

## Supergladde spiegelvlakken voor de röntgenastronomie-satelliet ROSAT

Erich Heynacker en Bernd Aschenbach

Het hart van de röntgenastronomie-satelliet ROSAT [1] is de door de firma Zeiss vervaardigde röntgenoptische spiegeltelescoop [2]. Het optisch principe van deze telescoop is hetzelfde als dat van de door de fysicus Hans Wolter in Kiel gebouwde röntgenmicroscop [3]: de klassieke combinatie van een parabolisch spiegelobjectief en een hyperbolische spiegel als oculair. Een dergelijke combinatie behoudt zijn goede afbeeldingseigenschappen ook bij de scherpe inval die voor de reflectie van röntgenstraling noodzakelijk is (figuur 1). Om bij deze scherpe inval een voldoende groot stralingsinvallend oppervlak te krijgen, zijn beide spiegels uitgevoerd als viervoudige, concentrische stelsels. De diameter van de grootste spiegel is 83 cm en elk der spiegels is 50 cm lang. De hoek tussen het spiegeloppervlak en de invallende straling is gemiddeld  $2^\circ$ . Een goede afbeelding door dergelijke spiegels vereist in de eerste plaats zeer gladde oppervlakken, terwijl de vormnauwkeurigheid pas op de tweede plaats komt. De microruwheid van de spiegeloppervlakken mag hooguit een paar tiende nanometers bedragen, terwijl vormfouten van enige tientallen nanometers in de spiegel nog tolerabel zijn.

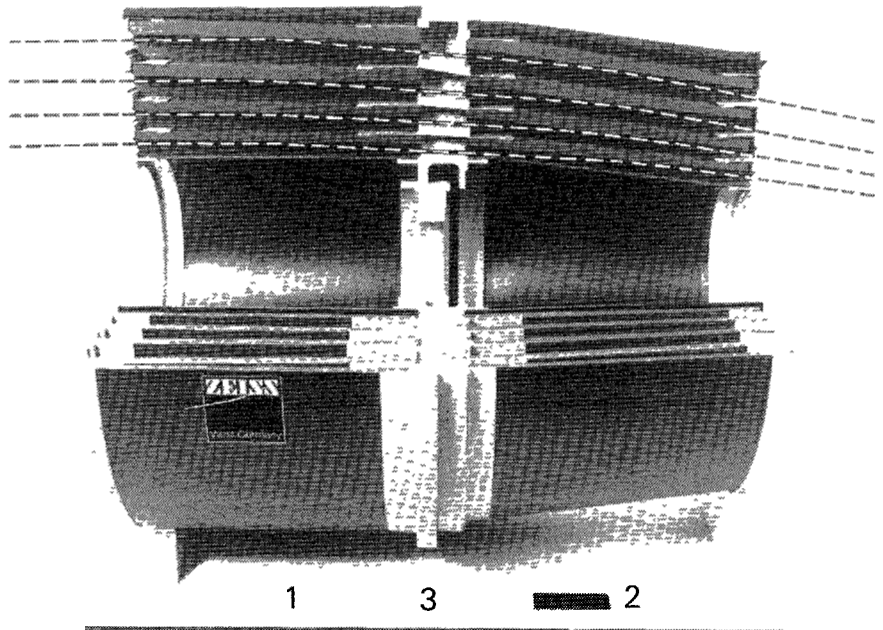
### Ruwheidsmetingen aan de spiegelvlakken

Doelgerichte ontwikkeling van supergladde spiegels is pas mogelijk als men over adequate meetmethoden voor de bereikte gladheid van de spiegelvlakken beschikt. We gaan daarom eerst nader in op microruwheidsmetingen aan optische oppervlakken. De belangrijkste meetprincipes hiervoor zijn:

- mechanische aftasting,
- micro-interferometrie,
- meting van de in totaal verstrooide lichtintensiteit,
- meting van het strooi-profiel met röntgenstraling,
- tunnelmicroscopie en verwante methoden

De vraag is nu welke van deze methoden in ons geval het best kan worden toegepast.

