

# Schärfer sehen mit adaptiver Optik

## Lasertechnologie für Teleskope der nächsten Generation

• **Aktiv-kontrollierte Optiken in Reflexion oder Durchlicht:** Was als militärische Vision in Zeiten des Kalten Krieges begann, findet heute Anwendungen an vielen Stellen, an denen Brechung die Lichtwege verzerrt, die Atmosphäre die Abbildung verschmiert, aber auch dort, wo eine aktive Fokuskontrolle gewünscht wird. Adaptive Optik wird daher nicht nur in der Astronomie zur Kompensation der Deformation stellarer Wellenfronten durch die turbulenten Luftschichten der Atmosphäre eingesetzt. Sie spielt auch eine zunehmend größere Rolle beim Laserschneiden, zur Diagnose von Augenerkrankungen oder in der Mikroskopie.

Moderne Laserschneidanlagen mit CO<sub>2</sub>-Lasern nutzen adaptive Optik um Fokusbereich und -größe einzustellen (Abbildung 1). Die Besonderheit des hierbei eingesetzten Verfahrens besteht darin, dass die Spiegelfläche des Fokussier-Kupferhohlspiegels als Membran ausgebildet ist, die sich durch Druckveränderung des Kühlwassers auf deren Rückseite kontrolliert deformieren lässt. Je nach Position des Schneidkopfes ist es so möglich, die Gesamtstrahlänge und damit die Lage und Größe des Fokus zu ändern.

Zur Bildgebung der mikroskopischen Struktur der Retina, wie z. B. der Darstellung der Photorezeptoren oder Blutgefäße, ist es vorteilhaft die optischen Aberrationen des menschlichen Auges zu korrigieren, da diese zu Störungen der Wellenfront und damit zu einer schlechten räumlichen Auflösung der Abbildung führen. Weiterhin können die Messdaten der adaptiven Optik bereits heute für eine individuelle refraktive Hornhautchirurgie verwendet werden.

Auch in der hochauflösenden Mikroskopie wird adaptive Optik eingesetzt, um eine gute dreidimensionale Auflösung selbst in dicken Proben zu erzielen. Moderne Multiphotonen-Mikroskope verwenden langwellige, gepulste Laser, um eine möglichst große Eindringtiefe in die Probe zu erreichen. Das durchdrungene Gewebe verzerrt

### DIE AUTOREN

#### MARION LANG

Marion Lang studierte Physik an der Ruprecht-Karls Universität in Heidelberg. Während ihrer Promotion am Deutschen Krebsforschungszentrum arbeitete sie in der Gruppe „Optische Nanoskopie“ und erhielt ihre Doktorwürde auf dem Gebiet der hochauflösenden Mikroskopie. Anschließend war sie Applikationsspezialistin für High Content Screening bei Olympus Soft Imaging Solutions. Seit 2010 arbeitet sie als Technical Marketing Manager bei TOPTICA.



Marion Lang  
TOPTICA Photonics AG  
Lochhamer Schlag 19  
82166 Gräfelfing  
Tel.: +49 (0)89 85837 123  
E-Mail: marion.lang@toptica.com  
Website: www.toptica.com

#### WILHELM KAENDERS

Wilhelm Kaenders hat in Bonn und am Imperial College London Physik studiert, bevor er 1994 in Hannover am Inst. für Quantenoptik im Gebiet der Optik von lasergekühlten Atomen bei Prof. Meschede promovierte. Er hat die TOPTICA 1998 zusammen mit einem Kollegen gegründet. Heute ist er als Vorstand der Firma zuständig für die Technologie und die Erschließung zukünftiger Geschäftsfelder.



Wilhelm Kaenders  
TOPTICA Photonics AG  
Lochhamer Schlag 19  
82166 Gräfelfing  
Tel.: +49 (0)89 85837 0  
E-Mail: wilhelm.kaenders@toptica.com  
Website: www.toptica.com

#### LARS CHRISTENSEN

Herr Christensen leitet die Abteilung für Bildung und Öffentlichkeitsarbeit (education and Public Outreach Department, ePOD) der ESO in München. Er ist verantwortlich für die PR des La Silla-Paranal Observatoriums, für ESOs Anteil an ALMA (das zurzeit größte bodenbasierte astronomische Projekt im Bau), für das europäische Extremely Large Telescope (das größte in Planung befindliche Teleskop), ESOs Anteil am Weltraumteleskop Hubble und das Pressebüro der Internationalen Astronomischen Union.



