangrijkste onderdeel van de spiegeltelescoop, de spiegel, werd oorspronkelijk van metaal gemaakt. Het zgn. spiegelmetaal, een alliage van 68.3% koper en 31.7% tin, is reeds lang bekend en zeer goed bruikbaar. Het bezwaar is, dat het alliage zeer bros en slecht bewerkbaar is, waar-



door het maken van grootere stukken onmogelijk was. Door de samenstelling te wijzigen kon men wel grootere voorwerpen gieten, maar dit ging ten koste van de levensduur van het oppervlak, dat dan na kortere tijd aanloopt en het reflecteerend vermogen verliest. Door de hoge graad van nauwkeurigheid, die van het oppervlak vereischt wordt is een oppoetsen hiervan onmogelijk, een eenmaal dof geworden metaalspiegel is niet meer te herstellen.

Toch was het gebruik van spiegelmetaal de eenige methode, die in de 19e eeuw aan de beroemde Engelsche telescoopbouwers Herschel, Lord Rosse en Lassell ter beschikking stond voor het maken van groote telescopen — tot 182 cm diameter — waarmede zij vele belangrijke resultaten boekten.

Eerst in 1857 gaf Foucault een nieuwe methode aan. Hij geeft het oppervlak van een glazen schijf de gewenschte vorm en bedekt het dan chemisch met een zeer dun laagje zilver. Wordt dit dof door atmosferische invloeden, dan wordt het zilver eenvoudig opgelost en een nieuwe laag zilver aangebracht, zonder dat de vorm eenigszins gewijzigd is. Deze methode maakte groote opgang en wordt nog steeds algemeen toegepast. Eerst in de laatste jaren is door Dr. Strong te Pasadena een methode uitgewerkt om het zilverlaagje te vervangen door aluminium, dat in hoogvacuum door verdampen op het glas wordt aangebracht. Aan de lucht bedekt het aluminium zich met een uiterst dun laagje oxyd, maar wordt dan door de atmosfeer bijna niet verder aangetast.

Wanneer we nagaan, welke moeilijkheden optreden bij het maken en gebruiken van groote telescoopspiegels, en waardoor aan de waarneming van verafgelegen hemellichamen een grens wordt gesteld, dan kunnen wij deze moeilijkheden in twee groepen verdeelen, één groep van oorzaken, onafhankelijk van het gebruikte instrument, en een groep, te wijten aan het instrument.

Tot de eerste groep behoren de inhomogeniteit van de atmosfeer, en het optreden van storend licht, tot de tweede groep de mate van juistheid van het spiegeloppervlak, en de afwijkingen, ontstaan door spanningen in en vervormingen van de gebruikte materialen.

### Moeilijkheden, onafhankelijk van het instrument

Het waarnemen van voorwerpen buiten de dampkring wordt zeer bemoeilijkt, doordat de lucht, waardoorheen het uitgezonden licht naar ons toekomt, niet in rust is, maar in voortdurende beweging. Was deze lucht nu homogeen, dan zou deze

strooming geen invloed hebben, maar door verschillen in temperatuur en vochtgehalte is dit geenszins het geval en de ongelijke breking van het licht op zijn weg naar het instrument maakt het dikwijls onmogelijk, goede waarnemingen te doen.

Hiernaast treden storingen op, doordat de ons omringende lucht niet geheel doorzichtig is, maar bezwangerd met stof en nevel. Niet alleen dat hierdoor een deel van het naar ons toegezonden licht diffuus verstrooid wordt, maar licht van andere bronnen afkomstig wordt eveneens diffuus verstrooid en dus neemt men niet een ster waar tegen een absoluut donkere achtergrond, maar tegen een achtergrond die zelf ook een geringe helderheid heeft. Hoe groot nu het oppervlak van de telescoopspiegel is, hoe meer licht van de waar te nemen ster in het brandpunt verzameld wordt en des te sterker zal het contrast ten opzichte van de achtergrond worden.

Teneinde de invloed van dit diffuse strooilight te verminderen heeft men dan ook besloten de in aanbouw zijnde 5 meter telescoop niet naast de bestaande 2½ meter telescoop, die thans de grootste ter wereld is, te plaatsen op de Mount Wilson, maar op de Mount Palomas (3300 m), op 150 KM afstand daar vandaan. De om de Mount Wilson liggende dalen hebben nl. de laatste jaren een sterke bevolkingstoename gehad, weshalve men zich genoodzaakt zag, het nieuwe observatorium op een meer afgelegen plaats te bouwen.