Een ding stond van het begin af aan vast: het Max Planck-instituut voor Extrater-



Figuur 1. Opengewerkt model van het spiegelsysteem van de ROSAT. 1 parabolische spiegels, 2 hyperbolische spiegels, 3 centrale bevestigingsflens.

restrische Fysica (MPE) in Garching had een röntgenmeting nodig om de uiteindelijke spiegelkwaliteit betrouwbaar te kunnen bepalen. Dergelijke metingen worden gedaan met langgolvlige, dat wil zeggen weinig doordringende straling, en dit vereist meting in vacuüm. Bij Zeiss daarentegen was men het meest gebaat bij een zo eenvoudig mogelijk uitvoerbare werkplaatsmeting. Een betrouwbare vergelijking van de twee te gebruiken meetmethoden was dus van het grootste belang. Metingen aan verschillende, identiek bewerkte vlakke monsters was hierbij niet zinvol, voor betrouwbare resultaten moest na elk bewerking stadium aan de spiegels zelf kunnen worden gemeten.

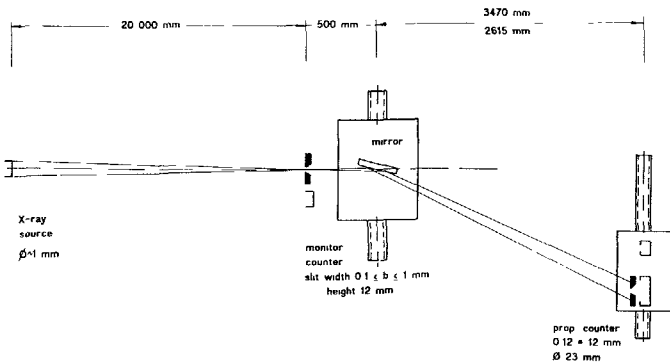
Voor de werkplaatsmeting kozen we uiteindelijk voor een micro-interferometrische methode. Een meetinstrument hiervoor, dat met geringe aanpassing voor ons doel geschikt zou zijn, was kort tevoren op de markt gebracht door de firma WYKO. We zullen nu nader ingaan op de beide gebruikte methoden voor oppervlakteruwheidsmetingen.

### Meting van het röntgenverstrooiingsprofiel

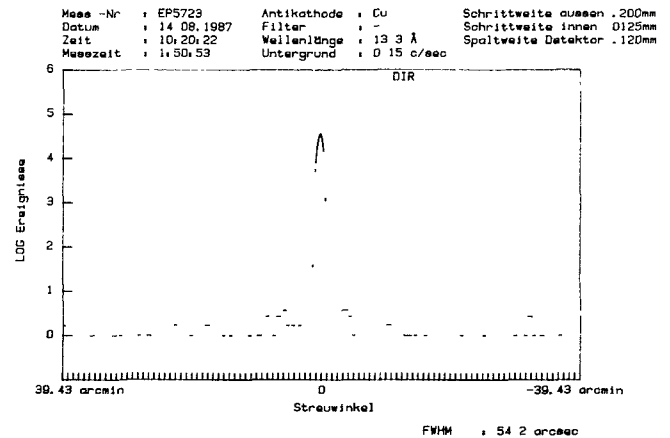
Vanwege het doel van de spiegels interesseerde ons de verstrooiing van röntgenstraling tussen 0,1 en 10 nm golflengte, met een zwaartepunt bij 1 nm. Aangezien de brekingsindex voor röntgenstraling van de meeste materialen dicht bij 1 ligt, treedt totale röntgenreflectie alleen op bij scherpe inval. De optimale glanshoek ligt bij  $1-2^\circ$  vanaf het oppervlak. Bij een vaste invalshoek neemt de reflectie toe met de golflengte maar ook met de elektronendichtheid in het spiegeloppervlak. Daarom zijn röntgenspiegels doorgaans bedekt met een dunne laag platina of iridium.

Rondom de spiegelend gereflecteerde straal treedt, door buigingsverschijnselen aan microruwheden op het oppervlak, een halo van verstrooide straling op. Net als in het zichtbare deel van het spectrum, bestaat er voor röntgenstraling verband tussen de buigingshoek en de golflengte van een periodieke structuur op het oppervlak.

Supergladde spiegelvlakken voor de röntgenastronomie-satelliet ROSAT



Figuur 2. Principe van de PANTER, de röntgenapparatuur van het MPE voor het meten van de aan optische oppervlakken verstrooide straling.



Figuur 3. Intensiteitsprofiel van de invallende bundel.

Wanneer we uitgaan van de eerder genoemde waarden voor de golflengte (1 nm) en de buigingshoek (2°), dan blijkt de strooiing die we vinden in een hoek tussen 10 boogseconden en 1° rond de spiegelende reflectie te worden veroorzaakt door oppervlaktestructuren met golflengten tussen 1,6 mm en 0,6 mm.

