

# Helder zicht in turbulente media door integratie van optica, mechanica en regeltechniek

**Wanneer licht zich door een turbulent medium voortplant, produceert zelfs de meest nauwkeurige optische meetapparatuur onscherpe afbeeldingen. Dit effect kan worden gecompenseerd door een combinatie van een golffrontsensor en een deformeerbare spiegel. De laatste ontwikkelingen in hardware en software hebben deze technologie toegankelijk gemaakt, wat ons zowel op extreem kleine als grote schaal gedetailleerde beelden kan bieden.** O. Soloviev, G. Vdovin en M. Verhaegen

404

Vaak zien we de dingen niet zoals ze in het echt zijn. Licht in een uniform medium plant zich rechtlijnig voort. De meeste optische beeldvormingssystemen zijn ontwikkeld om onder deze conditie in het beste geval diffractielimiteerde beelden te maken. Desondanks wordt deze limiet in het echt zelden behaald. De degradatie van de beeldkwaliteit door een niet-uniforme atmosfeer

waarin de beelden worden opgenomen, was reeds bekend bij de oude Grieken en bij Newton. Zo vermeldt Plutarchus dat “De herfstlucht, wanneer de bomen hun bladeren laten vallen, zijnde oneven en verstoord, rimpelt en verwart de afbeeldingen” [1], en Newton duidde de beweging van de luchtmasa boven een telescoop aan als “the perpetual tremor” [2]. Terwijl Plutarchus het effect van verstoorde lucht enkel zag als een reden dat onze beelden in de herfst minder betrouwbaar waren, was Newton ervan overtuigd dat deze trillende luchtbeweging een natuurlijke begrenzing stelde aan de haalbare resolutie van een telescoop en ervoor zorgde dat een ster breder en minder scherp wordt afgebeeld dan ze in werkelijkheid is. Een oplossing om dit verlies aan resolutie tegen te gaan zou volgens Newton niet mogelijk zijn omdat

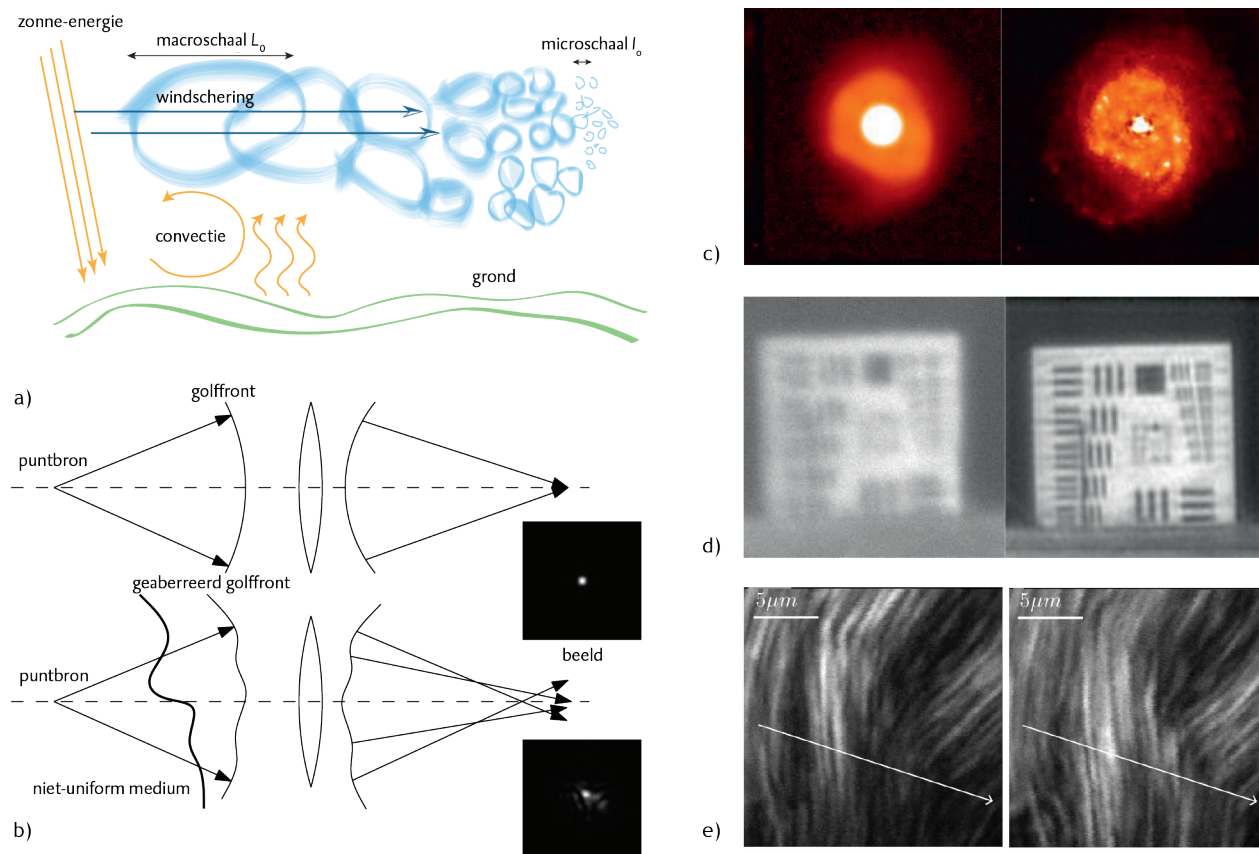
het inherent afhankelijk is van de atmosferische condities. Het trillen van de atmosfeer, zoals turbulentie wordt genoemd, is in de twintigste eeuw op wiskundige wijze beschreven door de Russische onderzoeker Kolmogorov. Turbulentie wordt veroorzaakt door temperatuurgradiënten in de atmosfeer. In figuur 1 is weergegeven dat warmere lucht als gevolg van zijn