Lars Christensen  
Europäische Südsternwarte  
Karl-Schwarzschild-Straße 2  
85748 Garching bei München  
Tel.: +49 (0) 89 320 06 761  
E-Mail: lars@eso.org  
Website: www.eso.org/~lchriste

der. Neben dieser Tätigkeit ist er aktiv bei der DPG, im Fachbeirat der Messe München, aber auch im Direktorium der Optical Society OSA.

jedoch die Wellenfront und unterschiedliche Brechzahlen führen zu sphärischen Aberrationen. Eine Lösung des Problems ist die Verwendung eines adaptiven Spiegels (Abbildung 2), um die Wellenfront des

Anregungslichts vorab so zu deformieren, dass die Fluorophore im Fokus möglichst effizient angeregt werden. Somit wird ein möglichst helles und scharfes Fluoreszenzsignal detektiert. Auf diese Weise erhöht sich

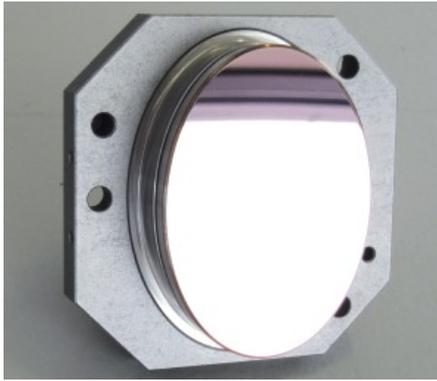


ABB. 1: Adaptiver Fokusspiegel einer Laser-Schneidanlage. (Quelle: LT Ultra Precision Technology GmbH)

nicht nur die erreichbare Eindringtiefe in die Probe, sondern auch die räumliche Auflösung in tieferen Schichten wird deutlich gesteigert. Auf dieselbe Weise können auch moderne Konfokalmikroskope bei Aufnahmen in tiefen Gewebeschichten von der adaptiven Optik profitieren [1].

### Atmosphärische Störungen in der Astronomie

Als nahezu punktförmige Lichtquellen strahlen weit entfernte Sterne eine kugelförmige Wellenfront ab. Aufgrund ihrer großen Entfernung zur Erde erreicht uns daraus ein Ausschnitt als nahezu ebene Welle. Diese wird erst in der Erdatmosphäre gestört und trifft an der Erdoberfläche wie ein zerknittertes Blatt Papier auf, dessen Struktur sich durch die Turbulenzen der Erdatmosphäre ständig ändert. Dieser als „Seeing“ bezeichnete Effekt führt bei astronomischen Beobachtungen dazu, dass eine Punktlichtquelle nicht mehr als solche detektiert, sondern zu einem verschmierten Scheibchen wird.

*Ich bin erwacht und schau mich um,  
Ich steh allein im Dunkeln,  
Am Himmel droben, gleichgültig und stumm  
Seh ich die Sterne funkeln.*

Heinrich Heine

Im Idealfall einer beugungsbegrenzten Aufnahme ist die Auflösung nur abhängig vom Durchmesser des Teleskopspiegels, sowie von der Wellenlänge des detektierten Lichts. Durch größere Spiegeldurchmesser (oder kürzere Wellenlängen) lassen sich höhere Auflösungen erreichen. Die tatsächlich erzielbare Auflösung eines erdbasierten Teleskops begrenzt jedoch das Seeing.

Unter anderem um diesem Effekt zu entgehen, wurde 1990 das Hubble Space Telescope in den Orbit geschickt, und führt seitdem außerhalb der Erdatmosphäre beugungsbegrenzte Beobachtungen durch. Derzeit befinden sich jedoch Teleskope mit weit größeren Primärspiegeln in Planung,

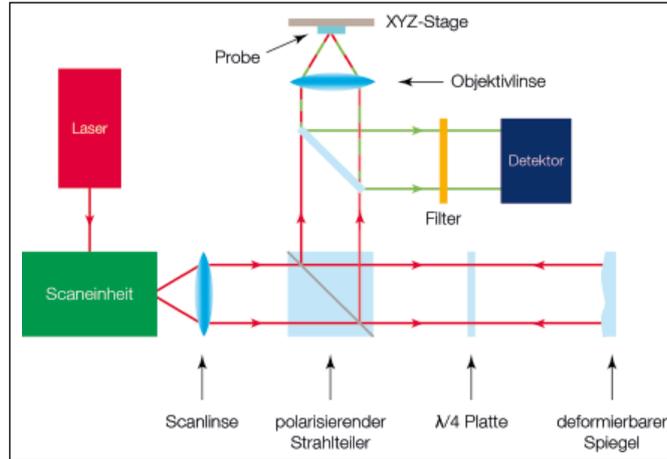


ABB. 2: Einsatz adaptiver Optik in der hochauflösenden Mikroskopie: Der deformierbare Spiegel ermöglicht es, die Wellenfront des Anregungslichts anzupassen, so dass auch bei großen Eindringtiefen in die Probe ein möglichst helles, scharfes Fluoreszenzsignal detektiert werden kann.

