

Adaptieve optiek: hedendaagse technologie geeft klassieke optica nieuwe impulsen

Frans Zuurveen

Van vormvast naar vormveranderlijk

Antonie van Leeuwenhoek was niet alleen een bekwaam bioloog maar ook een vaardig fijnmechanicus, die eigenhandig de microscopen vervaardigde waarmee hij vergrotingen tot misschien wel 500x wist te bereiken. Hij goot en sleep zelf zijn beroemde bolvormige miniatuurlensjes en ontwierp en maakte het bijbehorende mechaniek voor de instelling van de unieke lens die – objectief en oculair tegelijk – een voor die tijd perfect beeld opleverde. Zijn ontdekking in 1675 van het eencellige pantoffeldiertje – *Paramecium Caudatum* voor de liefhebbers – moet hem een echt Aha-Erlebnis hebben bezorgd.

Na Van Leeuwenhoek bleef het ontwerpen en maken van optische instrumenten lange tijd een puur empirische aangelegenheid. Pas in de negentiende eeuw gaf Ernst Abbe – wetenschapsman en sociaal bewogen grondlegger van de Carl Zeiss Stiftung – een wetenschappelijke basis aan de geometrische optica. Onder andere formuleerde hij zijn bekende sinusvoorwaarde, waaraan microscoopobjectieven dienen te voldoen. Curieus is dat samengestelde microscoopobjectieven die voor zijn tijd waren vervaardigd en door Abbe werden nagerekend, ook correspondeerden met zijn sinusvoorwaarde. Intuïtief waren zijn voorgangers blijkbaar tot hetzelfde resultaat gekomen.

Na Ernst Abbe's baanbrekende werk nam de bekwaamheid in de berekening en vervaardiging van optische systemen toe. Naast verschillende glassoorten met toegespitste optische eigenschappen werden ook kunststoffen als materiaal voor optische componenten toegepast. De ideale boloppervlakken die dienden als grondslag voor de optische berekeningen van Abbe, werden soms vervangen door niet-bolvormige be-

grenzingen van de componenten: in het groot in de geweldige spiegels voor astronomische telescopen, in het klein in de asferische optieken voor bijvoorbeeld de aftastsystemen in Compact Disc-spelers. Laatstgenoemde toepassing, waarbij putjes kleiner dan een micrometer van een CD worden "gelezen", bracht geavanceerde fijnmechanica binnen het bereik van een groot publiek. Maar ondanks alle fijnmechanische en optische geavanceerdheid van mega-telescopen en micro-elektronica bleven optische componenten statisch: de vorm die ze van hun ontwerper hadden meegekregen, moest gedurende hun levensduur zo goed mogelijk behouden blijven.

In de laboratoria van de optische onderneming die in Jena groeide uit de inspanningen van Ernst Abbe, werkt heden ten dage een wetenschappelijk onderzoeker die het axioma van zijn beroemde voorganger dat optische componenten statisch van vorm moeten zijn, ter discussie heeft gesteld. Dr. Fritz Merkle – eerst werkzaam bij de Europese organisatie ESO (European Southern Observatory) in Garching bij München en recentelijk in dienst getreden van Carl Zeiss Jena GmbH – is een van de pioniers van adaptieve optiek: optische systemen met elementen die door terugkoppeling van vorm veranderen en zo afwijkingen corrigeren.

Het principe van adaptieve optiek werd al in 1953 door H.W. Babcock voorgesteld [1] maar de praktische bruikbaarheid werd pas in de herfst van 1989 aangetoond met de ESO-telescoop in de Haute Provence [2]. Afgezien van militaire toepassingen (in het Amerikaanse SDI-programma) ligt het civiele toepassingsgebied van adaptieve optiek voorlopig nog bij astronomische systemen, waar atmosferische storingen tot voor kort de belangrijkste beperking vormden voor het bereiken van het theoretisch haalbare oplossend vermogen. De enige remedie tegen zulke storingen leek het plaatsen van een telescoop in de

ruimte, met alle praktische bezwaren van dien. Adaptieve optiek heeft het echter mogelijk gemaakt de invloed van atmosferische storingen voor een belangrijk deel te compenseren. Zo kunnen astronomische waarnemingen aan het aardoppervlak bijna even perfect worden als die verricht met een buitenaardse telescoop.