### Moeilijkheden, te wijten aan het instrument

Liggen de hiervóór beschreven moeilijkheden buiten het terrein van den instrumentbouwer, met de thans volgende moet hij terdege rekening houden, daar zij op de bruikbaarheid van het instrument van beslissende invloed zijn. Wij willen ze daarom één voor één aan een nadere beschouwing onderwerpen.

De theoretisch juiste vorm van het spiegeloppervlak is een paraboloïde, en elke afwijking van de juiste vorm heeft een kwaliteitsvermindering tot gevolg. De eerste vraag die opkomt is dus: in hoeverre mag de uiteindelijke vorm van het oppervlak afwijken van de theoretisch juiste vorm, m.a.w. aan welke toleranties moet het oppervlak voldoen? De meest bekende regel hiervoor is gegeven door Lord Rayleigh, volgens welke de maximale afwijking op één punt mag bedragen  $\frac{1}{8} \lambda$ , of ongeveer 0,07 micron. We zien dus direct met welk een groote nauwkeurigheid het oppervlak bewerkt moet zijn, waar in de metaalbewerking een nauwkeurigheid van enkele microns reeds buitengewone eischen aan de gebruikte machines stelt. Maar ook



zien we, dat de moeilijkheden bij het vervaardigen van groote spiegels zeer snel toenemen, want het maakt wel verschil of men een dergelijke nauwkeurigheid aan moet houden voor een oppervlak van  $180 \text{ cm}^2$  (een spiegel van 15 cm middellijn) of aan een van  $200\,000 \text{ cm}^2$  (de 5-meter-spiegel).

Is deze eisch dus reeds zeer zwaar, zij wordt nog verergerd, doordat een telescoopspiegel niet een volkomen star lichaam is, maar, omdat het instrument in allerlei richtingen komt te staan, elastische vormveranderingen ondergaat, en bovendien door temperatuurschommelingen aan vormveranderingen onderhevig is. De gevolgen hiervan kunnen een telescoop voor het gebruik ongeschikt maken.

De tot nu toe gebruikte telescoopspiegels bestaan uit een glazen schijf, aan de onderzijde vlak geslepen, aan de bovenzijde hol geslepen en daarna verzilverd. Wordt een dergelijke schijf op de gebruikelijke wijze op drie punten opgelegd en dan uit de horizontale stand gedraaid om een ster te volgen, dan treden vormveranderingen op. In horizontale stand buigt de spiegel onder het eigen gewicht in het midden door, terwijl in geheel verticale stand de zwaartekracht een andere vervorming doet optreden. Voor een massieve schijf blijkt de vormverandering in verticale stand een te verwaarloozen effect te sorteeren, maar in horizontale stand is dit niet het geval, wanneer de spiegel meer dan ongeveer 20 cm diameter heeft.

Beschouwen wij eerst twee spiegels van hetzelfde materiaal vervaardigd, dan blijkt uit Couders<sup>1)</sup> onderzoekingen, dat de doorbuiging evenredig is met  $R^3/h^2$ , waarin  $R$  de straal,  $h$  de dikte is. Het is dus mogelijk deze vervorming klein te houden door de dikte groot te maken ten opzichte van de diameter, maar hierdoor treden moeilijkheden op bij het vervaardigen en de montage, die deze weg spoedig afsluiten.

Beschouwen wij thans twee spiegels van dezelfde afmeting maar van verschillend materiaal, dan blijkt de doorbuiging evenredig met  $d/E$  waarin  $d$  het soortelijk gewicht, en  $E$  de elasticiteitsmodulus is. Vergelijken wij bijv. glas en brons, twee materialen die voor spiegels gebruikt worden, dan zien we dat de  $E$  voor beide materialen gelijk is, nl. ongeveer  $7 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$  maar het soortelijk gewicht van brons is 8 tegen dat van glas  $2\frac{1}{2}$ , waardoor in dit geval glas veel beter is dan brons.

Bij de groote spiegels, die in bedrijf zijn, wordt meestal door een ingewikkeld stelsel van hefboomen met tegengewichten de spiegel op verschillen-

de plaatsen extra ondersteund, waardoor de invloed van het eigengewicht wordt tegengegaan. Worden dergelijke spiegels in meer verticale stand gebracht, dan wordt de tegendruk, door de contragewichten uitgeoefend, kleiner, en wordt de spiegel dus min of meer ontlast.