um immer feinere Strukturen am Nachthimmel abbilden zu können. Das Extremely Large Telescope (E-ELT) der europäischen Südsternwarte (ESO) beispielsweise, das am Anfang des nächsten Jahrzehnts den Betrieb aufnehmen soll, wird einen Primärspiegel mit einem Durchmesser von 42 m besitzen (Abbildung 3). Leicht vorstellbar, dass sich diese Giganten nicht mehr mit einem akzeptablen finanziellen Aufwand in die Erdumlaufbahn bringen lassen. Die Kosten für das Weltraum-Teleskop Hubble mit einem Spiegeldurchmesser von nur 2,4 m beliefen sich beispielsweise auf 2 Milliarden

US Dollar, bzw. 10 Milliarden bei Berücksichtigung aller laufenden Kosten bis heute. Dagegen kostete das erdbasierte Very Large

Telescope (VLT) der ESO, das sogar aus vier Einzelteleskopen mit Spiegeldurchmessern von je 8,2 m besteht, insgesamt „nur“ etwa 500 Millionen Euro. Aufgrund der deutlich niedrigeren Kosten sind erdbasierte Teleskope in den Wellenlängenbereichen, für die die Erdatmosphäre transparent ist (d.h. im Sichtbaren und im nahen Infrarot), klar im Vorteil. Dies gilt jedoch nur, wenn das Seeing-Problem gelöst werden kann.

### Verbesserung der Auflösung

Das Auflösungsvermögen erdgebundener Teleskope im sichtbaren Bereich wird durch das Seeing auf etwa 0,5–1 Bogensekunden begrenzt, so dass z.B. das VLT ohne weitere Hilfsmittel im Bezug auf sein räumliches Auflösungsvermögen keine besseren Ergebnisse erzielen würde, als ein Amateurteleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 15 cm. Mittels adaptiver Optik (AO) lassen sich aber auch mit erdbasierten Teleskopen beugungsbegrenzte Aufnahmen erzielen, so dass das VLT seine theoretische Auflösung von 0,01 Bogensekunden nahezu erreicht. Zum Vergleich: Hubble besitzt mit seinem Spiegeldurchmesser von 2,4 m, ohne die störenden Atmosphäre, bei sichtbaren Wellenlängen eine Auflösung von etwa 0,05".

Die atmosphärischen Turbulenzen lassen sich als zufällige Phasenaberrationen beschreiben, die sich ständig ändern. Der Teil der Wellenfront, der Blasen mit heißer Luft (niedriger Brechungsindex) durchquert, läuft voraus, die Bereiche, die kältere Luftschichten (höherer Brechungsindex) durchqueren, werden dagegen verzögert. Die Differenzen der optischen Weglängen betragen nur einige Mikrometer, reichen aber aus, um die Bildaufnahme erheblich zu stören. Der prinzipielle Aufbau der AO ist



ABB. 3: Größenvergleich von E-ELT (in Planung), VLT (bestehend aus 4 Einzelteleskopen) und dem Brandenburger Tor. (Bild: ESO)

## DIE FIRMA

## TOPTICA Photonics AG

Gräfelfing

Die TOPTICA Photonics AG konzipiert und fertigt Laser und Lasersysteme für den Einsatz in Forschung und Industrie in den Technologiefeldern Diodenlaser, Faserlaser und Terahertz-Systemdesign. Unter den Kunden befinden sich nicht nur ein Dutzend Nobelpreisträger sondern insbesondere HighTech-Firmen. Ein wesentlicher Punkt der Firmenphilosophie ist die enge Verzahnung von Kundenbedürfnissen und aktueller Forschung, um Hochtechnologie aus dem Labor in den industriellen Einsatz zu bringen. 2010 erhielt TOPTICA den ESO-Auftrag zur Entwicklung und Lieferung von vier Guide Star Lasern für das VLT.

[www.toptica.com](http://www.toptica.com)

in Abbildung 4 dargestellt: Ein Wellenfrontsensor vermisst die Abweichung der eintreffenden Wellenfront von einer ebenen Welle und sendet dieses Regelsignal an einen deformierbaren Spiegel. Dieser kann die gestörten Lichtwellen in Echtzeit korrigieren. Die Wellenfronten werden dann an eine hochauflösende Kamera weitergegeben.