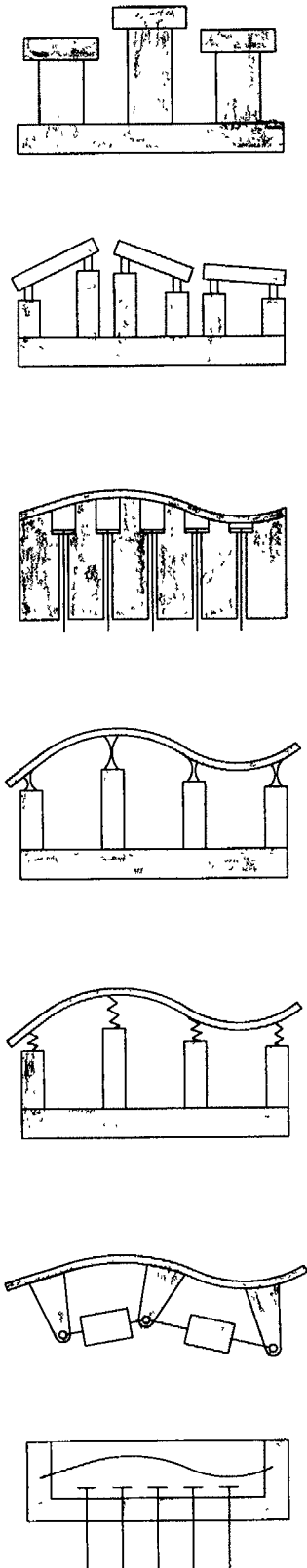
Adaptieve versus actieve optiek

Adaptieve optiek berust op het tijdsgetrouw ("in real time") corrigeren van fase-afwijkingen in het golffront: het systeem voegt een zodanige correctie toe dat de golffrontafwijking nagenoeg wordt opgeheven.

Adaptieve optiek wordt wel eens verward met "actieve optiek". In feite is actieve optiek een bijzondere vorm van adaptieve optiek. Bij actieve optiek worden alleen de afwijkingen binnen het optische systeem zelf gecorrigeerd, zoals vormveranderingen die veroorzaakt worden door zwaartekracht, temperatuurveranderingen en windkrachten. Bij adaptieve optiek worden de afwijkingen die ontstaan in de gehele lichtweg – niet alleen in de telescoop maar ook daarbuiten in de atmosfeer – gecorrigeerd.

Theoretische achtergronden

Het theoretische oplossend vermogen van een spiegeltelescoop is gedefinieerd als de ruimtehoek die behoort bij de straal van de eerste donkere ring van het diffractiebeeld (Airy-patroon) van een ster: $\alpha = 1,22 \lambda/D$, waarin λ de golflengte van het licht en D de diameter van de opening van de telescoop is. Dat komt neer op een theoretische ruimtelijke resolutie van enkele honderdsten van een boogseconde, overeenkomend met de hoek die een object met een diameter van 0,1 mm op een afstand van één kilometer inneemt. (Ter vergelijking: de volle maan omspant aan de hemel een ruimtehoek van 1800 boogseconden.)



Figuur 1. Voorbeelden van deformeerbare spiegels: gesegmenteerde spiegels, dunne buigende spiegels en een spiegel die door elektrostatische krachten wordt vervormd.

In de praktijk van de waarnemingscondities aan het aardoppervlak kan de uitsluitend door buiging begrensde resolutie niet worden bereikt, omdat er atmosferische turbulenties optreden. De verstoring van de waarnemingscondities is een gevolg van de temperatuurafhankelijkheid van de brekingsindex. Zelfs bij de beste omstandigheden op de meest ideale plaatsen op aarde worden resoluties bereikt die niet hoger zijn dan 0,5 tot 1 boogseconde, omdat het theoretische Airy-diffractiepatroon overgaat in een veel breder gespreid profiel volgens een Gausse kromme.

