



Ausgefunktelt!

Grundlagen der adaptiven Optik

Luftbewegungen in der Erdatmosphäre stören erdgebundene Beobachtungen und machen das Bild unscharf. Doch Astronomen haben einen genialen Trick, mit dem sie das Problem beseitigen: adaptive Optik. Alle modernen Großteleskope nutzen diese Technik, weil sie die Auflösung verbessert und an das theoretisch Machbare treibt.

IN KÜRZE

- Das Licht von Himmelsobjekten wird in der Erdatmosphäre durch turbulente Luftbewegungen gestört. Unter diesem als Seeing bekannten Phänomen leidet die Qualität astronomischer Aufnahmen.
- Die adaptive Optik analysiert die Wellenfronten des auf der Erde ankommenden Lichts und gleicht die Störungen mittels verformbarer Spiegel aus. Dadurch werden die Bilder deutlich schärfer.
- Heutzutage ist diese Korrekturtechnik ein wesentlicher Bestandteil moderner Großteleskope und verhilft ihnen zu einer Auflösung nahe am Beugungslimit. Unterdessen profitieren auch andere Forschungsbereiche von dieser Methode.



ESO/P. Weibacher (AIP) (<https://www.eso.org/public/germany/images/eso1824b/>) / CC BY 4.0
(creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)



Neptun ohne adaptive Optik



Neptun mit adaptiver Optik

ESO-Astronomen schießen mit vier Lasern am Very Large Telescope in Chile einen Lichtpunkt in die Atmosphäre, mit dem sie die Teleskopschärfe einstellen (großes Bild). Der Gasplanet Neptun zeigt mit dem Korrekturverfahren viel mehr Details (oben).

Die Sterne funkeln. Diesem Phänomen, das Lyriker lieben, begegnen wir häufig bei der Beobachtung des klaren Sternhimmels. Es hängt mit der Lufthülle der Erde zusammen und stört sowohl Hobby-, als auch Profiastronomen.

Das Sternfunkeln beschäftigte bereits den Gelehrten Isaac Newton (1643–1727). Der berühmte Naturforscher formuliert nicht nur die Gesetze der Schwerkraft, sondern machte sich auch über Probleme der praktischen Himmelsbeobachtung Gedanken. Mit dem Funkeln befasste er sich nicht, weil er gleichfalls den romantischen Aspekt schätzte, sondern weil es seine astronomischen Beobachtungen beeinträchtigte. In seinem Buch »Opticks« aus dem Jahr 1704 beschreibt er die Ursache dafür auf korrekte Art und Weise: »Die Luft, durch die wir nach den Sternen blicken, ist in einem beständigen Zittern; was sich auch an der zitternden Bewegung der Schatten hoher Türme beobachten lässt – oder durch das Funkeln der Sterne.«

Astrofotografen wissen, dass durch diese Luftunruhe (englisch: Seeing) die Sterne scheinbar hin und her tanzen und auf den Aufnahmen zu breiten Scheibchen verschmieren. Dieser Effekt beschränkt die Winkelauflösung von astronomischen Instrumenten, selbst bei modernen Großteleskopen, auf etwas weniger als eine halbe Bogensekunde, was dem theoretischen Auflösungsvermögen eines 25-Zentimeter-Teleskops entspricht.

Wabernde Atmosphäre als Störenfried

Doch was genau passiert mit dem Sternenlicht in der Atmosphäre? Licht ändert an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex seine Ausbreitungsrichtung und Geschwindigkeit. Im Vakuum ist Licht am schnellsten. Seine Geschwindigkeit nimmt in Medien wie Luft oder Wasser ab und wird genauer als Phasengeschwindigkeit bezeichnet.

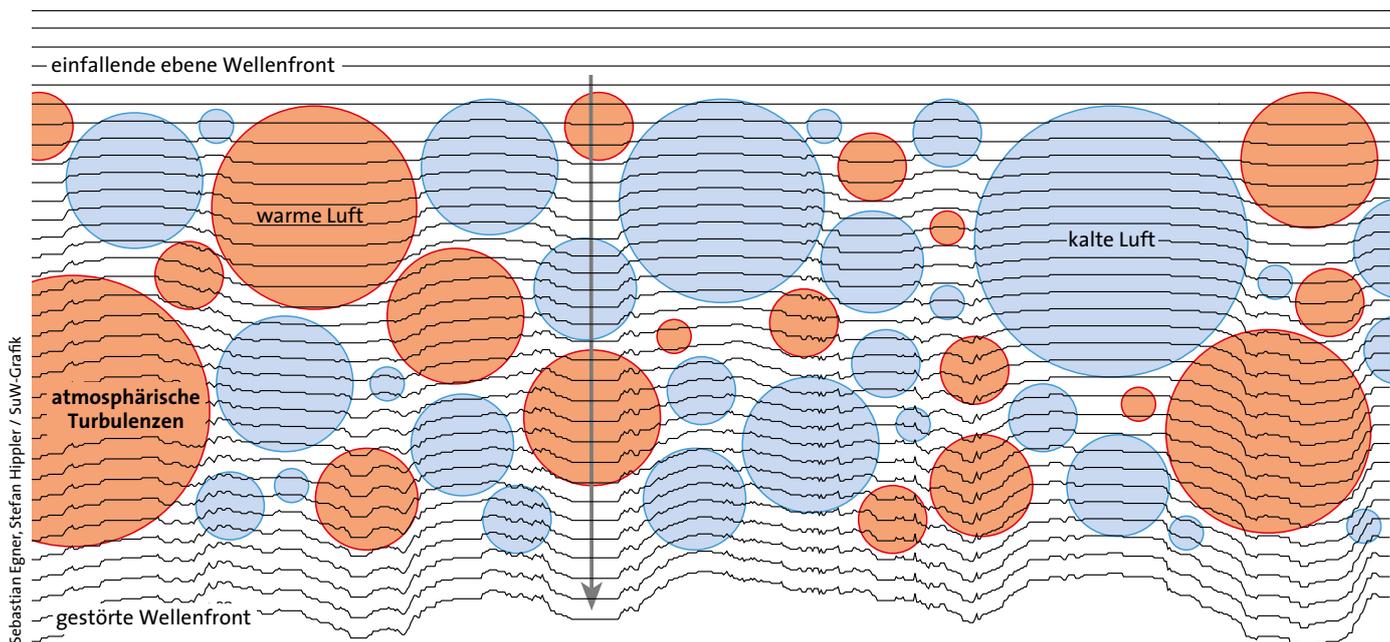
Der Brechungsindex ist eine optische Materialeigenschaft und gibt an, um welchen Faktor die Wellenlänge und die Phasengeschwindigkeit des Lichts kleiner sind als im Vakuum. In der Erdatmosphäre ändert sich diese Eigenschaft sowohl zeitlich als auch örtlich. Denn es gibt Winde und Konvektionsströmungen, bei denen warme Luftschichten aufsteigen und kalte herabfallen (siehe Grafik unten). Daneben variiert auch der Wasseranteil in der Luft. Ganz offensichtlich schwanken also die Temperatur und der Feuchtigkeitsgehalt. Und da die optische Dichte der Luft von diesen Parametern abhängt, variiert sie sehr schnell – üblicherweise im Bereich von einigen Millisekunden. Licht wird also in der Atmosphäre durch schnell umherwandernde »Luftzellen« ständig minimal abgelenkt, wodurch der flimmernde Eindruck der Sterne entsteht. Eine gewisse Analogie stellen Schlieren da, die im Schwimmbad auf dem Boden des Beckens hin und her tanzen.