Beschouwen wij thans de andere factor, die de vervorming beïnvloedt, nl. de ongelijkmatige temperatuur van de spiegel. Reeds bij het bewerken treedt deze invloed op, daar door het slijpwerktuig aan het oppervlak warmte wordt ontwikkeld, de onderzijde echter een lager temperatuur heeft. Hierdoor zet de bovenzijde anders uit dan de onderzijde, met als resultaat, dat de juiste kromming verstoord wordt, en gewacht moet worden met verder slijpen of met meten, tot dat de temperatuur weer gelijkmatig is. Het omgekeerde treedt op bij het gebruik; de bovenzijde, gericht naar de hemel, koelt gedurende de waarneming 's nachts af, terwijl de onderzijde, afgeschermd door een kussen van stilstaande lucht tusschen de achterzijde en het montuur, minder afkoelt. Ook hier is een vervorming het resultaat, totdat het temperatuur-evenwicht door geleiding door het glas en door straling, weer hersteld is. Ook hiernaar heeft Couders een onderzoek ingesteld, en gevonden, dat voor gelijke afmetingen de optredende vervorming evenredig is met  $\alpha d c/k$ , waarin

$\alpha$  de lineaire uitzettingscoëfficiënt

$d$  het soortelijk gewicht

$c$  de soortelijke warmte

$k$  het warmtegeleidingsvermogen.

De vervorming, hierdoor veroorzaakt, heeft men getracht te verminderen door gebruik te maken van pyrexglas in plaats van gewoon glas, daar het een kleiner uitzettingscoëfficiënt en een beter ge-

	Uitzettingscoëfficiënt = relatieve verlenging per °C	Warmtegeleidings- vermogen in cal cm <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup>
pyrexglas:	$3 \cdot 10^{-6}$	0,012
gewoon glas:	$9 \cdot 10^{-6}$	0,005

leidingsvermogen heeft. Met metalen spiegels zou men hier veel kunnen winnen, daar de geleiding van metalen ongeveer 100 maal zoo goed is als van glas.

Een derde oorzaak voor kromtrekken is daarin te zoeken, dat bij een spiegel niet alleen aan voor- en achterkant temperatuurverschillen kunnen optreden, maar ook aan de rand ten opzichte van het midden. Hierdoor wordt de randzone soms zoo sterk vervormd, dat de eenige mogelijkheid is, de spiegel te diafragmeeren, waardoor natuurlijk het

<sup>1)</sup> Een speciale studie over dit onderwerp vindt men bij A. Couders, Bull. Astron. VII, 1931.





Fig. 1. Achterzijde van de 30 cm-spiegel. Duidelijk ziet men de aangegoten uitsteeksels, waarmee later de spiegel in de telescoop wordt bevestigd. Tijdens het bewerken, wat met de hand geschiedt, is hieraan een houten ring als handgreep bevestigd.

nuttig oppervlak van de spiegel kleiner wordt. Ook hier zou een metalen spiegel veel minder gevoelig zijn. Hier zien we dus een groot voordeel van metaalspiegels.

Tot nu toe werden de spiegels uitsluitend in de vorm van massieve schijven vervaardigd, met uitzondering van de in aanbouw zijnde 5-m-spiegel van pyrex-glas welke uit een plaat bestaat, die aan de onderkant van ribben is voorzien. Een dergelijke vakwerkconstructie is in verschillende opzichten voordelig. Men heeft ze tot nu toe niet kunnen toepassen, omdat het gieten van ingewikkelde vormen uit glas zeer moeilijk is.

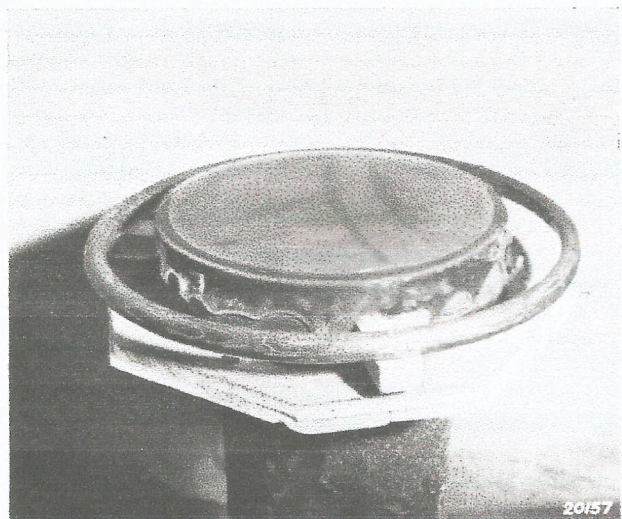


Fig. 2. Gietstuk voor een holle 30 cm-spiegel (brandpunt-afstand 2 m). Bij het glas opleggen is een gedeelte over de rand heengevloeid. Het vormgeven geschiedt door 2 glaszijven, waartusschen slijpmiddelen worden gebracht (carborundum, alundum, polijstrood), over elkaar heen te bewegen.