De atmosferische verstoringen van het golffront dat een astronomische spiegeltelescoop binnenkomt, kunnen worden beschreven als $\phi(r,t) - iA(r,t)$. Het reële deel $\phi(r,t)$ representeert de faseafwijking van het golffront. De desbetreffende invloed op de afbeeldingskwaliteit wordt aangeduid met het Engelse woord "seeing". "Seeing" is door een kleine telescoop of een binoculair waar te nemen als het "dansen" van sterren. Het imaginaire deel $A(r,t)$ is een maat voor de variatie van de intensiteit langs het apertuuroppervlak en wordt "scintillatie" genoemd. Het laatstgenoemde effect uit zich door het twinkelen van sterren aan de nachtelijke hemel.

Een spiegel die van vorm verandert

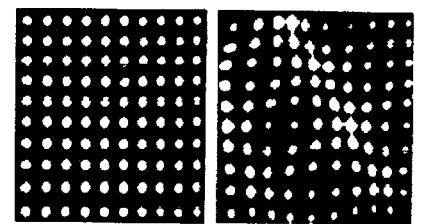
Bij adaptieve optiek wordt de faseafwijking in het gedeformeerde golffront op verschillende plaatsen gemeten en onmiddellijk gecorrigeerd. Daarvoor is in de lichtweg van de telescoop een optisch element opgenomen dat de fase van het golffront lokaal kan beïnvloeden. Dat element is doorgaans een samengestelde spiegel waarvan de verschillende delen individueel van vorm kunnen veranderen. Figuur 1 laat daarvoor verschillende constructieve oplossingen zien. De verandering van het golffront die door een element van de spiegel plaatselijk teweeg wordt gebracht, is juist tegengesteld aan de faseafwijking die elders in het systeem is gemeten. Daardoor ontstaat er een teruggekoppeld regelsysteem.

Het corrigeren van de scintillatie – de imaginaire term van bovengenoemde formule – wordt op het ogenblik meest-

al achterwege gelaten, omdat dat absorberende elementen in de lichtweg zou vereisen, die plaatselijk de energie van de lichtbundel verminderen. Dat zou leiden tot lichtverliezen die bij astronomische toepassingen beslist ongewenst zijn.

De golffrontsensor

Het is niet mogelijk rechtstreeks de fase van een optisch golffront te meten, daar daarvoor geen detectoren bekend zijn. Daarom maakt men gebruik van detectoren die plaatselijk de hellingshoek van het gedeformeerde golffront meten. De methode is een modificatie van de zogenaamde Hartmann-test voor telescoopspiegels. Daarbij wordt het spiegeloppervlak afgedekt door een scherm met gaten in een regelmatig patroon. Indien de spiegel perfect van vorm is, laat een fotografische plaat die op enige afstand van het focus loodrecht op de optische as wordt geplaatst, bij het waarnemen van een ster een regelmatig patroon zien. Afwijkingen manifesteren zich als aberraties in het patroon (zie figuur 2) en kunnen zo worden toegerekend aan een bepaald deel van het spiegeloppervlak.

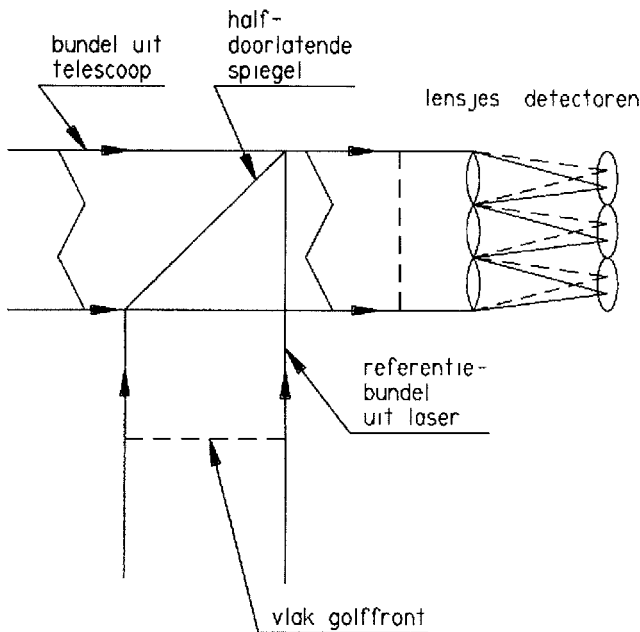


Figuur 2. Resultaten van de Hartmann-test voor het meten van de geometrie van telescoopspiegels. Links bij een ideale vorm, rechts bij een vormafwijking.