Oleg Soloviev studeerde Mathematics and Applied Mathematics in Moscow en promoveerde in 2006 aan de TU Delft. Sindsdien is Soloviev senior associate bij Flexible Optical BV en sinds 2015 parttime docent/onderzoeker bij DCSC, TU Delft.



Gleb Vdovin studeerde Optical Engineering in Sint Petersburg en promoveerde in 1996 aan de TU Delft. Vdovin is de oprichter van OKO Technologies, een bedrijf dat adaptieve optische componenten ontwikkelt en produceert. Sinds 2014 is hij (parttime) professor bij DCSC, TU Delft.





**Figuur 1** De atmosferische turbulentie en haar invloed op de beeldkwaliteit. a) Het ontstaan van atmosferische turbulentie: bellen warme lucht stijgen op vanaf de grond en de daardoor gevormde wervels worden door de wind in steeds kleinere wervels opgesplitst. b) Het effect van golffrontvervalsingen op de beeldkwaliteit: terwijl een onverstoord sferisch golffront van een puntbron door een lens gefocussed wordt in een scherp Airy-patroon (boven), zorgt het verstoorte golffront voor een uitgesmeerde spot (onder). c-e) Door de verstoring verslechterd (linker kolom) en met adaptieve optica gecorrigeerd (rechter kolom) beeld uit de astronomie, beeldvorming door een turbulente luchtlaag en microscopie. Beeld c) overgenomen van de Canadese-Franse-Hawaii Telescoop met een diameter van 3,6 m.

kleinere brekingsindex ten opzicht van koude lucht leidt tot een stochastische en dynamische verstoring van het golffront. De lichtstralen die zich orthogonaal op het golffront voortplanten lopen niet meer parallel of radiaal. Het resultaat van een verstoord golffront is dat bij het gebruik van een korte belichtingstijd een puntbron afgebeeld wordt op een uitgesmeerd punt. De vorm van dit uitgesmeerde punt wordt bepaald door de stochastiek van de turbulentie. Een langere belichtingstijd zal de uitsmering van de puntbron alleen maar vergroten. Gelijkaardige verslechtering van de beeldresolutie wordt veroorzaakt door turbulentie van de atmosfeer in andere optische toepassingen. Voorbeelden zijn draadloze optische communicatie of horizontale beeldvorming (beeldvorming over een lang pad door de aardatmosfeer). In medische toepassingen, zoals microscopie en oogheelkunde, in vloeistofdynamica en in vele andere gevallen zorgt het onderzochte medium voor een niet-uniforme brekingsindex en dus