Physikalisch präziser lässt sich dieser Effekt mit Hilfe der Wellenoptik be-

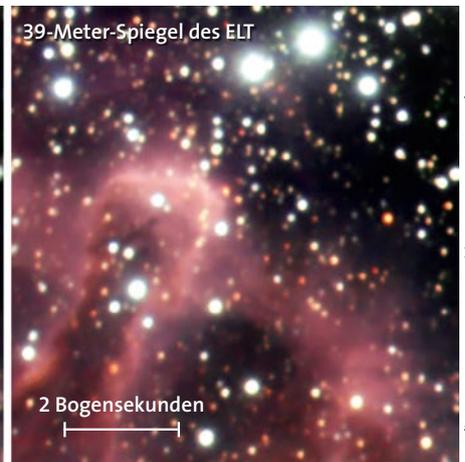
schreiben. Statt einzelnen Lichtstrahlen betrachtet man in diesem Fall Lichtwellen: Auf Grund der großen Entfernungen von Sternen ist die ungestörte Wellenfront von deren Licht nahezu eben, wenn sie auf die Erdatmosphäre trifft (siehe SuW 10/2004, S. 32). Durchlaufen die Wellenfronten schließlich die Atmosphäre, ändern sie an den sich bewegenden Luftzellen unterschiedlicher Temperatur ihre Phasengeschwindigkeit und Richtung. Am Erdboden ist so aus der ehemals glatten Wellenfront ein recht zerknitterter Wellenzug geworden, dessen Form an eine Landschaft mit Bergen und Tälern erinnert.

Auf astronomischen Aufnahmen macht sich das durch zweierlei Effekte bemerkbar: Zum einen teilt sich die Sternabbildung in viele kleine Bilder auf, so genannte Speckles. Sie entstehen durch leicht unterschiedliche Wege der Lichtstrahlen durch die turbulente Atmosphäre. Auf dem Teleskopspiegel sieht man hellere und dunklere Bereiche, die einen Abstand im Zentimeterbereich haben und in einem kreisförmigen Gebiet herumtanzen. Sie entstehen durch Fokussieren und

Atmosphärische Turbulenzen gehen einher mit Temperatur- und Dichteunterschieden in der Luft. Die sich beständig verändernden Turbulenzzellen verformen Lichtwellen, die von oben in die Atmosphäre einfallen. Die stärksten Effekte treten dort auf, wo die Temperaturunterschiede am größten sind.



Sebastian Egner, Stefan Hippler / SuW-Grafik



ESO (<https://www.eso.org/public/images/eso9946a/>) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode) / Stefan Hippler

Defokussieren der Lichtstrahlen. Das Muster ändert sich in Bruchteilen von Sekunden. Experten nennen diese Variation der Helligkeit Szintillation. Zum anderen wandert der gesamte Speckle-Haufen langsam hin und her. Dieser Effekt beschränkt die Winkelauflösung astronomischer Aufnahmen, die Abbildung verschmiert – im Fachjargon heißt das Seeing. Es bezeichnet dabei sowohl die Tatsache der Beeinträchtigung durch die Luftunruhe, als auch das Maß der Bildunschärfe. An guten Standorten und in geeigneten Zeiträumen beträgt der Seeing-Wert typischerweise weniger als eine Bogensekunde, bestenfalls die Hälfte davon. Herrschen starke Luftturbulenzen, treiben sie den Wert auf fünf Bogensekunden oder mehr hoch.

Die Schärfe des Bildes und dessen fotometrische Qualität, – also wie einheitlich die Intensität verteilt ist –, sind dabei aber überwiegend unabhängig voneinander. Während Szintillation vorrangig durch Turbulenzen in den höheren Schichten entsteht, rufen besonders die Luftbewegungen in erdnäheren Schichten Phasenstörungen hervor. Daher kann auch der Fall auftreten, dass ein verschwommenes Bild wenig Intensitätsschwankungen aufweist beziehungsweise eine eigentlich scharfe Abbildung viele.

Eine Optik mit einer kleinen Öffnung – wie etwa das Auge – kann dabei die scheinbare Positionsänderung der Lichtquelle durch die Phasenstörungen nicht wahrnehmen; aber umso mehr das schnelle Hin- und Herwandern der dunklen und hellen Flecken. Sie ändern sich typischerweise im Bereich von Millisekunden. Unser Sehorgan kann je nach Kontrast und Lichtverhältnissen etwa 10 bis 60 Lichtreize pro Sekunde wahrnehmen – das reicht aus, um diese raschen Helligkeitsschwankungen zu bemerken: Der Stern funkelt.

Anhand solcher scheinbaren Helligkeitsvariationen lässt sich mit dem bloßen Auge ein Stern von einem Planeten unterscheiden. Denn letztere weisen weit weniger Szintillationen auf, da sie sich auf der Erde als leicht ausgedehntes Objekt präsentieren, als Scheibchen. Die Skala der Szintillationen ist viel kleiner als das Scheibchen, und deshalb fallen die Helligkeitsvariationen nicht auf. Planeten funkeln also wenig bis gar nicht – je nach Stärke der Luftturbulenzen. Bei Optiken mit größeren Öffnungen sind die Intensitätsschwankungen von Sternen übrigens nicht unbedingt störend, weil über die gesamte Intensität gemittelt wird. In diesem Fall beeinträchtigt die großflächigere Bewegung des gesamten Speckle-Haufens die Qualität der Abbildung deutlicher.

Große Spiegel sehen schärfer und werden doch getrübt

Wie genau stört das Seeing Beobachtungen im Teleskop? Zwei Größen sind ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Teleskops: Empfindlichkeit und Winkelauflösung. Je größer die Lichtsammelfläche eines Teleskops, desto empfindlicher ist es. Davon hängt es also ab, wie lichtschwach Himmelsobjekte sein können, damit Astronomen sie gerade noch sehen. Die Winkelauflösung wiederum bestimmt die Feinheit der Strukturen, die das Teleskop getrennt auflöst. Mit zunehmender Spiegelgröße wird die Winkelauflösung immer besser (siehe Bild oben), allerdings nur dann, wenn das Gerät Bilder erzeugt, die nur von Beugungseffekten der verwendeten Optik begrenzt werden. Was heißt das?

Das Auflösungsvermögen eines optischen Systems kennzeichnet den minimalen Abstand, bis zu dem es zwei eng benachbarte Punkte gerade noch getrennt darstellen kann. Limitiert wird die Auf-

Teleskope bilden ein Himmelsobjekt umso schärfer ab, je größer der Durchmesser ihres Hauptspiegels ist. Um diesen Effekt zu demonstrieren, wurde die hier gezeigte Sternentstehungsregion auf unterschiedliche Spiegelgrößen skaliert.

lösung dadurch, dass die Lichtwellen an bestimmten Komponenten des Geräts gebeugt werden. Dieses Phänomen ist unvermeidbar und beruht auf der Wellennatur des Lichts. Nach dem Huygensschen Prinzip ist jeder Punkt einer Wellenfront wieder Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. So lässt sich geometrisch beschreiben, dass Lichtwellen an Spalt- oder Objektivrändern von optischen Geräten ihre Richtung ändern. Beim Teleskop ist zum Beispiel jeder Punkt auf dem Spiegel Ausgangspunkt einer individuellen Welle.