De golffrontsensor die bij adaptieve optiek wordt toegepast, is de van de Hartmann-test afgeleide Shack-Hartmann-sensor, zie figuur 3. Het golffront wordt daarbij verdeeld in een aantal gebieden. Het van ieder gebied afkomstige licht wordt gefocuseerd door een bijbehorend miniatuurlensje. Een referentiebundel die gegenereerd wordt door een laser en derhalve nagenoeg geen golffrontafwijkingen vertoont, wordt via een halfdoorlatende spiegel eveneens op de verzameling lensjes geworpen. Ieder lensje levert daarom een

Adaptieve optiek

Mechatronica



Figuur 3. Schematische tekening van een Shack-Hartmann-sensor. Links een gedefor-meerd golffront, onder een ideaal golffront, zoals dat wordt gegenereerd door een referentielaser. Een verzameling lensjes (rechts) focuseert beide bundels op een verzameling detectoren. De afstand van de twee puntvormige afbeeldingen achter ieder lensje is een maat voor de plaatselijke helling van het gedefor-meerde golffront.

tweetal puntvormige beelden: een beeld in het centrum afkomstig van de laser en een beeld ernaast afkomstig van het te detecteren deel van het golffront. De afstand van beide beelden is een maat voor de plaatselijke hellingshoek van het golffront. Halfgeleiderdetectoren meten achter ieder lensje de afstand van de twee beelden. Met behulp van alle meetresultaten kunnen de afwijkingen van het golffront in kaart worden gebracht.

De regelende computer

De meetresultaten van de Shack-Hartmann-sensor worden door de besturingscomputer omgerekend in de momentane vorm van het golffront. Vervolgens wordt daaruit de grootte van het elektrische signaal berekend dat aan ieder element van de vervormbare spiegel moet worden toegevoerd om de juiste compensatie te verkrijgen. Dat alles moet met een zodanige snelheid – in

dit geval 100 Hz – gebeuren dat het regelsysteem zich “quasi-real-time” gedraagt.

Dat voor deze rekenoperaties een geweldige capaciteit is vereist, wordt duidelijk als men bedenkt dat het 100 keer per seconde uitlezen van de afzonderlijke detectoren van de Shack-Hartmann-sensor een serieel proces is. Het berekenen van de vorm van het golffront en daaruit de buigingsvorm van de spiegel en de noodzakelijke verplaatsingen van de actuators is daartegen een gecompliceerd matrixproces. De reken capaciteit en het opstellen van geschikte rekenalgoritmen vormen op het ogenblik nog de “bottle-necks” van adaptieve optiek.

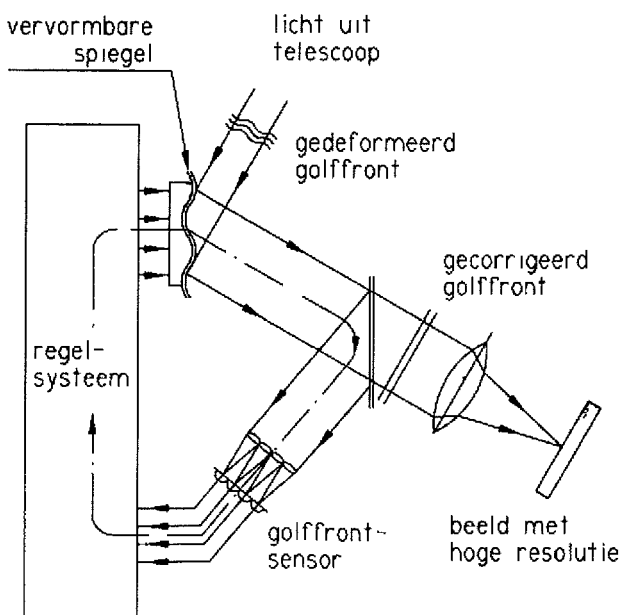
Figuur 4 laat schematisch zien hoe de vervormbare spiegel, de golffrontsensor en het regelsysteem samenwerken en zo een telescoopbeeld opleveren dat een hogere resolutie vertoont dan dat van een niet-adaptieve telescoop.