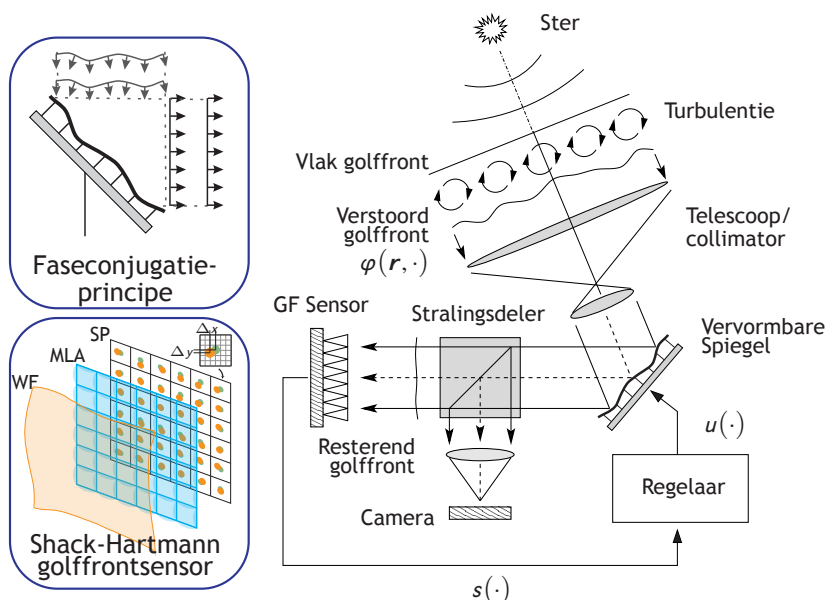
ook voor een verslechtering van de beeldkwaliteit. Gelukkig kan worden vastgesteld dat er twee en een halve eeuw na Newtons opmerking een andere oplossing dan die van hem – “a more serene and quiet Air” – is gevonden die de “perpetual Tremor” compenseert. Deze oplossing wordt adaptieve optica (AO) genoemd.

### Adaptieve optica

Het principe van adaptieve optica is dat we een statische golffrontvervalsing kunnen compenseren met een spiegel die dezelfde vorm heeft als het golffront maar de helft van zijn amplitude (zie figuur 2). Om dit principe toe te passen maken we gebruik van een sensor om de golffrontvervalsing te kunnen bepalen of te schatten en een deformeerbare spiegel die snel genoeg de gewenste vorm kan aannemen. De verbinding tussen sensor en actuator (spiegel) is een regelaar die uit de metingen de nodige aansturing van de spiegel berekent om het golffront weer vlak te krijgen. Het is het rekenalgoritme dat een adaptief ap-

tisch systeem slim maakt. Het zogenaamde principe van faseconjugatie (compensatie van de fase) is door de onderzoekers Babcock uit de Verenigde Staten en Linnik uit de Sovjetunie in het midden van de twintigste eeuw onafhankelijk van elkaar voorgesteld. De praktische realisatie van het idee werd enkel pas mogelijk in de jaren zeventig van de vorige eeuw dankzij de laser, de digitale computer en geavanceerde elektronica.

De kwaliteit van de afbeeldingen van een AO-systeem wordt bepaald door de kwaliteit van de integratie van de drie hoofdcomponenten van een AO-systeem: (1) de deformeerbare spiegel, (2) de golffrontsensor en (3) het regeltechnische terugkoppelingsalgoritme dat (1) en (2) met elkaar verbindt. Tot voor kort bestond de evolutie van een AO-systeem met name uit de ontwikkeling van de hardwarecomponenten (1) en (2) en de regeltechniek was in essentie beperkt tot een statische matrixvermenigvuldiging herleid. We zullen nu kort de ontwikkeling op deze drie gebieden bespreken.