Treffen die zahlreichen überlagerten Einzelwellen auf das darstellende Optikelement, ist dort schließlich ein Interferenzmuster zu sehen: An bestimmten Orten verstärken sich die Wellen, an anderen schwächen sie sich oder löschen sich gar vollständig aus. Das erzeugt letztlich aus einem Lichtpunkt ein Muster aus Punkten mit Intensitätsminima und -maxima. Dieser Beugungseffekt begrenzt die Auflösung des Teleskops und ganz generell optischer Abbildungssysteme. Bei Weltraumteleskopen außerhalb der störenden Erdatmosphäre ist das der tatsächlich limitierende Faktor. Doch bei erdgebundenen Teleskopen begrenzt das stete Wabern der Atmosphäre die Auflösung.

Seit Beginn der 1990er Jahre sind optische Teleskope mit Spiegeldurchmessern von acht bis zehn Metern in Betrieb. Das Extremely Large Telescope (ELT) der Europäischen Südsternwarte ESO, das 2024 in Betrieb gehen soll, wird dies mit 39 Meter

Wie scharf sieht ein Teleskop?

Unter welchem minimalen Winkelabstand kann ein Teleskop zwei benachbarte Punkte noch getrennt voneinander abbilden? Dieser Winkel – auch als Beugungsgrenze bekannt – lässt sich mit Hilfe des Rayleigh-Kriteriums berechnen. Es wurde nach dem englischen Physiker John Strutt, 3. Baron Rayleigh (1842–1919) benannt. Strutt betrachtete dazu eine kreisrunde Öffnung, an der die ankommenden Lichtstrahlen gebeugt werden. Die Beugung führt letztlich auf dem Detektor zu einem Interferenzmuster aus konzentrischen Ringen. In deren Mitte befindet sich das sehr helle Maximum, das von dunklen und weiteren hellen Bereichen umgeben ist. Gemäß dem Kriterium muss der Mindestabstand der beiden abgebildeten Punktquellen gleich dem Abstand des ersten Minimums vom zentralen Maximum sein. In diesem Fall fällt nämlich das Intensitätsmaximum der einen Punktquelle genau in das erste Intensitätsminimum der anderen Quelle und umgekehrt (siehe Bild Mitte).

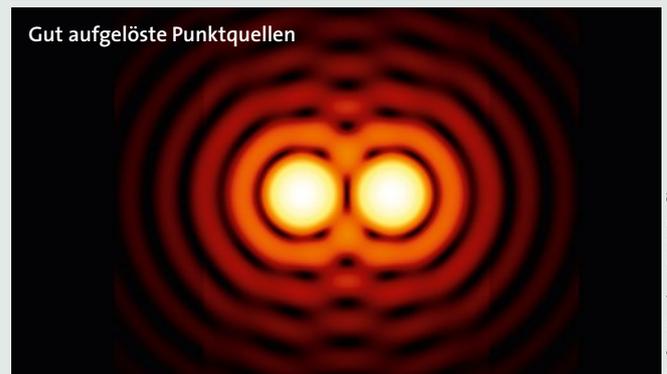
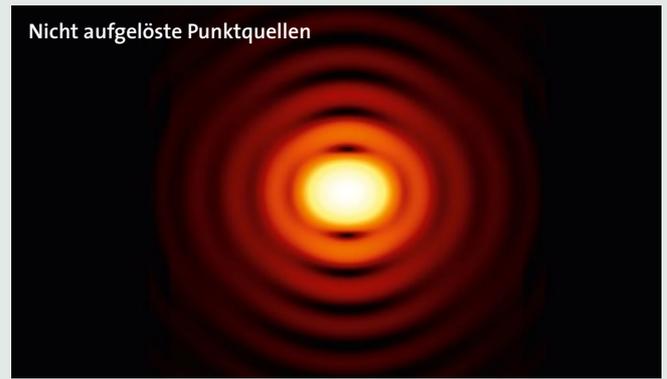
In einem optisch perfekten Teleskop mit einer runden Öffnung lässt sich das Beugungsmuster mathematisch durch die Airy-Funktion beschreiben (siehe Grafik rechts). Das zentrale Maximum enthält dabei mehr als 80 Prozent der Gesamtintensität. Für ein Teleskop mit Objektivdurchmesser D (»Öffnung«) und Licht der Wellenlänge λ ergibt sich aus der Airy-Funktion die Beugungsgrenze R zu:

$$R = \frac{1,22 \lambda}{D}$$

Der Faktor 1,22 kommt von der Nullstelle der Airy-Funktion.

Für ein Acht-Meter-Teleskop wie das VLT und eine typische Wellenlänge von $\lambda = 2,2$ Mikrometern (Nahinfrarot) liegt die

Je näher die Punktquellen beisammen stehen, umso schwieriger sind sie getrennt voneinander zu beobachten. Mit dem Rayleigh-Kriterium lässt sich das quantifizieren.



Stefan Hippler / SuW-Grafik

Spiegeldurchmesser um das Vier- bis Fünffache übertreffen. Die Empfindlichkeit steigt somit um einen Faktor 16 bis 25. Das Winkelauflösungsvermögen hingegen erreicht ohne zusätzliche Korrekturtechnik nicht die Werte, zu denen solche Teleskope ohne das Seeing fähig wären. Die theoretisch erreichbare Beugungsgrenze im optischen Spektralbereich eines Acht-Meter-Teleskops liegt bei 13 Millibogensekunden und beim ELT bei 2,7 Millibogensekunden. Das Seeing limitiert die Auflösung jedoch in einer Größenordnung von 1000 Millibogensekunden, also einer Bogensekunde. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie viel schärfer Teleskope auf der Erde ohne die Bewegungen der Lufthülle eigentlich sehen könnten. Es lag auf der Hand, dass Astronomen an Tricks arbeiteten, um dem Störeffekt entgegenzuwirken.