Praktische resultaten

De ESO heeft eind van de jaren tachtig in samenwerking met het Observatoire de Paris (ONERA) en het Franse bedrijf Laserdot een prototype gebouwd van een astronomische telescoop met een vervormbare spiegel met negentien piezo-elektrische actuators die ieder plaatselijk de spiegel over $\pm 7,5 \mu\text{m}$ kunnen vervormen. Het bijbehorende adaptieve optische systeem heeft een Shack-Hartmann-sensor met een patroon van 5×5 miniatuurlensjes voor het meten van de lokale hellingshoeken van het golffront.

In september 1989 is dit systeem gecombineerd met de 1,52m-telescoop van het observatorium in de Haute Provence. Daarmee zijn de eerste astronomische beelden verkregen met correctie van de atmosferische storing door middel van adaptieve optiek. Daarbij werd gewerkt in het infrarode gebied bij een golflengte van $2,2 \mu\text{m}$.

In april 1990 is het regelsysteem overgebracht naar de 3,6m-telescoop van de ESO op de berg La Silla in Chili. Het systeem corrigeert atmosferische storingen van 1 boogseconde voor golf-



Figuur 4. Principe van adaptieve optiek. De door de golffrontsensor (onder) gemeten lokale afwijkingen van het golffront worden via een terugkoppellus (links) doorgegeven aan de vervormbare spiegel (boven). Het resultaat is dat de afwijkingen van het golffront worden gecorrigeerd, zodat de lens (rechts) een perfecte afbeelding maakt, waarvan de resolutie in principe alleen door buiging wordt begrensd.

lengten van 3,5 μm en groter, en dat voor astronomische objecten van grootte 11,5 of grotere helderheid. Zwakkere objecten kunnen worden waargenomen als er zich een object met grotere helderheid in de buurt bevindt. Figuur 5 toont fraaie opnamen van de dubbelster HR 6658 bij een golflengte van 3,5 μm , zonder en met correctie van de atmosferische storingen. Zonder correctie zijn de twee sterren niet separaat waarneembaar

Het prototype in Chili dient als voorstudie-object voor de ontwikkeling van de VLT (Very Large Telescope) door de ESO, die zal bestaan uit vier gekoppelde telescopen met ieder een opening van 8 m. Iedere telescoop zal een adaptieve optiek hebben met een vervormbare spiegel met 250 actuatoren. De eerste 8m-telescoop zal circa 1996 worden opgesteld, waarna de andere succesievelijk zullen volgen.

Het waarnemen van de zon

Interessant is ook de toepassing van adaptieve optiek in een coronagraaf [3]. Met een dergelijk instrument is het mogelijk de zonnecorona waar te nemen zonder dat er een zonsverduistering nodig is, omdat het zonlicht afkomstig van de eigenlijke zonnenschijf via een centrale spiegel buiten het instrument wordt gebracht. De eerste coronagraaf werd in 1934 gebouwd door B. Lyot voor zonnewaarnemingen. Sindsdien wordt het instrument ook gebruikt om lichtzwakke objecten rondom heldere sterren waar te nemen.

Het Center for Astrophysical Sciences van de John Hopkins universiteit in Baltimore in de Verenigde Staten heeft een coronagraaf met adaptieve optiek gebouwd om verschijnselen rondom sterren waar te nemen zonder resolutiebegrenzende verstoringen door de aardatmosfeer. De huidige opstelling is nog eenvoudig uitgerust met een CCD-sensor (CCD: Charge-Coupled Device) met vier kwadranten en een piëzo-elektrisch bediende, kantelbare spiegel. Op de CCD-sensor wordt de ster afgebeeld waarvan men de omgeving wenst te onderzoeken. Kanteling van het golffront door luchturbulenties manifesteert zich door verplaatsing van de sterafbeelding op de sensor, waarna de stand van de spiegel wordt gecorrigeerd en de afbeelding weer naar het hart van de sensor terugkeert.