Zur Analyse der Wellenfront benötigen Wellenfrontsensoren einen linearen Messbereich von einigen Mikrometern. Die atmosphärischen Turbulenzen finden auf einer Zeitskala von wenigen Millisekunden statt, so dass die Wellenfront etwa 1000x pro Sekunde vermessen werden muss. Zur Wellenfrontbestimmung wird die Phase der Wellenfront nicht direkt gemessen, sondern

das Problem wird auf eine Intensitätsmessung zurückgeführt. Am häufigsten kommen dabei Shack-Hartmann Wellenfrontsensoren zum Einsatz (siehe Infokasten 1).

Die AO benötigt ausreichend helle, punktförmige Referenzobjekte, die in derselben Blickrichtung wie das zu beobachtende Objekt liegen müssen. Ein solches Referenzobjekt dient zur Vermessung der durch die Atmosphäre hervorgerufenen Störungen. Jedoch sind nicht überall am Nachthimmel genügend helle Referenzsterne vorhanden, so dass Astronomen schon sehr früh die Idee hatten, mit Hilfe eines Lasers „künstliche Sterne“ zu erzeugen. Dank dieser sogenannten Laserleitsterne (Laser Guide Stars, LGS) kann fast der gesamte Himmel mittels AO beobachtet werden.

### Deformierbare Spiegel

Erste deformierbare Spiegel bestanden aus einzelnen, starren Segmenten, die von Piezoaktuatoren angesteuert wurden. Durch Spalte zwischen den einzelnen Segmenten geht jedoch ein Teil des gesammelten Lichtes verloren, so dass inzwischen zunehmend kontinuierliche deformierbare Spiegel verwendet werden. Aktuatoren mit einem Hub von einigen Mikrometern werden z. B. zwischen einer dünnen, deformierbaren Glasplatte und einer Referenzplatte angebracht. Eine günstigere Alternative sind bimorphe deformierbare Spiegel. Diese bestehen aus einer Glasplatte und einer Piezokeramikplatte mit zwei entgegengesetzt polarisierten Piezolagen. Eine durchgängige Elektrode befindet sich zwischen der Glasplatte und der Piezokeramik, auf der Rückseite der Piezokeramik einzelne, voneinander unabhängig steuerbare Elektroden. Eine Span-

nung zwischen diesen Elektroden führt zu Kräften, die den Spiegel verbiegen.

Die Fähigkeit eines deformierbaren Spiegels die Wellenfront zu korrigieren ist limitiert durch die Anzahl von Aktuatoren, sowie deren Responsezeit. Für die AO werden schnelle Reaktionszeiten (unter 1 ms) benötigt; daher wurden zunächst nur kleine deformierbare Spiegel mit einem Durchmesser von 8–20 cm am Ausgang des Teleskops (tertiäre Spiegel) eingesetzt. Heutzutage werden jedoch auch deformierbare Sekundärspiegel (wie z. B. am Large Binocular Telescope,  $\varnothing = 91$  cm, bestehend aus 7 Segmenten) für die AO verwendet, um die Zahl der reflektierenden Flächen bis zum Detektor zu reduzieren.

Für Teleskope der neuesten Generation werden zusätzlich aktive Primärspiegel eingesetzt. Diese sollen jedoch nicht atmosphärische Störungen korrigieren, sondern sind in der Lage, die Verformungen des Spiegels während der Schwenkbewegung des Teleskops auszugleichen. Dadurch muss der Primärspiegel nicht so massiv ausgeführt werden, wie bei Systemen ohne aktive Optik. Weiterhin sind die Anforderungen an die Fertigungstoleranz des Spiegels niedriger. Änderungen in Form und Position gleicht der Primärspiegel etwa 1x pro Minute aus, wohingegen adaptive Sekundär- oder Tertiärspiegel Störungen etwa 1000x pro Sekunde korrigieren.

### Laserleitsterne

Für gute Ergebnisse benötigt die AO einen ausreichend hellen Referenzstern, heller als etwa 15 mag. (Die scheinbare Helligkeit nimmt mit kleineren Zahlen zu; die der Venus beträgt  $-4.7$  mag, die des lichtschwä-