Adaptive Optik – eigentlich eine alte Idee

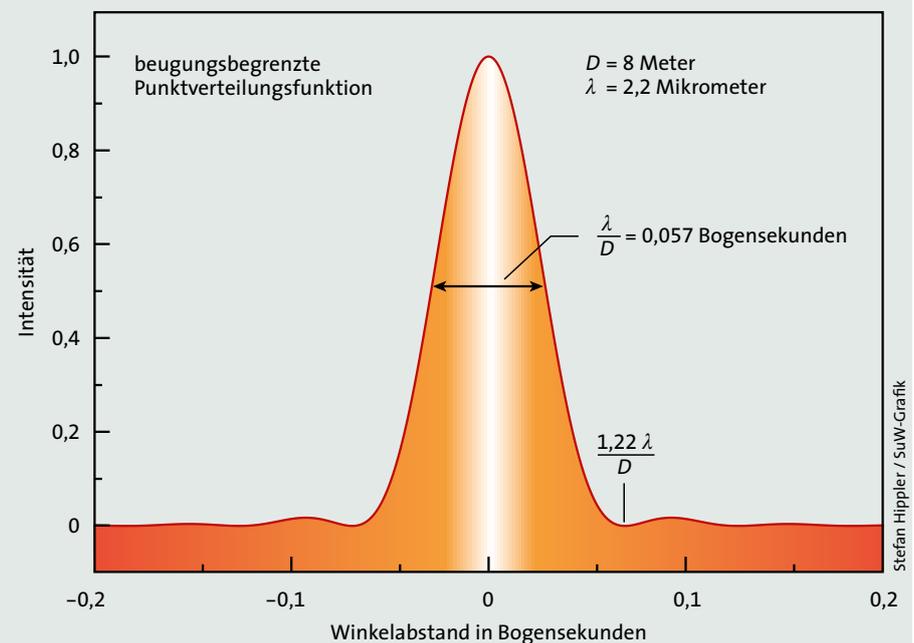
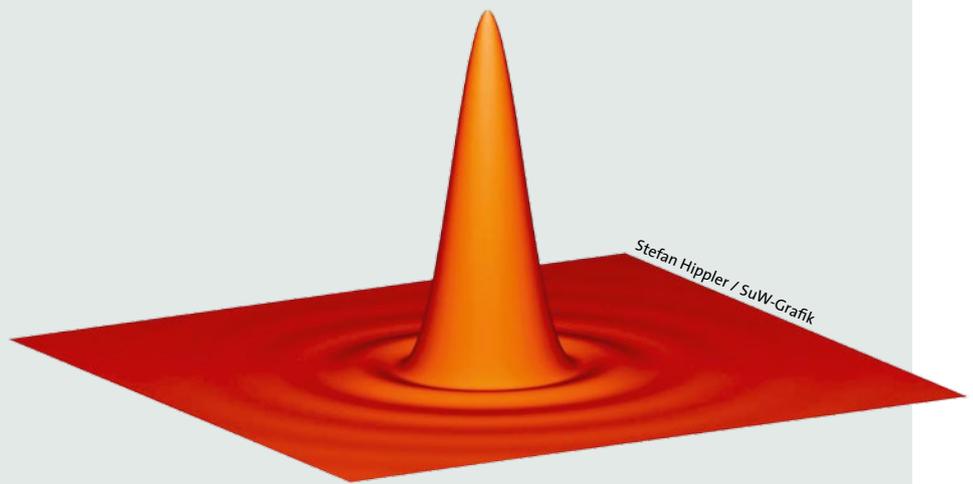
Nachdem Newton die Ursache des Seeings identifiziert hatte, dauerte es mehr als 250 Jahre, bis die Fachwelt eine konkrete technische Idee zur Lösung des Problems präsentieren konnte. Im Jahr 1953 schlug der US-amerikanische Astronom Horace W. Babcock eine adaptive Optik vor, welche die Wanderbewegung des Flecks kompensieren und die verbogene Welle wieder geradebiegen sollte. Als Korrektorelement wollte er das so genannte Eidophor-System einsetzen, das erste Verfahren zur großflächigen Projektion von Fernsehbildern. Die vorherige Bestimmung der Störungen – 60 Mal pro Sekunde – sollte mit der »Messerschneiden-Methode« gelingen. Dieses relativ einfache Verfahren entwickelte Léon Foucault schon im Jahr

1856. Dabei kommt die scharfe Kante eines Messers zum Einsatz, um über den Schattenwurf die Abbildungsqualität optischer Systeme, insbesondere von Teleskopspiegeln zu prüfen. Mit seiner Technik strebte Babcock an, das rund fünf Meter große Hale-Teleskop auf dem Palomar Mountain in Kalifornien im optischen Spektralbereich beugungsbegrenzt mit einer Winkelauflösung von 25 Millibogensekunden zu betreiben. Das hätte einer Verbesserung um den Faktor 80 entsprochen.

Allerdings klappte die Umsetzung nicht so, wie er sich das vorgestellt hatte. Zu der damaligen Zeit war die Technik noch nicht ausgereift genug, und außerdem veranschlagte der Astronom zu wenige Messungen pro Sekunde, um die Störungen ausreichend präzise zu bestimmen. Dennoch

Beugungsgrenze bei $R = 0,069$ Bogensekunden. Neben dem minimalen Winkel gibt die Beugungsgrenze auch Aufschluss darüber, ab welcher Größe beziehungsweise Entfernung Sterne nicht mehr als punktförmige, sondern als ausgedehnte Objekte erscheinen. Der sonnennächste Stern Proxima Centauri, mit einer Entfernung von rund 4,2 Lichtjahren, müsste daher im Durchmesser deutlich größer als 13 Millionen Kilometer sein, um mit dem Acht-Meter-Teleskop als ausgedehntes Objekt abgebildet zu werden. Sein wahrer Durchmesser beträgt aber lediglich rund 200 000 Kilometer. Ein Riesenstern wie Beteigeuze im Orion mit einem Durchmesser von rund 1,5 Milliarden Kilometern und einem Abstand von rund 650 Lichtjahren könnte mit einem Acht-Meter-Teleskop bei der gleichen Beugungsgrenze auch erst ab einem Durchmesser von etwa zwei Milliarden Kilometern als ausgedehntes Objekt erkannt werden. Dazu ist eine deutlich kleinere Beugungsgrenze von $R < 0,03$ Bogensekunden notwendig. Oder anders gesagt: Ein 18-Meter-Teleskop könnte bei dieser Wellenlänge Beteigeuze auflösen.

Die Airy-Funktion beschreibt das Beugungsmuster, das eine Punktquelle in einem optisch perfekten Teleskop (hier mit acht Meter Öffnung im nahen Infrarot), erzeugt.



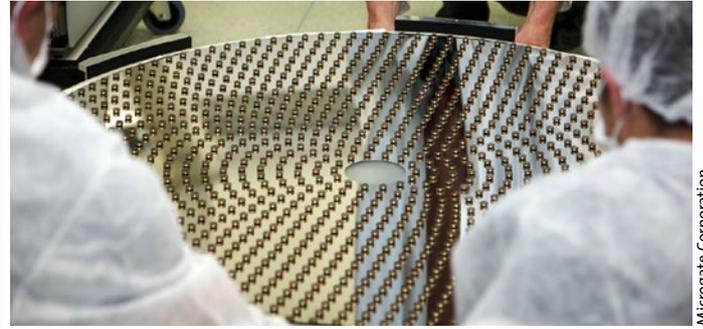
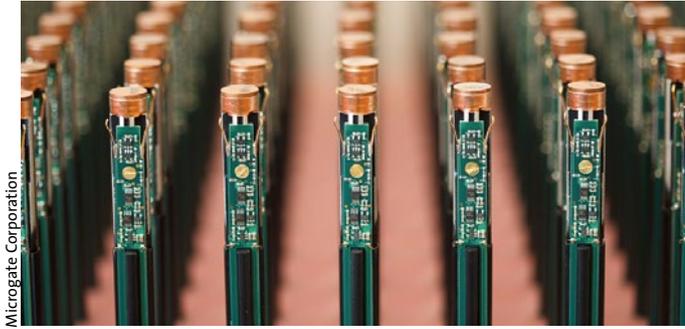
legte Babcock mit seinen Überlegungen die Grundlagen für die adaptive Optik – die vom Prinzip her auch heute noch ähnlich funktioniert. Bis ein solches System jedoch erfolgreich an einem Großteleskop implementiert wurde, sollten nochmal rund 40 Jahre vergehen: Seit Anfang der 1990er Jahre bis 2002 arbeitete das 3,6-Meter-Teleskop der ESO in Chile mit einer adaptiven Optik. Heutzutage ist fast jedes optische Großteleskop mit dieser Technik ausgestattet, um die Geräte möglichst nahe an ihre Beugungsgrenze zu bringen. Für die Klasse der Acht-Meter-Teleskope und Wellenlängen im sichtbaren und nah-infraroten Wellenlängenbereich erreicht die Auflösung mit Hilfe der adaptiven Optik Werte zwischen 10 und 50 Millibogensekunden, was zwei Zehnerpotenzen besser ist als das Seeing-Limit.