**Figuur 2** Schematische voorstelling van een AO gesloten lussysteem met zijn voornaamste componenten. Het onverstoord golffront dat door de ster wordt uitgezonden, wordt verstoord door de atmosfeer van de aarde. De telescoop leidt het licht, voordat het op de camera wordt afgebeeld, naar een deformeerbare spiegel. Een deel van het licht wordt door een stralingsdeler naar een golffrontsensor geleid, die deze informatie vervolgens naar de regelaar stuurt. De regelaar berekent de aansturing van de deformeerbare spiegel die vervolgens zijn vorm aanpast om het golffront weer zo goed mogelijk vlak te maken. Inzetten: faseconjugatieprincipe – een deformeerbare spiegel past zijn vorm zodanig aan dat het gereflecteerd golffront vlak is; de Shack-Hartmann golffrontsensor is een microlensrooster waarbij de verplaatsing ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) van de afgebeelde lichtpunten (SP) door elke lens een maat is voor de ruimtelijke gradiënt van het verstoord golffront (WF).

## Deformeerbare spiegels

Door de geheimhouding van de ontwikkeling van de AO-technologie tot 1990, bleef het aantal praktische realisaties van AO-systemen voornamelijk beperkt tot militaire toepassingen. Daardoor bleven de prijzen van deformeerbare spiegels zeer hoog, tot 1.000 dollar per actuator. Ook de integratie van de optica, mechanica en elektrische technologie in één instrument maakte AO zeer kostbaar. Een doorbraak in het betaalbaar maken van deformeerbare spiegels werd gerealiseerd in het elektronische instrumentatielaboratorium in Delft

van professor Middelhoek. Het werk van deze hoogleraar was gericht op het op een chip integreren van een sensor met een verwerkingseenheid [3]. Deze ontwikkelingen leidden tot de micro-optical-electro-mechanical systems (MOEMS)-technologie die gebruikmaakt van de werkwijze om geïntegreerde schakelingen op een chip te plaatsen. Promovendus Gleb Vdovin gebruikte de mogelijkheden van MOEMS om in 1994 de eerste micro-machined deformable mirror (MMDM) te fabriceren [4, 5]. Deze spiegel bestond uit een dun membraan dat bedekt was met een dun laagje weerkaatsend materiaal en uitgestrekt was over een structuur van elektrostatische actuatoren, zoals afgebeeld in figuur 3. Door een hoge spanning aan te leggen op een actuator kan dat membraan lokaal vervormd worden. De gezamenlijke aansturing van alle actuatoren resulteert in een benadering van de gewenste vorm van de spiegel. De nieuwe technologie leidde tot een meer dan tienvoudige daling van de prijs van deformeerbare spiegels met een potentieel van slechts enkele honderden dollars per deformeerbare spiegel en zorgde ervoor dat

de technologie ook interessant werd voor toepassingen buiten de astronomie of de defensie-industrie. Door de verdere technologische ontwikkelingen kunnen we stellen dat vandaag de dag deformeerbare spiegels standaard koopwaar geworden zijn in optische beeldvormingssystemen.

## Golffrontsensoren

Het golffront van verstoord licht is het oppervlak dat gevormd wordt door punten met een constante fase. Deze fase van licht is niet direct meetbaar. Golffrontsensoren werken op basis van het indirecte meetprincipe om uit intensiteitsmetingen het golffront te bepalen. Bijvoorbeeld, interferometrische methoden die vaak gebruikt worden in optische shop testing, vergelijken een verstoord golffront met een vlak of sferisch referentiegolffront. Toepassing bij het meten van golffrontvervormingen voor atmosferische turbulentie zijn moeilijk vanwege het ontbreken van een referentiegolffront, een lage lichtcoherentie en door de snelle verandering van het golffront. Deze problemen worden opgelost door de Shack-Hartmannsensor. Deze sensor is gebaseerd op een microlensrooster gecombineerd met een camera, zoals aangegeven in figuur 2. Deze sensor geeft een lineaire relatie tussen de metingen en de ruimtelijke afgeleide van het golffront, wat een snelle reconstructie mogelijk maakt. Opnieuw maakte de MOEMS-technologie het de onderzoekers mogelijk om van het EL lab [6] zeer nauwkeurige silicium sjablonen voor microlensroosters te fabriceren. De eerste compacte Shack-Hartmannsensor die deze microlensroosters gebruikte werd in 2004 gecommmercialiseerd door OKOTech [7].