De structuur die een oppervlak vertoont als gevolg van het productieproces, kan gevonden worden door de autocorrelatiefunctie van het ruwheidsprofiel te berekenen. De resulterende verdeling van de strooiingshoeken wordt vervolgens gevonden als de fouriergetransformeerde van deze autocorrelatiefunctie.

Metingen uitgevoerd door het MPE lieten zien dat voor het merendeel der onderzochte proefstukken de autocorrelatiefunctie benaderd kan worden door een exponentiële verdeling. De totaal verstrooide intensiteit is dan te vinden door een simpele integratie over alle strooihoeken. Lange series metingen lieten zien dat de röntgenverstrooiing zich op dezelfde manier laat beschrijven als die van zichtbaar licht [4], zij het met andere waarden voor de correlatielengten en de microruwheid.

Figuur 2 toont het principe van de röntgenverstrooiingsmetingen. Het meetobject staat op een drie-assige manipulator, op ca. 20 m afstand bevindt zich de röntgenbron. De straling hiervan wordt met een nauwe spleet gecollimeerd tot een smalle bundel die op het te meten oppervlak valt. De verstrooide straling wordt op een afstand van 2,6 m gemeten met een proportionele teller.

Figuur 3 laat het intensiteitsprofiel zien van de invallende bundel, zoals dat ook als reflectie gemeten zou worden als daarbij geen strooiing zou optreden. Het bundelprofiel vertoont een intensiteitsverloop over meer dan vier decaden.

temperatuurvariaties in de omgevingslucht vrijwel verwaarloosbaar is.

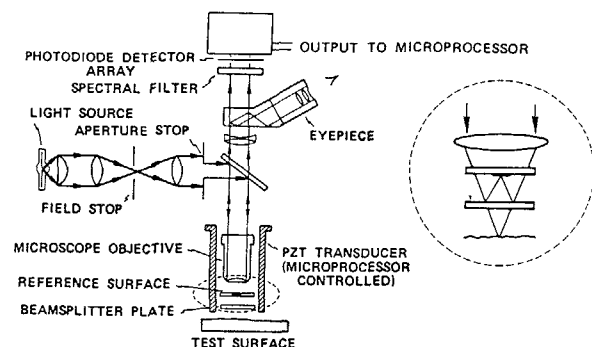
Zoals uit de getoonde stralengang volgt, komt ook de ruwheid van het referentieoppervlak volledig tot uiting in de meetresultaten. Dit oppervlak moet dus ofwel veel gladder zijn dan het meetobject, ofwel er is een moeizaam middellingsproces nodig om de ruwheid van het referentievak te elimineren. Onze spiegeloppervlakken waren ongeveer driemaal zo glad als de destijds beschikbare referentievlakken. Hierdoor werd het uitwerken van de meetresultaten tamelijk moeizaam, doch dit was slechts een schoonheidsfout en geen essentiële beperking.

Micro-interferometrische bepaling van de oppervlakteruwheid

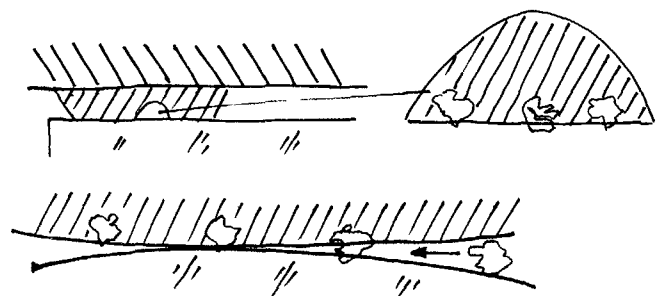
Het principe van het gebruikte ruwheidsmeetinstrument van de firma WYKO is weergegeven in figuur 4. Het is een interferentie-microscop van het Mireau-type met piezo-elektrisch aangedreven faseverschuiving en een rij detectordioden in het beeldvlak. De opstelling is bijzonder compact, waardoor de invloed van

Hoe maakt men optische oppervlakken met een slechts zeer geringe ruwheid?

De bereikbare gladheid van een gepolijst oppervlak hangt in meerdere of mindere mate af van alle gebruikte slijp- en polijstbewerkingen. Worden er in de eerdere processtappen geen fouten gemaakt, dan bepaalt het polijstproces de kwaliteit van het uiteindelijke resultaat. Hierbij zijn



Figuur 4. Schema van de optische microruwheidsmeting met de apparatuur van de firma WYKO.