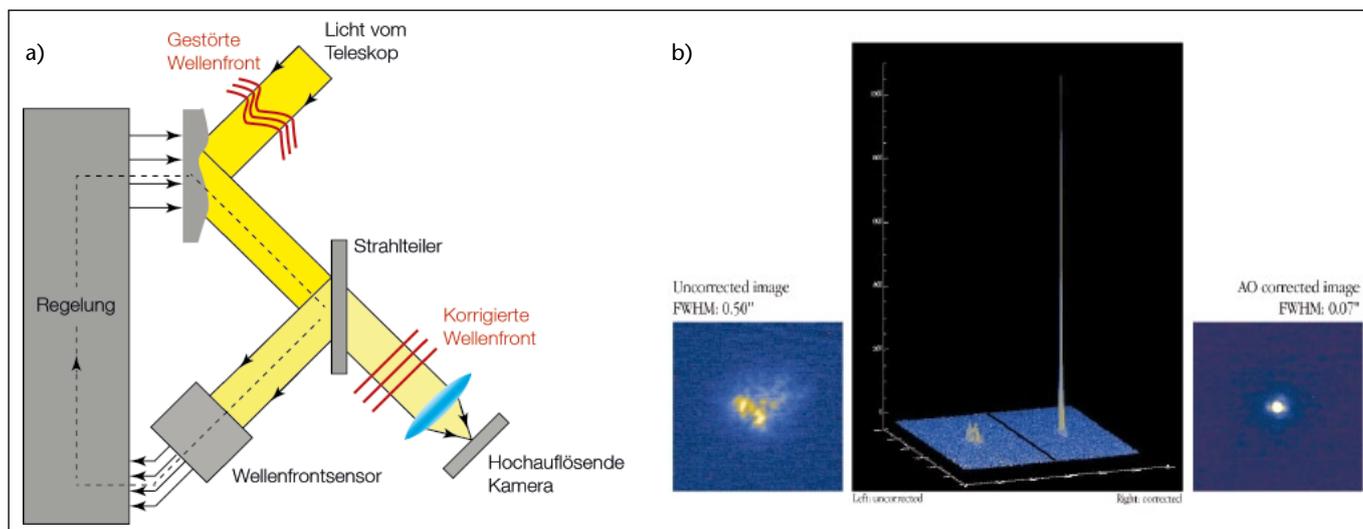


ABB. 4: a) Prinzipieller Aufbau eines adaptiv optischen Systems: Ein Sensor vermisst die Wellenfrontfehler des einfallenden Lichts und sendet ein Regelsignal an einen deformierbaren Spiegel. Dieser korrigiert die Wellenfront des Signals, so dass eine möglichst ebene Welle auf die hochauflösende Kamera des Teleskops trifft. b) Zum Vergleich eine Aufnahme eines Sternes ohne (links) und mit adaptiver Optik (rechts). Das Intensitätsprofil in der Mitte zeigt den enormen Gewinn an Bildschärfe und Intensität durch AO. (Bild: ESO)

chere Polarsterns etwa 2 mag). Der Referenzstern sollte in derselben Blickrichtung und möglichst nahe am zu beobachtenden Objekt stehen. Da die Turbulenzen in der Erdatmosphäre in verschiedenen Blickrichtungen unterschiedlich sind, ergibt sich eine gute Korrektur der Wellenfront nur in Richtung des Referenzsterns. Bei zunehmenden Winkelabständen durchlaufen die Lichtstrahlen von Referenz- und beobachtetem Objekt unterschiedliche Luftsäulen und verlieren ihre Korrelation. Dies bedeutet, dass die Korrektur mit wachsendem Winkelabstand immer schlechter wird.

Die Wahrscheinlichkeit, einen geeigneten natürlichen Referenzstern in der Nähe des Beobachtungsobjekts zu finden, ist gering. Im Bereich der galaktischen Ebene lassen sich nur wenige Prozent des Himmels mit einem natürlichen Referenzstern beobachten. An den Polen mit ihren geringeren Sternsdichten fällt dieser Wert auf ca. 1 %.

Für die Beobachtung von Bereichen des Himmels, in denen keine ausreichend hellen natürlichen Leitsterne vorkommen, schaffen künstliche LGS Abhilfe. Zur Erzeugung dieser künstlichen „Sterne“ gibt es heute im Wesentlichen zwei verschiedene Ansätze [2]: sogenannte Rayleigh-Leitsterne, die auf der Rayleighstreuung von Luftmolekülen basieren



ABB. 5: Zur Vermeidung von Parallaxe wird ein Laserstrahl von einem kleinen Teleskop in der Nähe des Hauptteleskops in die Atmosphäre „gelauncht“. Die resonante Wechselwirkung mit dem Natrium der Mesosphäre erzeugt einen künstlichen, punktförmigen Stern, der als Referenzobjekt für die adaptive Optik genutzt wird.

und Natrium-LGS (Na-LGS), die auf der resonanten Anregung von natürlich vorkommendem Natrium in der Mesosphäre beruhen.