Lichtwellen glattbügeln

Doch wie lassen sich die Störungen im Wellenmuster mit hoher Präzision und Geschwindigkeit bestimmen und anschließend glätten? Jegliche adaptive Optik braucht dazu folgende drei Hauptkomponenten: Wellenfrontsensor, Korrektor und Steuerelement. In der Regel bestimmt ein Wellenfrontsensor die Verzerrungen, die anschließend von einem deformierbaren Spiegel entfernt werden. Dazu passen kleine elektronische Stullelemente, Aktuatoren genannt, auf der Rückseite des Spiegels seine Oberfläche derart an, dass sie das gleiche Muster wie die Welle aufweist, allerdings jeweils nur mit halber Höhe der Berge und Täler (siehe Bild und Grafik auf der nächste Seite). Dadurch wird die auf dem Detektor erscheinende Welle wieder glatt, also von den durch Turbulenzen

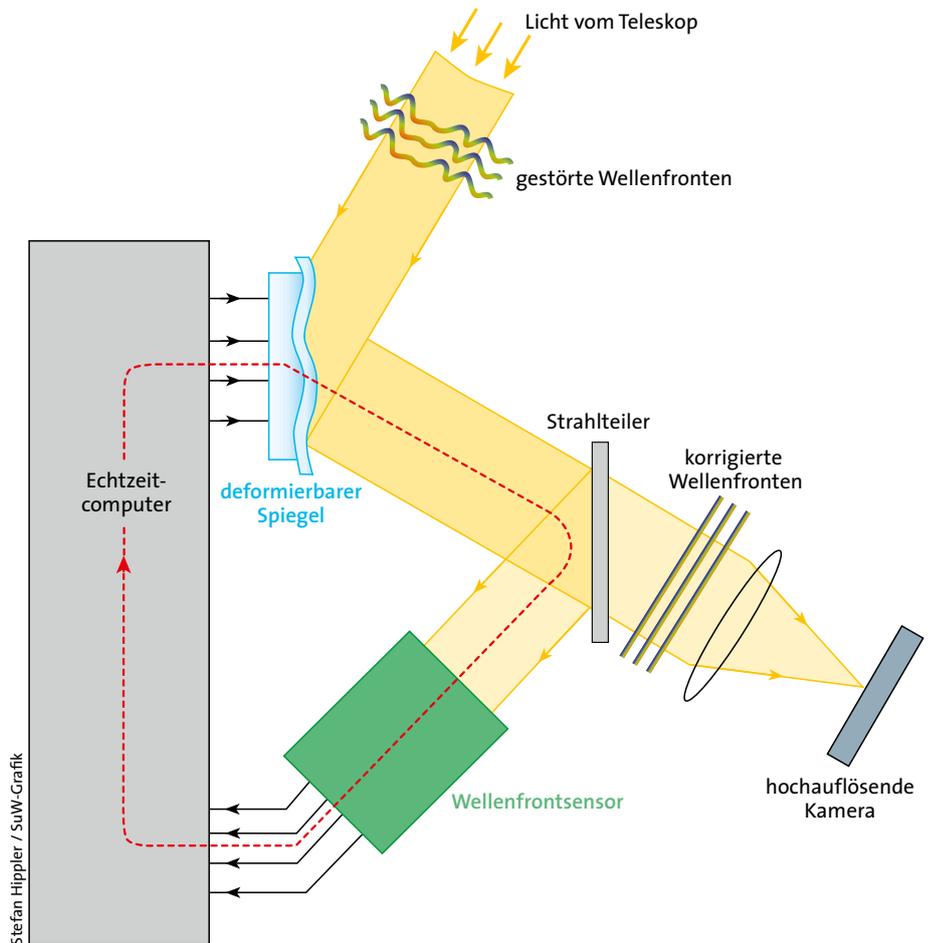
verursachten Verzerrungen bereinigt. Ein leistungsstarker Computer dirigiert den Ablauf präzise.

Eine große Herausforderung der Systeme mit adaptiver Optik besteht darin, auf die sich rasch ändernden Wellenfronten so schnell wie möglich zu reagieren. Die Messung und anschließenden Phasenkorrekturen der adaptiven Optik sollten im Idealfall innerhalb eines Zeitraums geschehen, in dem sich die Atmosphäre nicht bewegt. Um diese Kohärenzzeit abzuschätzen, nutzen Experten die effektive Windgeschwindigkeit in der Atmosphäre und den Fried-Parameter. Die Windgeschwindigkeit lässt sich beispielsweise mittels eines Atmosphärenmodells aus verschiedenen Schichten bestimmen. Sie gibt gewissermaßen Auskunft darüber, wie schnell sich die Luftblasen im Mittel



Um einen flexiblen Spiegel in Sekundenbruchteilen in die richtige Form zu bringen, ist eine Vielzahl stiftartiger Aktuatoren erforderlich, die von einer Elektronik angesteuert werden (links). An die Rückseite des nur zwei Millimeter dünnen Spiegels sind kleine Magnete geklebt, auf die später der Referenzkörper mit den Aktuatoren aufgebracht wird (rechts).

Herzstück einer adaptiven Optik ist ein Wellenfrontsensor (grün). Dieses Gerät misst die durch Turbulenzen verursachten Störungen der Lichtwelle. Hieraus berechnet ein Computer, in welchem Maß ein Spiegel (blau) verformt werden muss, damit die Störungen der Wellenfront genau kompensiert werden. Die korrigierte Wellenfront ist wieder eben – so, wie vor dem Eintritt des Lichts in die Erdatmosphäre. Da sich die Störungen der einfallenden Wellenfront schnell verändern, regelt die adaptive Optik mehrer hundert Mal pro Sekunde die Spiegelform nach.



bewegen. In der Praxis bestimmt die ESO diese Geschwindigkeit zu zwei Fünfteln der bei einem Atmosphärendruck von 200 Millibar gemessenen Windgeschwindigkeit.