Figuur 5. Mechanische materiaalafname bij het polijstproces.

twee essentiële processen te onderscheiden voor het verwijderen van materiaal:

- mechanisch polijsten,
- chemisch polijsten.

Het mechanisch polijsten is als volgt te beschrijven (figuur 5): in het oppervlak van een drager - doorgaans het klassieke polijstpek - zijn polijstmiddelkorrels ingebed. Zij steken slechts met punten uit het oppervlak en verwijderen tijdens het proces spanen van sub-nanometer afmetingen. Beweegt men het pek kris-kras, zonder een bepaalde voorkeursrichting over het werkstuk dan verkrijgt men een optimaal resultaat.

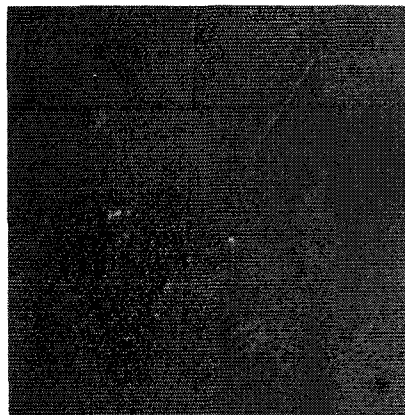
Bij het polijsten van asferische oppervlakken, zoals voor onze telescoop, is er een groot probleem. het gereedschap moet zich voortdurend aan de veranderende kromming van het werkstukoppervlak aanpassen. Is daarbij het gereedschap niet voortdurend geheel in contact met het werkstukoppervlak, dan zullen er losse polijstmiddelkorrels, of korrelaglomeraten, in de spleet tussen gereedschap en werkstuk raken - ook al is die spleet er soms maar voor een zeer kort moment. Sluit zich daarna de spleet weer, dan zal door een hele korrel een spaan van micrometers dikte worden afgenomen en er ontstaat een kras, honderd tot duizend maal dieper dan toelaatbaar.

Bij de chemische component van de polijstbewerking treden aan het werkstukoppervlak zeer ingewikkelde processen op. Er ontstaat een dunne, gehydrateerde oppervlaktelaag met een sterke ionenuitwisseling tussen werkstuk en polijst-vloeistof. Dit kan tot ernstige problemen leiden, maar indien goed beheerst, is de chemische component zeer effectief; zij levert waarschijnlijk zelfs een wezenlijk aandeel in het totale proces.

De microtopografie van een zeer glad oppervlak met een ruwheid van minder dan 0,5 nm rms (rms: root mean square - standaardafwijking) laat zich optisch slechts met grote moeite, of soms zelfs in het geheel niet meer zichtbaar maken. De beste resultaten bij optische ruwheidsmetingen worden verkregen door differentiëren van het bij reflectie ontstane golffront, zoals dat gebeurt bij het differentiaal-interferentiecontrast volgens Nomarski. De figuren 6 en 7 tonen oppervlakstructuren waarin nog sporen van verspanende bewerking te herkennen zijn. Figuur 6 is verkregen door eenmaal differentiëren loodrecht op de bewegingsrichting (microruwheid 3,2 nm rms), figuur 7 door eenmaal differentiëren in de bewegingsrichting (1,5 nm rms). Deze oppervlakken waren niet door polijsten, maar door bewerken met een slijpschijf verkregen. De oppervlakken lijken op het



Figuur 6. Microscopische opname van een speciaal geslepen monster BK7-glas. Differentiaal-interferentiecontrast volgens Nomarski, loodrecht op de structuur in de ruwheid. Microruwheid 3,2 nm rms, breedte van het beeld 500  $\mu\text{m}$ .



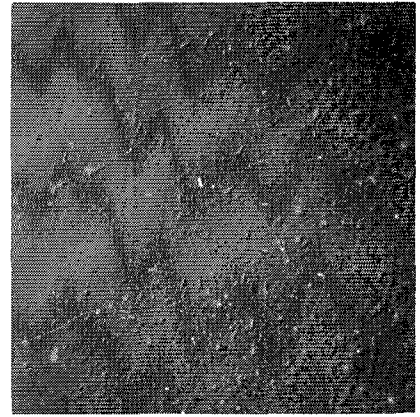
Figuur 8. Microscopische opname van een gepolijst Zerodur-monster met onregelmatig verdeelde fouten. Differentiaal-interferentiecontrast volgens Nomarski. Microruwheid 0,25-0,5 nm rms, breedte van het beeld 200  $\mu\text{m}$ .

eerste gezicht gepolijst, hetgeen laat zien welke vooruitgang op het gebied van slijpen er inmiddels is geboekt.