Het is de bedoeling de kantelbare spiegel in een later stadium te vervangen door een vervormbare spiegel. Maar ook in deze eenvoudige uitvoering van de adaptieve optiek is er al een aanzienlijke verbetering bereikt van de ruimtelijke resolutie en het contrast van de coronografische beelden.

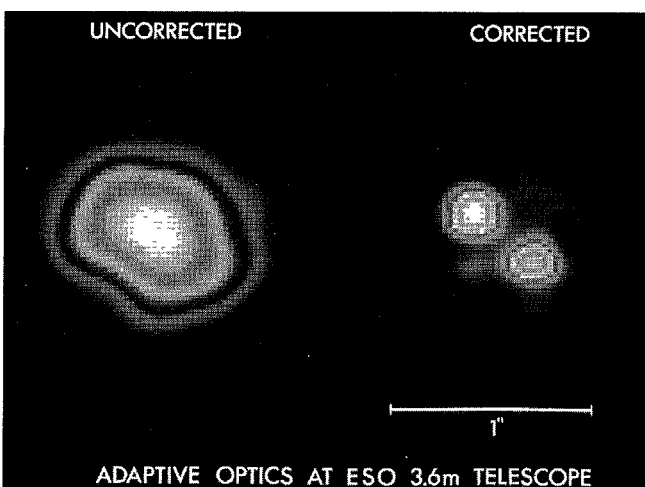
Een andere toepassing van adaptieve optiek bij het waarnemen van de zon is die in de 76cm-telescoop van Sacramento Peak [4]. Het gaat daarbij om het bestuderen van de invloed van het magnetisch veld van de zon op de zonneatmosfeer, met name op zonnevlekken. Er is gebruik gemaakt van een uit negentien segmenten opgebouwde vervormbare spiegel in honingraatvorm.

Ieder segment kan door middel van een drietal piëzo-elektrische actuatoren zowel worden gekanteld als loodrecht op zijn eigen vlak worden verplaatst. De bewegingen van de actuatoren worden gestuurd door een regelsysteem met als input de meting van de afwijking van het golffront door middel van een golffrontsensor, eveneens in honingraatvorm en met negentien detectoren.

Ten slotte

Telescopen met adaptieve optiek vormen een kostenbesparend alternatief voor telescopen in de ruimte. Begrenzungen liggen bij de nauwkeurigheid van de meting van het gestoorde golffront en de tijdvertraging tussen meting en correctie. Bovendien blijkt het moeilijk bij lichtzwakke objecten een geschikte referentiestar in de buurt te vinden. Desondanks biedt adaptieve optiek met nog meer sensorelementen en nog grotere reken capaciteit van de regelende computer uitzicht op astronomische waarnemingen waarin de effecten van de aardatmosfeer nagenoeg geheel zijn geëlimineerd.

Vooralsnog lijkt de toepassing van adaptieve optiek beperkt te blijven tot astronomische instrumenten. Begrijpelijk, want in zulke instrumenten wordt gewerkt met spiegels van aanzienlijke afmetingen. Maar misschien leidt de miniaturisatie die in de elektronica zulke verstrekkende gevolgen heeft gehad, in de optica nog eens tot microscopen waarin thermische effecten en trillingen worden gecompenseerd door adaptieve optiek. Daaraan hebben noch Antonie van Leeuwenhoek noch Ernst Abbe in hun stoutste dromen durven denken.



Figuur 5. Resultaten van adaptieve optiek bij de 3,6m-telescoop van ESO in Chili. Zonder adaptieve optiek (links) vloeien de twee beelden van de dubbelster HR 6658 samen. Met adaptieve optiek worden ze gescheiden waargenomen. De maataanduiding behoort bij een ruimtethek van slechts één boogseconde.

Literatuur

- [1] J H Hardy, Proc IEEE 66, 651 (1978)
- [2] F Merkle, Adaptive Optik, Physik in unserer Zeit 22, 260-266 (1991)
- [3] D A Golimowski, M Clampin, S T Durrance en R H Barkhouser, High-resolution ground-based coronagraphy using image-motion compensation, Applied Optics 31, 4405-4415 (1992)
- [4] D S Acton en R C Smithson, Solar imaging with a segmented adaptive mirror, Applied Optics 31, 3161-3169 (1992)