### Adaptive Optik mit Rayleigh- und Natrium-Laserleitsternen

Für Rayleigh-Leitsterne wird die Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen in der Atmosphäre genutzt. Dieser Streuprozess findet entlang des gesamten Strahlweges des Lasers statt. Daher müssen gepulste Laser eingesetzt werden, um nur die Streuung in einer bestimmten Höhe zu detektieren. Ebenso muss der Detektor sehr genau auf die einzelnen Pulse des Lasers abgestimmt sein. Das Ergebnis ist ein heller Punkt, der als Referenzquelle für die AO eingesetzt werden kann. Der Rayleigh-Stern wird in einer Höhe von etwa 15 km erzeugt. Da die Luft mit zunehmender Höhe dünner wird und somit die Rayleighstreuung abnimmt ist dieser Ansatz auf solche Höhen beschränkt. Die Wellenlänge des Lasers spielt hierbei nur eine untergeordnete Rolle.

Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum Ansatz des Na-LGS, der zudem in deutlich größerer Höhe erzeugt wird. In einem Abstand von etwa 90 km zur Erdoberfläche existiert eine etwa 10 km dicke Schicht in der Eisen, Natrium, Kalium und andere schwere Atome in höheren Konzentrationen vorkommen (Abbildung 5). Vermutlich wird sie durch Meteoriten gespeist. Die

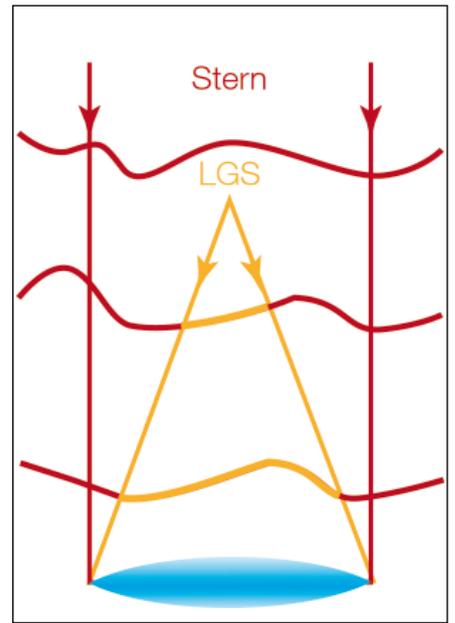


ABB. 6: Die endliche Höhe des LGS führt zu unterschiedlicher Skalierung der Wellenfronten von LGS und Stern (Kegeleffekt). Weiterhin werden Einflüsse auf äußere Anteile der Sternwellenfront nicht korrigiert.

Natriumresonanzlinie (D2 Übergang, siehe Infokasten 2) eignet sich aufgrund ihres hohen Fluoreszenz-Wirkungsquerschnittes zur Erzeugung eines künstlichen Leitsternes besonders gut. Ein Laser, der auf der Resonanzwellenlänge des D2 Übergangs bei 589 nm emittiert, regt die Natrium-Atome in dieser Schicht an und bringt sie zum Leuchten. Beim Übergang in den Grundzustand geben die Natrium-Atome gelbes Licht mit derselben Wellenlänge ab wie Natriumdampflampen, die häufig auch zur Straßenbeleuchtung eingesetzt werden.

Durch den sogenannten Kegeleffekt (Abbildung 6) besitzt die AO immer einen kleinen Restfehler. Die sphärischen Wellenfronten des LGS und die ebene Wellenfront des astronomischen Objekts werden unterschiedlich skaliert, so dass die gemessene Wellenfrontdeformation des LGS nicht exakt mit der des astronomischen Objekts übereinstimmt. Praktisch werden daher oft gleich mehrere Leitsterne nebeneinander projiziert. Weiterhin können Turbulenzen in Luftschichten oberhalb des LGS, sowie die äußeren Anteile der stellaren Wellenfront durch die AO nicht korrigiert werden. Selbst bei perfekter Korrektur der Wellenfront des LGS durch die AO, besitzt die Abbildung des beobachteten Objekts einen kleinen Restfehler. Dieser nimmt mit zunehmender Höhe des LGS ab, so dass aus diesem Grund Na-LGS für die AO besser geeignet sind als Rayleigh Laserleitsterne. Durchgesetzt hat sich daher beispielsweise für das VLT der ESO der Natrium-Laserleitstern.

### INFO 1

#### Shack-Hartmann Wellenfrontsensor

Die einfallende Lichtwelle trifft auf ein zweidimensionales Mikrolinsenarray, welches daraus einzelne Punktbilder auf einem CCD-Chip erzeugt. Die Position der Punktbilder auf dem Chip ist dabei abhängig von der Form der Wellenfront. Aus der lateralen Verschiebung relativ zu einem Referenzbild, welches einer planen Wellenfront entspricht, lässt sich die Wellenfront rekonstruieren.