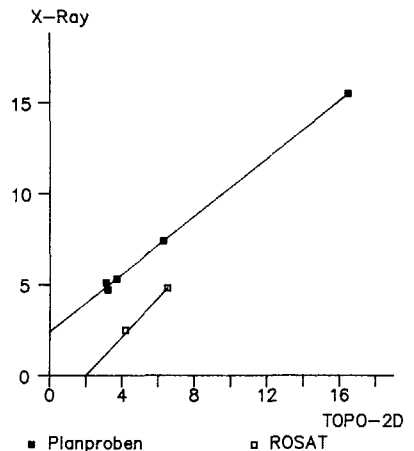
Figuur 8 toont een oppervlak met zeer geringe microruwheid (0,25-0,5 nm rms) waarop voornamelijk sporen van chemische cavities te zien zijn. Deze opnamen laten duidelijk zien dat een meetmethode waarbij een oppervlak slechts langs een lijn wordt afgetast, in de problemen komt doordat de meetresultaten zeer sterk kunnen variëren met de keuze van plaats en richting van de meetlijn.

Het is bij dit soort oppervlakte-topografie vrijwel ondoenlijk om met een beperkt aantal metingen een goede karakterisering van een groot optisch oppervlak te geven.

Aftasten langs een lijn zal alleen dan zinvol zijn als het gelukt om over het gehele oppervlak een praktisch gelijke topografie te bereiken. Daartoe moeten de mechanische omstandigheden overal zo



Figuur 7. Als figuur 6, maar nu met het interferentiecontrast in de richting van de slijpsporen. Microruwheid 1,5 nm rms, breedte van het beeld 500  $\mu\text{m}$ .



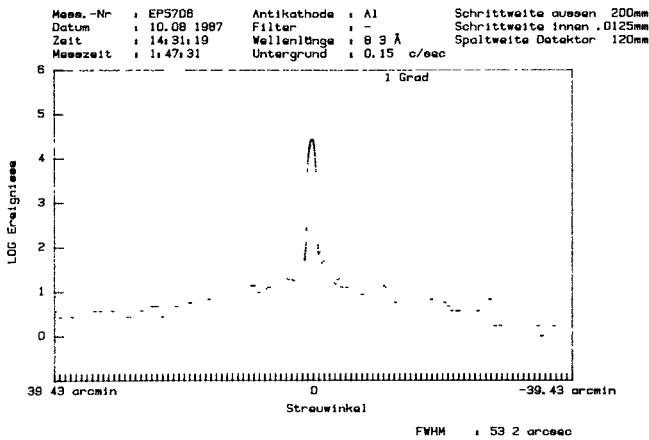
Figuur 9. Vergelijking van ruwheidsmetingen met röntgenverstrooiing en met microinterferometrie (WYKO) aan een aantal monsters met uiteenlopende ruwheid.

goed mogelijk dezelfde zijn, en moet chemisch polijsten zeer voorzichtig worden gebruikt. Alleen dan lukt het resultaten van topklasse te bereiken.

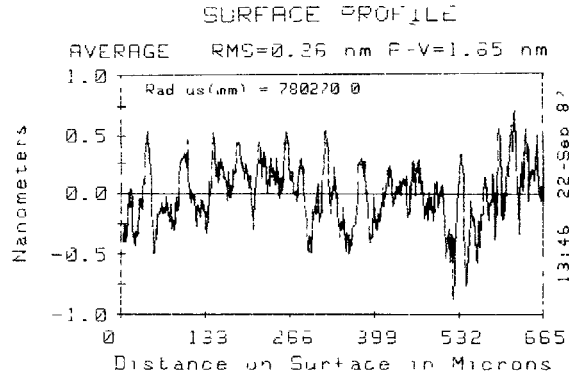
### Meetresultaten

Als afronding van de voorbereidende werkzaamheden bij het MPE zijn een aantal vlakke proefmonsters gemaakt met verschillende polijstmethoden, om de relatie tussen de resultaten van de twee meetmethoden te onderzoeken. In figuur 9 zijn de gemeten microruwheden van de verschillende monsters uitgezet. Verticaal staan de röntgenverstrooiingsmetingen, horizontaal de resultaten gemeten met de WYKO-apparatuur. Voor werplaatmetingen is de correlatie tussen de verschillende resultaten verheugend goed te noemen. Het is echter ook duidelijk dat er geen absolute microruwheid is aan te geven, maar dat bij elk getal de meetme-