Het gieten van metalen is veel gemakkelijker. Men houdt echter bij toepassing van metalen het reeds eerder genoemde bezwaar, dat het spiegelen-de oppervlak slecht bewerkbaar is en gauw verweert.

Een methode om deze moeilijkheden te verkleinen is hier thans in onderzoek. Hierbij worden de goede eigenschappen van glas en metaal gecombineerd door een metaalspiegel aan de bovenzijde te bedekken met een zeer dunne glasl laag, waarna het oppervlak wordt geslepen.

Het metaal dat gebruikt wordt is een speciale chroomijzerlegering, die een uitzettingscoëfficiënt

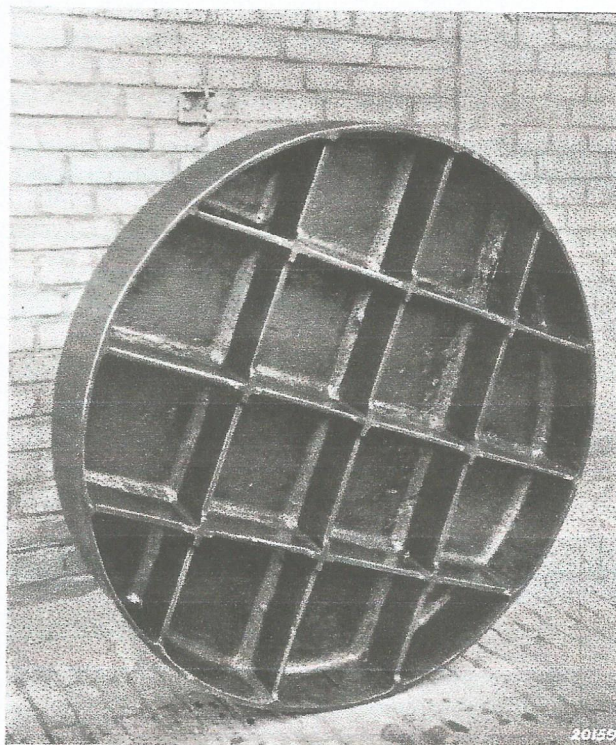


Fig. 3. De achterzijde van de 90 cm spiegel. Het vakwerk geeft de noodige sterkte aan de dunne bovenschijf, waarop het glas is aangesmolten.

heeft, gelijk aan die van glas. Deze legering heeft een uitgebreide toepassing gevonden voor vacuüm-dichte metaal-glas-verbindingen, die een essentieel onderdeel vormen van de grootere gelijkrichtbuisen, zendlampen en röntgenbuizen.

Het gieten van chroomijzer is niet veel moeilijker dan het gieten van staal en is veel gemakkelijker dan het gieten van glas.

Men kan dus elk model gieten, en de versterkingsribben zoo dun en hoog maken als voor groote sterkte bij klein eigengewicht noodig is. Tevens kan men ooren of steunen aangieten, die later bewerkt en van schroefdraad voorzien kunnen worden en dienen om de montage van de