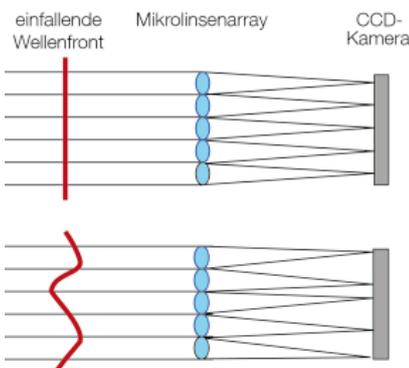


ABB.: Prinzip eines Shack-Hartmann Wellenfrontsensors am Beispiel einer ebenen (oben) und einer verzerrten (unten) Wellenfront.

## INFO 2

### Optisches Pumpen und der Rückpump-Effekt

Bei hohen resonanten Laserleistungen müssen Effekte wie optisches Pumpen und Strahlungsdruck berücksichtigt werden. Es kann nur maximal die Hälfte der Atome durch den Laser angeregt werden, da mit zunehmender Laserleistung die stimulierte Emission zunimmt. Die Effizienz des Prozesses hängt zudem von Details des Laserspektrums ab.

Durch die Wechselwirkung des Elektronen- mit dem Kernspin erfährt der 3s-Grundzustand des Natriums eine Aufspaltung von 1.7 GHz. Die  $D_2$ -Resonanzlinie (Übergang zu  ${}^2P_{3/2}$ ) besteht aus zwei Gruppen ( $D_{2a}$  und  $D_{2b}$ ). Durch die Aufhebung der Entartung der Hyperfeinstrukturaufspaltung durch das Erdmagnetfeld können bei zirkular polarisiertem Licht  $D_{2a}$ -Übergänge auf ein geschlossenes Zweiniveausystem ( $F = 2$ ,  $F' = 3$ ) eingeschränkt werden. Das Atom kehrt durch spontane Emission immer in denselben Zustand zurück. Unter realen Bedingungen spielen jedoch Einflüsse wie Temperatur und Stöße mit anderen Atomen eine Rolle. Stöße beispielsweise können den Spin umklappen und damit zu einer Bevölkerung von  $F=1$  Zuständen führen. Dort kann das Atom mit der  $D_{2a}$ -Linie nicht angeregt werden. Um die Atome aus den ungewollten Zuständen herauszupumpen, könnte die Linienbreite des Lasers auf über 2 GHz verbreitert werden, so dass beide Hyperfeinlinien des Grundzustandes am Anregungsprozess teilnehmen können. Eine deutlich effizientere Methode wird dagegen im SodiumStar eingesetzt: Etwa 10–20 % der Laserleistung wird simultan als Rückpumper auf der  $D_{2b}$ -Linie emittiert. Dadurch erhöht sich der Photonenfluss des LGS um etwa einen Faktor 3–4 [3].

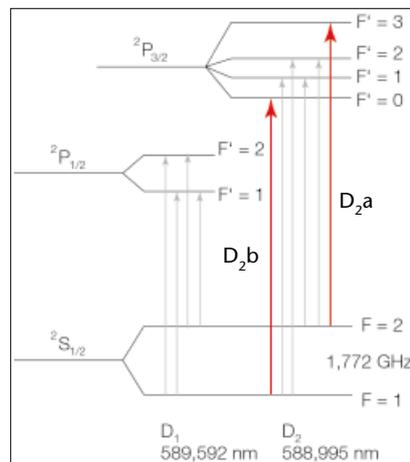


ABB.: Niveauschema für Natrium.

den letzten Jahren ist es der Lasergruppe der ESO jedoch gelungen, den Signallaser schmalbandig auf hohe Leistungen zu verstärken. Im Anschluss an den RFA wird der Laser in einem nichtlinearen Kristall auf 589 nm frequenzverdoppelt. Die RFA-Technologie wurde von TOPTICA bei der ESO lizenziert und in Kooperation mit der kanadischen Firma MPB Communications in den letzten zwei Jahren weiterentwickelt. Langjährige Erfahrung im Bereich des Laserkühlens führte dazu, dass ein sogenannter Rückpumper (siehe Infokasten 2), in die Auslegung des Lasers mit aufgenommen wurde. Dieser ermöglicht eine deutlich effizientere Anregung der Natriumatome im Vergleich zu bisherigen Systemen.