Im Fried-Parameter steckt die örtliche Variation des Brechungsindex – kleine Werte entsprechen starker, große Werte schwacher Turbulenz. Wenn nicht anders angegeben, bezieht sich der Fried-Parameter auf eine Wellenlänge von 500 Nanometern. Es gilt: Für langbelichtete Aufnahmen machen sich Störungen ab der Größenordnung des Fried-Parameters bemerkbar. Für einen relativ guten Fried-Parameter von 60 Zentimetern und eine typische effektive Windgeschwindigkeit von fünf Metern pro Sekunde erhält man eine Kohärenzzeit von 0,036 Sekunden. Um zeit-

liche Störungen dieser Größenordnung allerdings ausreichend gut zu korrigieren, muss die adaptive Optik ungefähr 15 Mal so schnell sein wie dieser Wert. In diesem Fall müsste die Anpassung also etwa alle 0,0024 Sekunden geschehen, was einer Regelfrequenz von 417 Hertz entspricht. Der willkürlich erscheinende Faktor 15 ergibt sich aus der Regelungstechnik.

Laser schießt Stern an den Himmel

Typischerweise leuchtet das beobachtete Objekt nur sehr schwach. Deshalb bestimmen die Astronomen häufig die Turbulenzen mit Hilfe eines deutlich helleren Referenzsterns, der sich im gleichen Gesichtsfeld befindet. An einem solchen Objekt zeigt sich der Einfluss der Erdatmo-

sphäre deutlicher, und die adaptive Optik kann die Störungen genauer messen und korrigieren. Oft befindet sich aber kein entsprechend heller Leitstern in unmittelbarer Nähe des Beobachtungsobjekts. Je größer der Winkelabstand zwischen den beiden, desto schlechter wird die Korrektur in der Blickrichtung des Studienobjekts. Was also tun?

In diesem Fall projizieren die Astronomen einen künstlichen Stern mit einem Laser an den Himmel: Das gebündelte Laserlicht regt Atome der Natriumschicht in etwa 90 Kilometer Höhe zum Leuchten an, sodass dort ein heller Lichtpunkt entsteht (siehe Bild S. 28). Diese Technik – übrigens auch die adaptive Optik an sich – entwickelten US-amerikanische Militärs bereits gegen Ende des Kalten Kriegs im Gehei-

men. Anfang der 1990er Jahre legten sie ihre Erkenntnisse offen, und bald schon rüstete man Forschungsteleskope mit adaptiver Optik aus. Leitsterne aus Laserlicht sind dabei ein häufiger Bestandteil (siehe SuW 4/2005, S. 35, und SuW 2/2017, S. 42).

Damit große Gesichtsfelder mit guter Korrekturqualität möglich sind, werden häufig Wellenfrontmessungen in unterschiedliche Richtungen durchgeführt, die das Gesichtsfeld ausreichend abdecken. Die nächste Generation der adaptiven Optikelemente nutzt dazu mehrere Spiegel, welche die Bildkorrektur auf wesentlich größeren Flächen erlauben. Eine solche multi-konjugierte adaptive Optik

korrigiert die Unschärfen mitunter auch jeweils individuell auf verschiedenen Höhen. In einer Beobachtungskampagne im Sommer 2016 am 1,6-Meter-Sonnenteleskop des Big Bear Solar Observatory in den USA benutzten Astronomen dazu etwa einen Spiegel, der auf Abweichungen in Bodennähe ausgerichtet war, ein weiterer auf solche in drei Kilometer Höhe, und ein letzter auf Turbulenzen in acht Kilometer Höhe. Mit dieser Technik gelang es den Wissenschaftlern erstmals, drei deformierbare Spiegel so aufeinander abzustimmen, dass sich das Sichtfeld über insgesamt 35 Bogensekunden korrigieren ließ.

SPHERE liefert eine noch bessere adaptive Optik

Seit 2016 ist eine integrierte adaptive Optik mit der Abkürzung SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research) am VLT in Betrieb. Mit diesem Instrument erforschen die beteiligten Astronomen Exoplaneten im Bereich sehr hoher Kontrastverhältnisse. SPHERE nutzt einen deformierbaren Spiegel mit Aktuatoren im projizierten Abstand von 20 Zentimetern und korrigiert die atmosphärische Turbulenz mit einer Taktrate von 1,2 Kilohertz, also 1200 Anpassungen pro Sekunde. Die Wellenfront wird mit einem Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor in

Oha-Effekt mit AO (adaptive Optik)

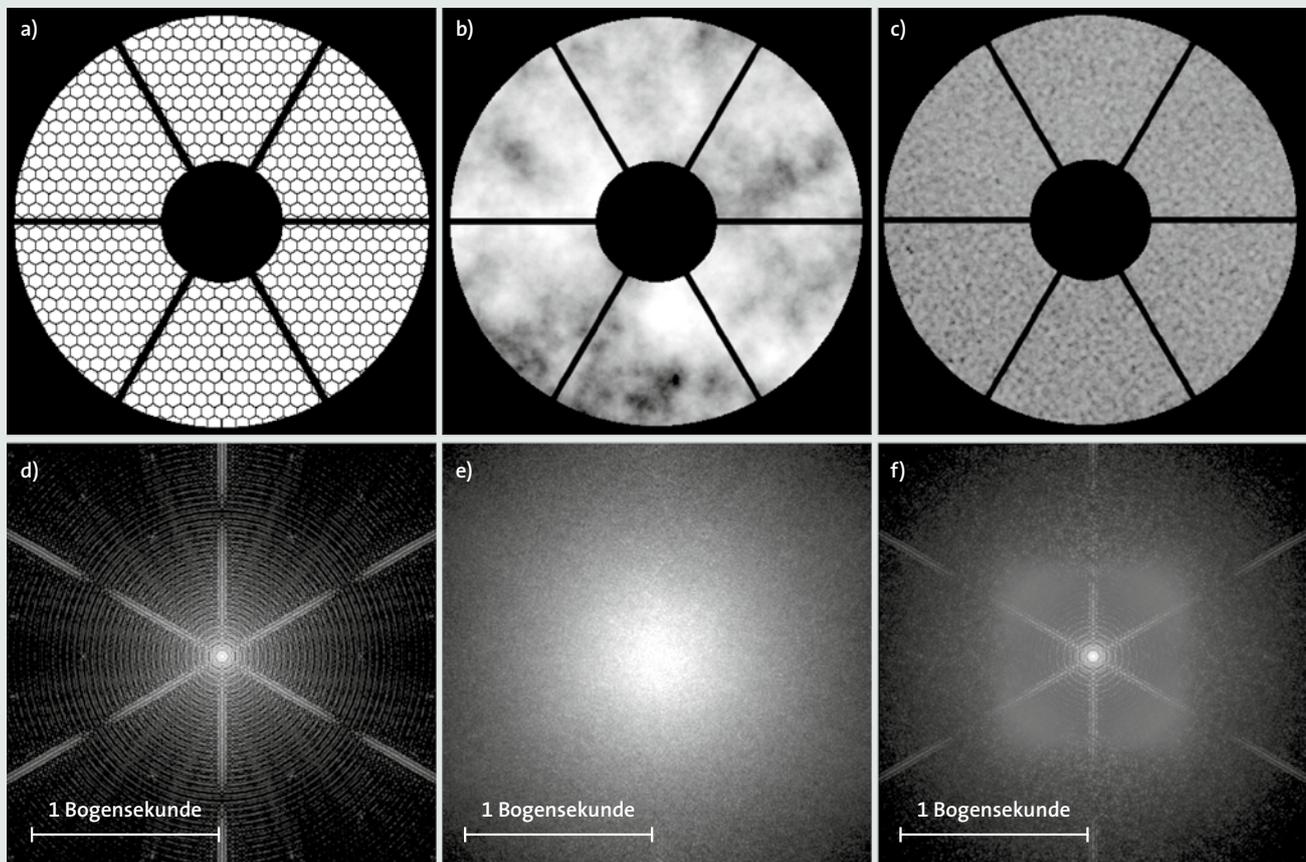
Das Extremely Large Telescope (ELT) ist das nächste Großprojekt der ESO; es wird gegenwärtig auf dem Cerro Armazones in Chile gebaut und soll Mitte der 2020er Jahre in Betrieb gehen. Sein riesiger Hauptspiegel mit 39 Meter Durchmesser besteht aus 798 sechseckigen Spiegelementen. Ein flexibler Spiegel im Strahlengang des Teleskops mit mehr als 5000 Aktuatoren wird mittels adaptiver Optik (AO) kontinuierlich an die turbulente Atmosphäre angepasst. In Bild (a) ist der segmentierte Hauptspiegel mit Schattenwurf durch den Sekundärspiegel und dessen Haltekreuz zu sehen. Das Bild (b) zeigt die Weglängen-