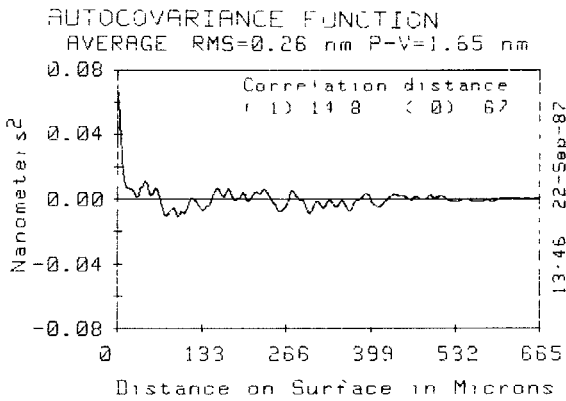
Supergladde spiegelvlakken voor de röntgenastronomie-satelliet ROSAT



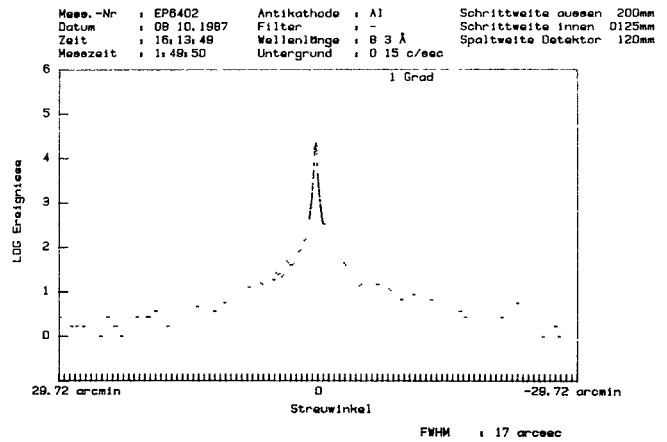
Figuur 10. Röntgenverstrooiingsmeting aan een gepolijst oppervlak; ruwheid 0,5 nm rms.



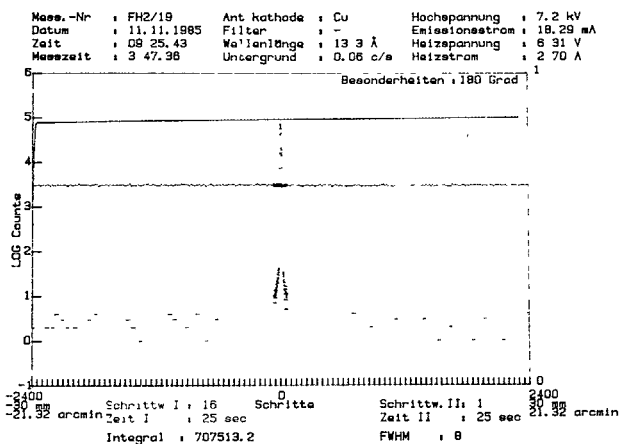
Figuur 11. Microruwheidsmeting aan het zelfde monster als in figuur 10; ruwheid 0,26-0,34 nm rms.



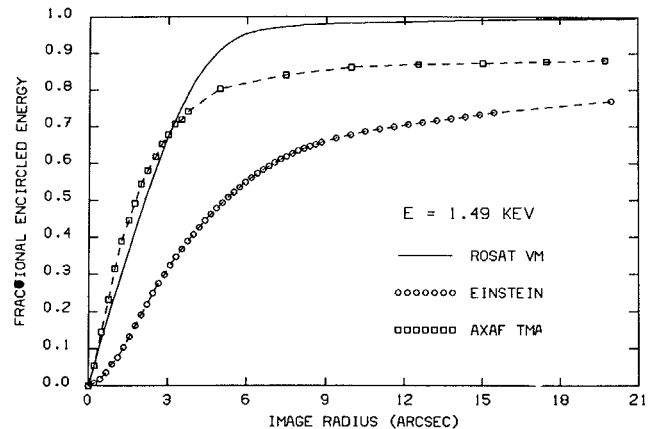
Figuur 12. Autocorrelatie-curve berekend uit het in figuur 11 gegeven ruwheidsprofiel.



Figuur 13. Röntgenverstrooiingsprofiel gemeten aan een gepolijst monster met een ruwheid van 1,6 nm rms.



Figuur 14. Röntgenverstrooiingsprofiel gemeten aan de beste ROSAT-spiegel; microruwheid 0,21 nm rms.