## Belang van regeltechniek

De mogelijkheden van de sensor en actuator in een optisch systeem kunnen enkel dan ten volle benut worden als op slimme wijze gebruikgemaakt wordt van regeltechnische algoritmen. In het besproken AO-systeem bewerkt de regelaar de metingen van de golffrontsensor om de aansturing van de actuatoren van de deformeerbare spiegel te bepalen. De klassieke regeltechnische oplossing die op dit moment nog veelvuldig gebruikt wordt bestaat erin om de tijdsdynamica van de golffrontverstoring te

Michel Verhaegen is hoogleraar Systems and Control en verbonden aan de TU Delft sinds 1988. Zijn interesse gaat uit naar de ontwikkeling van nieuwe rekenmethoden voor de mathematische modelvorming op basis van meetgegevens, met toepassingen in de ontwikkeling van slimme optische systemen. Hij is op dit moment bursaal van de Europese Research Council.



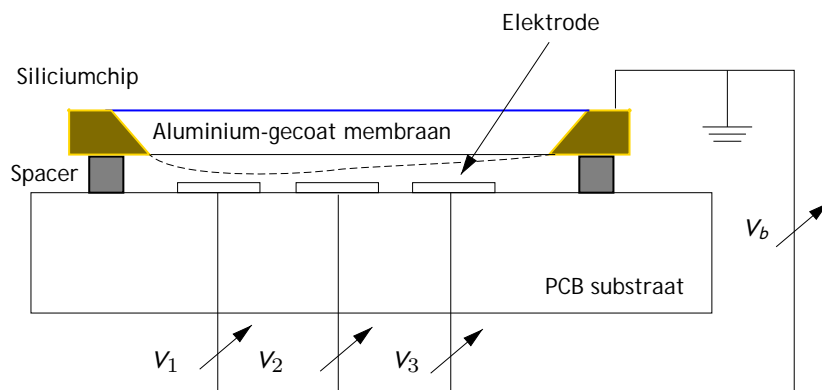
M.Verhaegen@tudelft.nl

verwaarlozen. Hierdoor wordt de regeltechnische bewerking op de golffrontsensordata teruggebracht tot een matrix-vectorvermenigvuldiging in combinatie met een scalair dynamisch systeem bestaande uit een proportionele integrale regelaar, de zogenaamde matrix-vectormultiplicatie (MVM) methode [8]. Omdat de golffrontverstoringen, zoals veroorzaakt door atmosferische turbulentie, ook tijdsafhankelijke dynamica vertonen, hebben onderzoekers in Delft technieken ontwikkeld om deze tijdsafhankelijke dynamica te bepalen uit metingen en dit model te integreren in een dynamische regelaar [9].

## Toekomst

Sterke turbulentie of het vormen van beelden over een lange afstand door de atmosfeer vormen nieuwe uitdagingen voor AO. Deze condities leiden tot golffrontverstoringen met een hoge ruimte- en tijdrequentie die vaak ver boven de correctiemogelijkheden uitgaan van elke bestaande deformeerbare spiegel. Recent is door Delftse onderzoekers een combinatie ontwikkeld [10] van het corrigeren van de lagere ruimtelijke frequenties in de fase van het golffront met een numerieke nabewerkingscorrectie van de hogere-orde componenten in de beelden. In dit onderzoek wordt de pupil van de afbeeldingslens opgesplitst in verschillende segmenten. De grootte van deze segmenten wordt bepaald door de karakteristieke maat van de turbulentie. Na de correctie van de lagere-orde componenten van de golffrontverstoring door een vervormbare spiegel worden de opgesplitste beelden van hetzelfde object gebruikt om een schatting te maken van het totale originele object. Deze benadering leidt tot een verbetering van de resolutie en scherpte van het beeld (zie figuur 1d gemaakt met deze methode), maar bovendien wordt de complexiteit van het AO-systeem verminderd doordat een deformeerbare spiegel met minder actuatoren gebruikt kan worden.