unterschiede (schwarz: kein Unterschied; weiß: 10 Mikrometer; grau: Werte dazwischen) der Wellenfronten bei einem Seeing von 0,63 Bogensekunden, aber ohne AO. Wird sie eingeschaltet, werden die Weglängenunterschiede kleiner und das Bild schärfer, siehe Bild (c). Den Leistungsgewinn zeigt auch die Punktspreizfunktion (PSF) für eine Wellenlänge von 2,2 Mikrometern: Das verschwommene PSF-Muster ohne AO in Bild (e) wird zu einer typisch sternförmigen Verteilung mit AO, wie in Bild (f) dargestellt. Diese PSF kommt an die Punktspreizfunktion des perfekten Teleskops in Bild (d) durchaus heran.

ELT-Spiegel und PSF für Idealfall

Weglängenunterschiede und PSF ohne AO

Weglängenunterschiede und PSF mit AO



Stefan Hippler

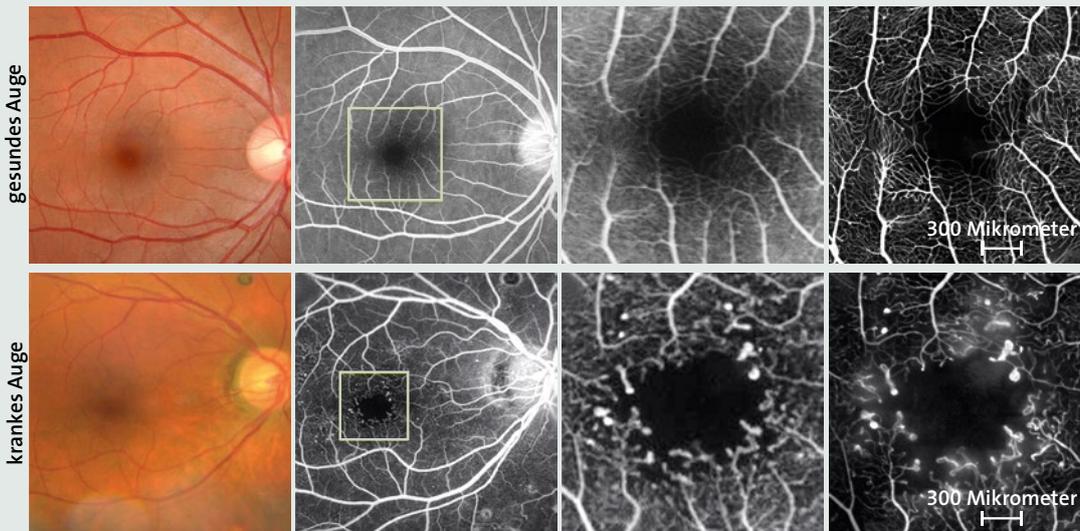
Weitere Anwendungsgebiete der adaptiven Optik

Die Korrektur optischer Störungen mit Hilfe von adaptiver Optik ist nicht nur für astronomische Anwendungen interessant. Die Technik kommt heutzutage in der Mikroskopie, der Medizin, der Freistrah-Datenübertragung und auch der Trägheitsfusion mit Hochleistungslasern zum Einsatz. Hier ein Beispiel aus der Augenheilkunde (siehe Fotos unten).

Etlliche Augenkrankheiten hängen mit Fehlfunktionen der Netzhaut (Retina) zusammen. Ärzte müssen sie sehr genau untersuchen können, um die Ursachen der Erkrankung aufzuspüren. Von außen lässt sich zwar mit einer Kamera die Netzhaut tief hinten im Auge betrachten, doch die dazwischen-

liegende Hornhaut und Linse verzerren das Bild – ähnlich wie die Atmosphäre die Sterne verschmiert. Wellenfrontensensoren der adaptiven Optik können die optischen Verzerrungen messen. Dazu schicken Ärzte einen Laserstrahl mit geringer Leistung ins Auge, der von der Retina reflektiert wird. An diesem zurückfallenden Strahl misst nun ein Wellenfrontensensor die durch das Auge verursachten Deformationen der Lichtwellenfront. Mit Hilfe der adaptiven Optik können diese Störungen entfernt werden, so dass Bilder von einzelnen Zellen der Netzhaut möglich sind. Solche sehr scharfen Aufnahmen verbessern die Diagnose und die Auswahl der Therapie.

Toco Chui, Y. P. et al.: Human retinal microvascular imaging using adaptive optics scanning light ophthalmoscopy. In: International Journal of Retina and Vitreous 2, 11 (2016), Fig. 4 and 5



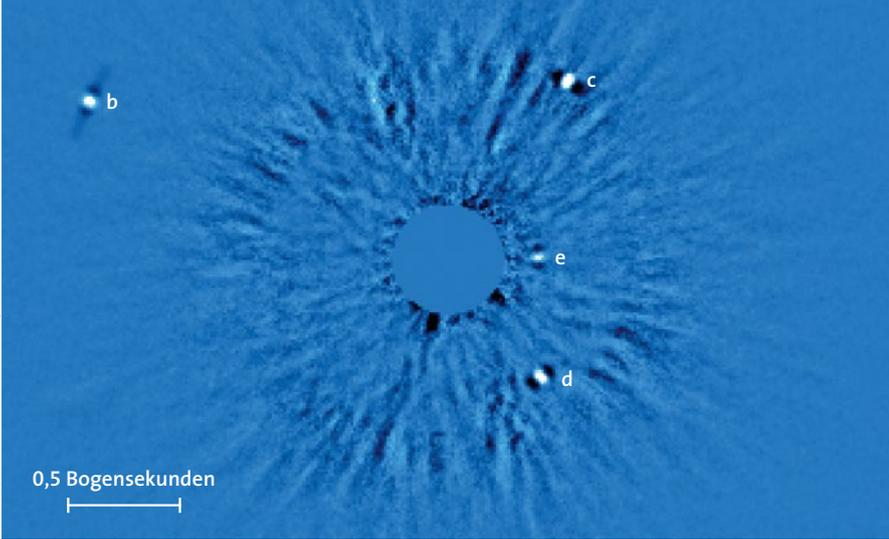
Konventionelle Aufnahmen des gesunden und kranken Augenhintergrunds zeigen kaum Details (Spalte ganz links). Fluoreszenzmikroskopische Methoden sind besser (2. Spalte von links und Detailvergrößerung rechts daneben), doch erst mit adaptiver Optik werden sie richtig scharf (rechte Spalte).