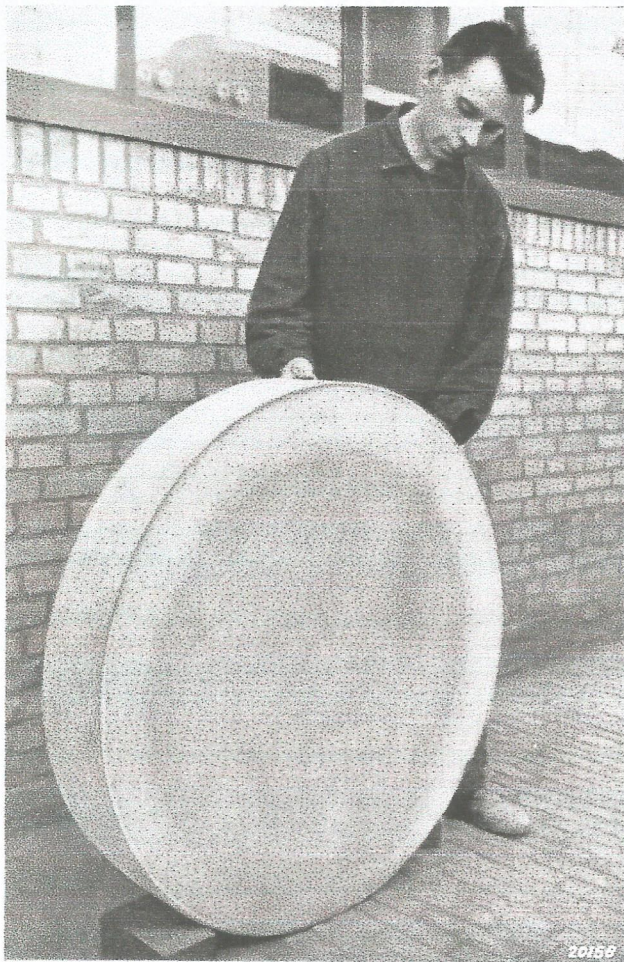


Fig. 4. Chroomijzer gietstuk van 90 cm diameter, aan de voorzijde bedekt met 10 mm glas (het glas is gematteerd). Het glas wordt later volkomen vlak geslepen, waarna het oppervlak verzilverd wordt.

spiegel aan het frame te vergemakkelijken.

Het gietstuk is door een eenvoudige gloeiing spanningsvrij te maken, wat niet gezegd kan worden van de glazen spiegels, die meestal maandenlang een zeer nauwkeurig te regelen koelproces moeten doormaken, wil men het materiaal spanningsvrij hebben.

Het chroomijzer gietstuk wordt eerst aan de achterzijde bewerkt en vlak gedraaid, zoodat de spiegel later op de slijpmachine behoorlijk vlak ligt. Vervolgens wordt het omgedraaid, en het bovenvlak, dat later met glas bedekt wordt, bewerkt. Hierbij wordt dan het oppervlak bij ruwe benadering dezelfde vorm gegeven, die het geslepen oppervlak moet hebben.

Dan volgt het bedekken met glas. Op het metaal

wordt een glasplaat gelegd; metaal en glas worden in een oven geschoven en verhit tot boven de verweekingstemperatuur van het glas. Het glas begint te vloeien, en hecht aan het eronder liggende metaal, maar wordt niet zoo dun vloeibaar gemaakt, dat bij een holle spiegel alles naar het midden stroomt. Zoodoende blijft de glasdikte over het geheele oppervlak vrijwel constant. Men behoeft dus weinig weg te slijpen, maar het grootste voordeel is, dat de glaslaag dun is en de afkoeling zonder optreden van spanning snel kan geschieden, waarvoor ongeveer evenveel uren als anders weken noodig zijn. Ook is het mogelijk, de glazen platen van tevoren te sorteren, en dus luchtblaasjes, steentjes en andere glasfouten van te voren te elimineeren.

Zoodoende kan men de voordeelen van metaal en glas vereenigen: van metaal de gemakkelijke vormgeving, goede geleidbaarheid, en gemakkelijke bevestiging, van glas het goede oppervlak en de mogelijkheid van verzilveren of veralumineeren.

Een holle spiegel, volgens deze werkwijze vervaardigd (fig. 1 en 2), is ter beschikking gesteld van de kort geleden gestichte Dr. A. F. Philips Sterrewacht te Eindhoven en wordt thans geslepen voor ca. 2 meter brandpuntsafstand. Deze spiegel zal in een daarbij te bouwen telescoop worden gebruikt.

Een vlakke spiegel van 90 cm middellijn (fig. 3 en 4), is afgeleverd aan het Californian Institute of Technology. Hij wordt nu geslepen om als spiegel voor een coelostaat te dienen, d.w.z. een toestel, dat dient om het door een hemellichaam uitgestraalde licht via een vlakke, door een uurwerk gedraaide spiegel in één bepaalde richting te weerkaatsen, waardoor de meetinstrumenten een vaste opstelling kunnen verkrijgen.

Worden deze coelostaten gebruikt voor waarnemingen van de zon, dan heeft een glazen spiegel groote bezwaren door de sterke vormveranderingen tengevolge van de groote temperatuursverschillen tijdens het meten, terwijl metalen spiegels bezwaren geven, doordat het oppervlak op den duur aanloopt, waardoor de reflectie slecht wordt.

De voordeelen van de nieuwe methode komen hier dus speciaal tot hun recht.