Der Einsatz von Leitsternen für die AO ist ein alter Traum aus den 50er Jahren. Schon vor der „Geburt“ des Lasers und bereits in den 1980er Jahren wurden erste praktische Versuche durchgeführt. Sowohl Militär als auch Astronomen waren früh an dieser Technik interessiert und sind mit dieser Fragestellung an die Laserentwickler herantreten. Erst 1991, zum Ende des Kalten Krieges, wurden diese militärischen Programme offengelegt. In all den Jahren wurde zwar intensiv nach geeigneten Lichtquellen gesucht, aber die vorhandenen Lasersysteme konnten aufgrund ihrer Komplexität und Größe nur schwer in moderne Teleskope an anspruchsvollen Standorten integriert werden. Durch die Kombination moderner Halbleiter mit leistungsstarker Faserlasertechnologie ist es nun innerhalb kürzester Zeit gelungen, diese Problematik erfolgreich zu lösen. Mit dem SodiumStar wird ein neuartiger Lasertyp für den tiefsten Blick ins All zur Verfügung stehen – und damit auf der Suche nach den Ursprüngen unseres Universums und nach extraterrestrischem Leben den Großteleskopen der nächsten Generation als Leitstern dienen.

### Referenzen

- [1] Martin J. Booth et al.: „Adaptive aberration correction in a confocal microscope“, PNAS 99, 5788 (2002)
- [2] „Adaptive Optik Online am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg“, Online Tutorium [http://www.mpia.de/homes/hippler/AOonline/ao\\_online\\_inhalt.html](http://www.mpia.de/homes/hippler/AOonline/ao_online_inhalt.html)
- [3] D. Bonaccini Calia et al.: „Optimization of cw sodium laser guide star efficiency“, Astron. & Astrophys. 510, A20 (2010)
- [4] D. Bonaccini Calia et al.: „First light of the ESO laser guide star facility“, Proc. SPIE 6272, 627207 (2006)

Während das Keck Teleskop auf Hawaii seit 2004 einen (gepulsten) Na-LGS betreibt, wurde 2006 der erste Dauerstrichlaser am VLT installiert [4]. Zur Erzeugung von Dauerstrich-Na-LGS wurden bislang Farbstofflaser oder Summenfrequenzmischung zweier Laser verwendet. Farbstofflaser basieren auf einer Lösung eines organischen Farbstoffes, die mit einem kurzwelligen, leistungsstärkeren Laser optisch gepumpt wird. Für Summenfrequenzmischung werden zwei IR-Laser in einem nichtlinearen Kristall überlagert, so dass die Summe der Frequenzen der beiden einzelnen Laser gerade die Resonanzwellenlänge von Natrium ergibt. Diese Lasertypen sind schwer für einen nachhaltigen Betrieb aufzubauen und benötigen für ihren Unterhalt qualifiziertes technisches Personal. Aus diesem Grund wurde viele Jahre nach einer Lösung gesucht, um 589 nm mit einem robusten Laser zu erzeugen, der die Anforderungen an einen Laserleitstern erfüllt. Er soll direkt in die Teleskopstruktur integriert werden können, und muss alle Bewegungen des Teleskops in einer Nacht ohne Ausfälle mitmachen. Er muss nicht nur in einer Höhe von bis zu 4000 Metern über einen großen Temperaturbereich zuverlässig arbeiten, sondern auch mittelschwere Erdbeben überstehen. Weiterhin sollte er sich wartungsarm in das Bedienkonzept eines modernen ferngesteuerten Teleskopmanagements einfügen.

### Durchbruch mit Dioden- und Faserlasern

Angeregt durch die Zusammenarbeit mit der ESO, hat die Münchener Firma TOPTICA Photonics AG seit dem Frühjahr 2009 einen schmalbandigen und beugungsbegrenzten Laser mit mehr als 20 W Ausgangsleistung bei 589 nm entwickelt. Dieser ‚SodiumStar‘ genannte Laser basiert auf einem nachverstärkten und frequenzverdoppelten Diodenlasersystem. Die ESO plant eines der vier Teleskope des VLT mit vier dieser Natrium-Laserleitsterne auszurüsten; diese werden symmetrisch um den Hauptspiegel angeordnet. Die Installation der finalen Lasersysteme am Teleskop ist bereits im Jahr 2013 geplant. Der SodiumStar besteht aus einem abstimmbaren, gitterstabilisierten Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 1178 nm als Signallaser. Dieser wird durch einen speziellen Raman-Faserverstärker (Raman fiber amplifier, RFA) auf Leistungen von über 35 W verstärkt. Bei diesem Verfahren werden der Signallaser und ein breitbandiger Pumplaser gemeinsam in eine optische Faser eingekoppelt. Aufgrund der stimulierten Raman-Streuung in der Faser wird der Signallaser auf hohe Ausgangsleistungen verstärkt. Der Nachteil dieser Methode war bislang eine vergrößerte Linienbreite. In