Figuur 15. Geïntegreerde intensiteitsverdeling in het beeld van een puntbron voor drie verschillende röntgenspiegelsystemen. Verticaal is uitgezet de totale energie binnen een cirkel met de horizontaal in boogseconden gegeven straal.

thode steeds nauwkeurig moet worden vermeld. Figuur 10 geeft de röntgenverstrooiingsmetingen aan een monster met een microruwheid van 0,5 nm rms. Bij vergelijken met figuur 3 is de halo rond de spiegelende reflectie duidelijk te zien. Verder is er

een 'onrust' in de metingen, die op een periodiciteit in de oppervlaktestructuur wijst; deze is ook duidelijk te herkennen in het ruwheidsprofiel in figuur 11. De voornaamste component in de structuur heeft een periode van 35 µm. De autocorrelatiefunctie in figuur 12 laat nog duidelijker een zekere periodiciteit in de structuur zien. In de microtopografische opnamen zijn hiervoor echter geen duidelijke aanwijzingen te vinden. Figuur 13 geeft de röntgenmetingen aan het slechtste monster (1,6 nm rms). De curve vertoont in het midden een kleine

lijker een zekere periodiciteit in de structuur zien. In de microtopografische opnamen zijn hiervoor echter geen duidelijke aanwijzingen te vinden. Figuur 13 geeft de röntgenmetingen aan het slechtste monster (1,6 nm rms). De curve vertoont in het midden een kleine

schoonheidsfout als gevolg van de globale geometrie van het oppervlak is een zekere focusering van de straling opgetreden, waardoor de centrale piek in feite te scherp is. Afgezien daarvan is duidelijk dat, door de grote ruwheid, de halo rond de piek veel groter is. De verstrooiingsmeting aan de beste spiegel voor de ROSAT wordt, tenslotte, getoond in figuur 14. De microruwheid van deze spiegel bedraagt 0,21 nm rms.

### Conclusies

Op grond van onze metingen aan supergladde oppervlakken kunnen we stellen dat röntgenverstrooiingsmetingen een krachtige methode leveren voor de kwalitatieve bepaling van de microtopografie van optische vlakken. Dit geldt voor ruwheidswaarden globaal in de range 0,2-20 nm rms.

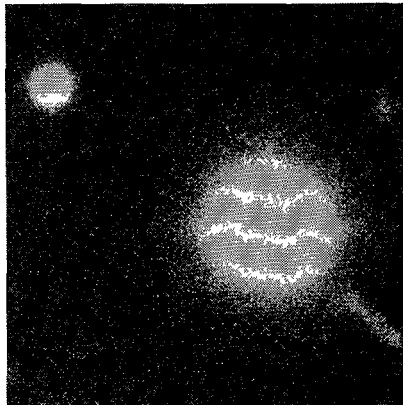
De micro-interferentiemetingen vormen een zeer geschikte praktische methode, vooropgesteld dat de onregelmatigheden in het oppervlak voldoende homogeen verdeeld zijn, zodat met een beperkt aantal metingen een representatief resultaat is te verkrijgen.

Wat de spiegels voor de ROSAT-telescoop betreft, kunnen we zeggen dat de methoden voor het maken van supergladde oppervlakken zover zijn verbeterd dat ruimschoots aan de gestelde eisen kan worden voldaan. Dit was al duidelijk bij het maken van het proefmodel; de definitieve ROSAT-spiegels blijken nog aanmerkelijk beter te zijn uitgevallen.

Figuur 15 toont de afbeeldingseigenschappen van de drie beste röntgentelescopen die tot nu toe zijn gebouwd:

- het proefmodel voor de ROSAT,
- de Amerikaanse Einstein-telescoop, de eerste astronomische röntgentelescoop [5],
- het proefmodel voor de Amerikaanse AXAF-TMA-telescoop, waarvan de bouw voor de tweede helft van de jaren 90 op het programma staat [6] (AXAF-TMA. Advanced X-ray Astrophysics Facility - Technology Mirror Assembly).