Naast de tijdsdynamica vormt de ontwikkeling van nieuwe niet-lineaire schattingsmethoden die het golffront bepalen uit sensoren in het focusvlak een belangrijke uitdaging. In het focale vlak worden de beelden gemaakt en daardoor wordt het mogelijk dat de klassieke lineaire golffrontsensoren,



**Figuur 3** Schematische representatie van een micromachined vervormbare spiegel. Het overgrote deel van de silicium chip wordt weggeëtst. Daardoor blijft een zeer dun siliciumnitride membraan achter in het midden. De toplaag van aluminium maakt het membraan lichtterugkaatsend en geleidbaar. Door een spanning op de elektroden onder de chip aan te brengen, wordt het geaarde membraan aangetrokken door de elektrostatische kracht. De gestippelde lijn toont de deformatie van het membraan.

zoals een Shack-Hartmannsensor, die zich in een apart optisch pad bevindt waarbij fotonen uit het object worden afgesplitst, overbodig worden. Dit leidt tot een betere signaal-ruisverhouding in het beeld, waardoor met name zwakkere lichtbronnen, die vaak het interessantst zijn, beter zichtbaar gemaakt kunnen worden. Dit is bijvoorbeeld cruciaal voor de microscopie om enige micrometers diep in het weefsel te kunnen kijken [11] (zie figuur 1e gemaakt met deze methode).

Het meenemen van de tijdsafhankelijke dynamica van de gehele optische beeldvormingsmodaliteit in de ontwikkeling van AO zal het mogelijk maken om nieuwe beeldvormingssystemen met actieve of adaptieve optica te produceren waarin een betere balans bereikt kan worden tussen kostprijs en complexiteit van het ontwerp enerzijds en prestatie in de vorm van beeldresolutie anderzijds. Uitdaging op zowel de onafhankelijke componenten van een AO-systeem als de integratie van deze systemen komen dan aan de orde. En hoewel het oplossen van deze uitdagingen ons niet zal helpen onze herfstdromen betrouwbaarder te maken, kunnen we er wel onze dromen over helder zicht op verre sterrenstelsels en microbiologische processen mee waarmaken.

## Referenties

- 1 Plutarchus, *Tafelgespreken*, Boek VIII, Vraag X: Waarom vertrouwen we de herfstdromen niet?
- 2 Sir Isaac Newton, *Opticks*, PROP. VIII. Prob. II., (1730).
- 3 S. Middelhoek en A. Hoogerwerf, *Smart*

*sensors: when and where?*, *Sensors and Actuators* 8, 39-48 (1985).

- 4 G. Vdovin en L. Sarro, *Flexible reflecting membranes micromachined in silicon*, *Semiconductor Science and Technology* 9, 1570-1572 (1994).
- 5 G. Vdovin, *Spatial light modulator based on the control of the wavefront curvature*, *Optics Communications* 115, 170-178 (1995).
- 6 D.W. de Lima Monteiro et al., *Single-mask micro-fabrication of aspherical optics using KOH anisotropic etching of Si.*, *Optics Express* 11, 2244-52 (2003).
- 7 www.okotech.com.
- 8 M. Verhaegen en V. Verdult, *Filtering and System Identification*, Cambridge University Press, Cambridge (2007).
- 9 K. Hinnen, *Data-Driven Optimal Control for Adaptive Optics PhD thesis*, TU Delft, Delft Center for Systems and Control (2007).
- 10 M. Loktev, O. Soloviev, S. Savenko en G. Vdovin, *Speckle imaging through turbulent atmosphere based on adaptable pupil segmentation*, *Optics letters* 36, 2656-2658 (2011).
- 11 J. Antonello et al., *Optimization-based wavefront sensorless adaptive optics for multiphoton microscopy*, *J. Opt. Soc. Am. A* 31, 1337-1347 (2014).