Ein Geschenk, das ankommt!

Mit einem **Spekturm**-Geschenkgutschein hat der Beschenkte die freie Wahl: ob Abonnement, Einzelhefte oder Kalender, ob Print- oder Digitalprodukte. In unserem Onlineshop www.spektrum.de/shop bieten wir eine große Auswahl an.

spektrum.de/aktion/gutscheine



Das Instrument SPHERE an einem der vier VLT-Teleskope ist mit einer adaptiven Optik ausgestattet und kann Exoplaneten direkt abbilden. Hierzu wird der Zentralstern, der die Planeten überstrahlen würde, mit einer Maske ausgeblendet. Auf diese Weise ließ sich das Planetensystem des Sterns HR 8799 sichtbar machen: Die vier Planeten b, c, d und e sind in Abständen von 0,4 bis 1,7 Bogensekunden vom maskierten Zentralstern gut zu erkennen; ihre Umlaufzeiten betragen zwischen 50 und 450 Jahren (siehe auch S. 15 in diesem Heft).

Abständen von 20 Zentimetern vermessen. Der Sensor besteht aus einem Linsenraster, das die Wellenfront des auftreffenden Lichts in kleine Segmente aufteilt (siehe SuW 10/2004, S. 36). Jede Linse erzeugt auf einem CCD-Sensor ein Bild ihres jeweiligen Bereichs. Mit SPHERE erreicht das Teleskop unter Normalbedingungen bei einer Wellenlänge von 1,6 Mikrometern (H-Band) ein Strehl-Verhältnis von 0,9. Diese Zahl ist ein Maß für die optische Güte: 0,9 bedeutet, dass die Intensitäten von Punktquellen zu 90 Prozent denjenigen Intensitäten entsprechen, die das Teleskop erreichen würde, wenn es voll beugungsbegrenzt wäre. Die Punktbilder von hellen Sternen zeigen dabei eine hohe zeitliche Stabilität.

Jagd auf Exoplaneten

Ein idealisierter Punkt bleibt kein Punkt, nachdem er durch eine Optik abgebildet wurde, sondern wird auseinandergezogen und verschmiert. Ein Maß für diese Aufspreizung ist die Punktspreizfunktion (auch Punktverteilungsfunktion genannt, englisch: point spread function, kurz PSF). Sie ist charakteristisch für das abbildende Instrument.

Adaptive Optik kann im Zusammenspiel mit einer weiteren Technik, dem Angular Differential Imaging (ADI), sehr hoch aufgelöste Bilder liefern. ADI könnte man als winkeldifferenzielle Aufnahme übersetzen.

Machen wir uns dieses Verfahren anhand des Sternsystems HR 8799 klar, um Planeten außerhalb des Sonnensystems zu entdecken (siehe Bild oben). Zunächst nehmen die Astronomen mehrere Bilder des Hauptsterns bei gleichzeitiger Drehung des Gesichtsfelds auf. Aus den vielen Einzelbildern ermitteln sie eine mittlere Punktspreizfunktion, die sie jeweils von den Bildern abziehen. Da sich die Planeten wegen der Drehung des Gesichtsfelds im-

mer an einer anderen Position befinden, werden sie durch diese Art der Korrektur nicht belagert. Vor der abschließenden Aufsummierung aller Einzelbilder wird die Bildfelddrehung von der Software korrigiert. Auf dem überlagerten Summenbild sind die zuvor nicht sichtbaren Planeten nun gut zu erkennen – ihre Signalstärke hat durch die Addition der vielen Einzelbilder zugenommen. Die erkennbaren dunklen Streifen um die Planeten sind ein Artefakt dieser Methode und zeigen die Richtung der Bildfelddrehung an. Während der Planet HR 8799b bereits im Jahr 1998 mit dem Weltraumteleskop Hubble entdeckt wurde, fanden Forscher die Planeten HR 8799c-d und HR 8799e erst zehn beziehungsweise zwölf Jahre später mit Hilfe dieser neuen Methode.

Die adaptive Optik erlaubt heutzutage bodengebundenen Teleskopen detail- und kontrastreiche Aufnahmen, wie sie noch vor mehreren Jahren nicht vorstellbar waren. Großteleskope am Boden können durchaus mit Weltraumteleskopen wie Hubble konkurrieren. Mit ausgeklügelter Technik und Kombination verschiedener Methoden können bodengebundene Teleskope mehr als 90 Prozent ihrer Leistungsfähigkeit ausschöpfen.

Von solchen Werten hat Newton wahrscheinlich nicht mal zu träumen gewagt. In seinem Werk »Opticks« schrieb er, dass längere Teleskope zwar die Objekte größer und heller darstellen, doch auch sie seien nicht in der Lage, dem Zittern der Atmosphäre entgegenzuwirken. Abhilfe sah Newton lediglich in Beobachtungsstandorten mit ruhiger Atmosphäre und über den Wolken, wie beispielsweise auf den Gipfeln der höchsten Berge. Glücklicherweise ist das heute so nicht mehr richtig. Adaptive Optik wird in allen künftigen Generationen erdgebundener optischer Großteleskope unverzichtbar sein. ©



STEFAN HIPPLER ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Sein Forschungsschwerpunkt ist die adaptive Optik.

Literaturhinweise

Davies, R., Hippler, S., Ragazzoni, R.:

Künstliche Sterne und große Gesichtsfelder. In: *Sterne und Weltraum* 4/2005, S. 34–45

Enderlein, M., Kaenders, W.: Künstliche Sterne für Großteleskope. In: *Sterne und Weltraum* 2/2017, S. 40–51

Hippler, S., Kasper, M.: Dem Seeing ein Schnippchen schlagen. In: *Sterne und Weltraum* 10/2004, S. 32–42

Hippler, S.: Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes. In: *Journal of Astronomical Instrumentation* 8, 1950001, 2019

Kasper, M.: Optimierung einer adaptiven Optik und ihre Anwendung in der ortsaufgelösten Spektroskopie von Tauri. In: Dissertationsschrift, Universität Heidelberg, 2000

Newton, I.: *Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. 4. Ausgabe, korrigiert, 1730

Weiß, A., et al.: Simultaneous Measurements of the Fried Parameter r_0 and the Isoplanatic Angle θ_0 using SCIDAR and Adaptive Optics – First Results. In: *ASP Conference Proceedings* 266, S. 86–95, 2002

Dieser Artikel und Weblinks unter:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1613542