Bij de AXAF-telescoop is het doel een zo hoog mogelijk scheidend vermogen te bereiken, en dat is bij de TMA uitvoering gelukt. Een groot deel van de invallende energie wordt in het centrale deel van het beeld geconcentreerd. Bij 50% van de totale energie is de AXAF-TMA duidelijk beter dan het proefmodel voor de ROSAT, bij 80% liggen de verhoudingen echter reeds omgekeerd. Dit betekent dat, qua contrast de ROSAT beter zal zijn vanwege de geringere microruwheid van de spiegels. De spiegelruwheden:

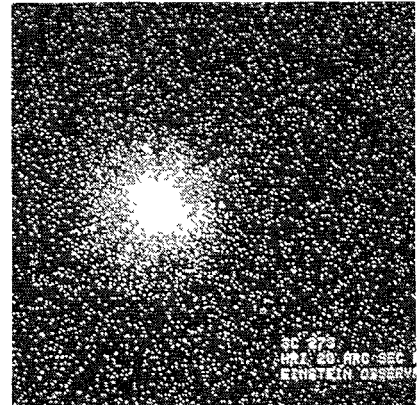


Figuur 16. Lichtoptische afbeelding van de quasar 3C273. De intensiteit van de naar rechtsonder uit het centrum komende straal, afmetingen 2 bij 10 boogseconden, bedraagt 0,03% van de intensiteit in het centrum.

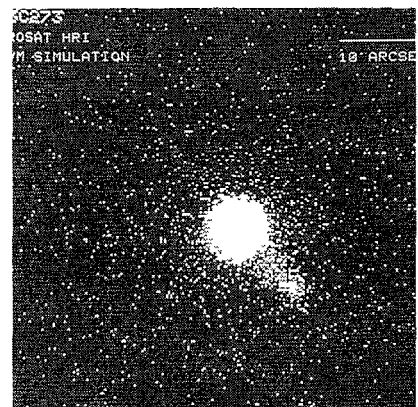
0,28 nm rms voor ROSAT, 1,3 nm voor AXAF-TMA en 2,0 nm voor de Einstein-telescoop resulteren in strooistralingintensiteiten die zich verhouden als 1:20:50, aangezien de ruwheid kwadratisch voorkomt in de formule voor de intensiteit van de strooistraling. De praktische consequenties van deze verschillen worden duidelijk geïllustreerd door de voorbeelden in de figuren 16, 17 en 18. Figuur 16 is een lichtoptische opname van de quasar 3C273, een actief melkwegstelsel, de activiteit blijkt onder meer uit een lichtzwakke straal (jet) die uit het centrum komt. Figuur 17 is een opname van hetzelfde object gemaakt met de Einstein-röntgentelescoop. De straal is hier niet te zien doordat de strooistralenhalo het contrast te zeer vermindert. Figuur 18, tenslotte, toont een simulatie van de opname zoals die met de ROSAT-spiegels moet kunnen worden verkregen. De straal, met afmetingen van 2 boogseconden bij 10 boogseconden is duidelijk te herkennen, ofschoon zij 300 maal lichtzwakker is dan de centrale bron.

### Literatuur

- [1] Voor een beschrijving van de röntgenastronomie-satelliet ROSAT zie Mikroniek 32(1992)5, pp 141-146
- [2] E K Aschmonet, *Das Universum wird geröntgt*, Schott Information 1/1985, 14(1985)  
B Aschenbach, X-ray Telescopes, Reports of Progress in Physics 48, 579(1985)  
B Aschenbach, Design, construction and performance of the ROSAT high resolution X-ray mirror assembly, Applied Optics 27, April 1988
- [3] H Walter, Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen, Ann Physik 6 F 10, 94 (1952)



Figuur 17. Röntgenoptische afbeelding van de quasar 3C273, opgenomen door het Einstein-observatorium (foto: Harvard Centre for Astrophysics, Cambridge USA).



Figuur 18. Te verwachten afbeelding van de quasar 3C273 op basis van de kwaliteit van het ROSAT-verificatiemodel (computersimulatie).

- [4] Zie bijvoorbeeld J M Bennet, Scattering and surface evaluation techniques for the optics of the future, Optics News 7/85, 17(1985)
- [5] L van Speybroeck, Einstein Observatory (HEAO-B) mirror design and performance, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 184,2 (1979)
- [6] G C L Wyman, C C Dailey, C Reilly, M Weisskopf, P McKinnon, D Schwartz, L van Speybroeck, M Zombeck, The AXAF Technology Mirror Program - An Overview, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 597,2(1985)

Dit artikel is een vertaling en bewerking van "Superglatte optische Flächen für den Röntgen-astronomie-Satelliten ROSAT" verschenen in Zeiss Information 30, 27-32 (1988)

### Auteursnoot

Erich Heynacher, Labor für Technologie- und Verfahrensentwicklung Optik Carl Zeiss, Oberkochen Deutschland  
Bernd Aschenbach, Max-Planck-Instituut für Extraterrestrische Physik, Garching Deutschland