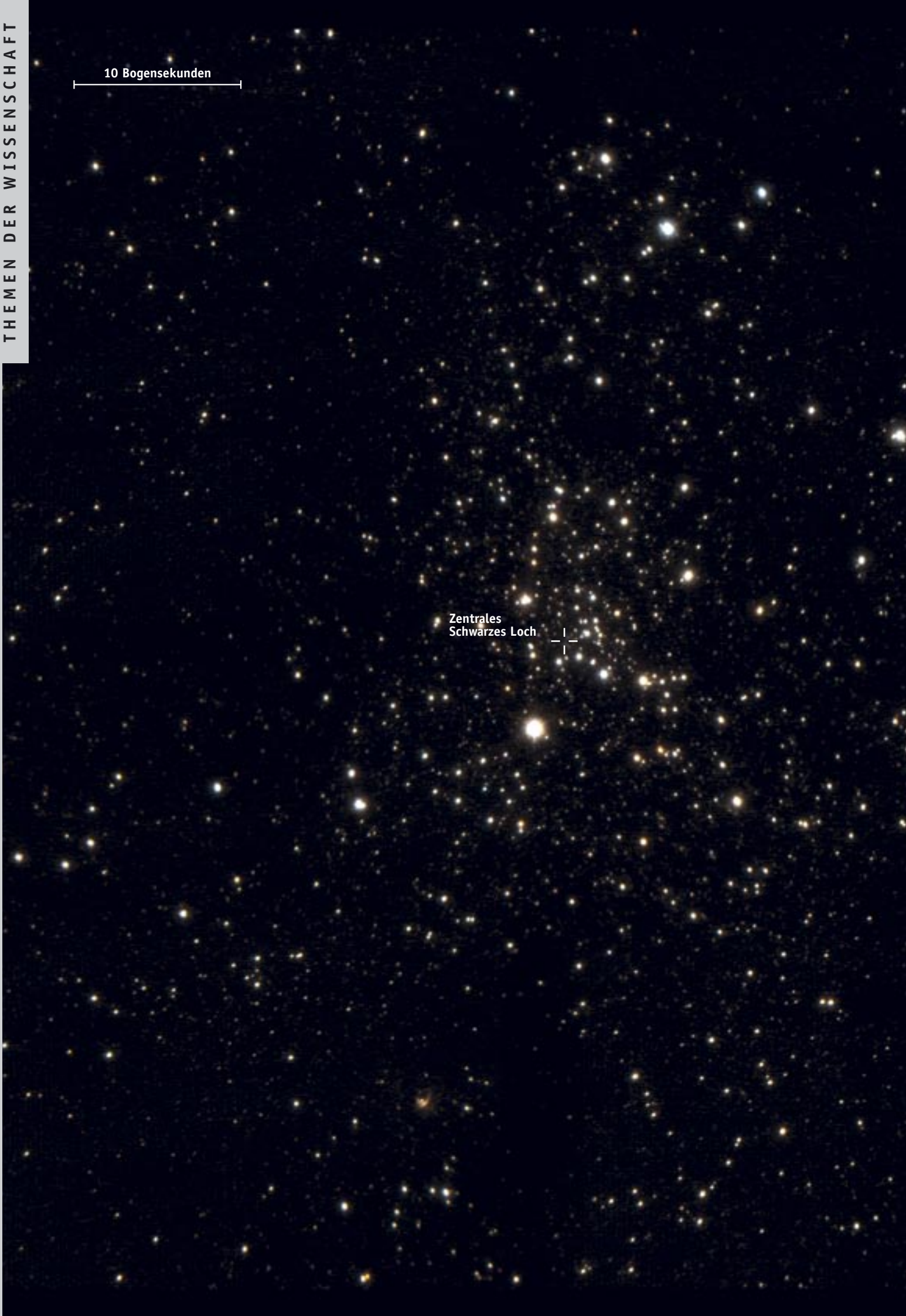
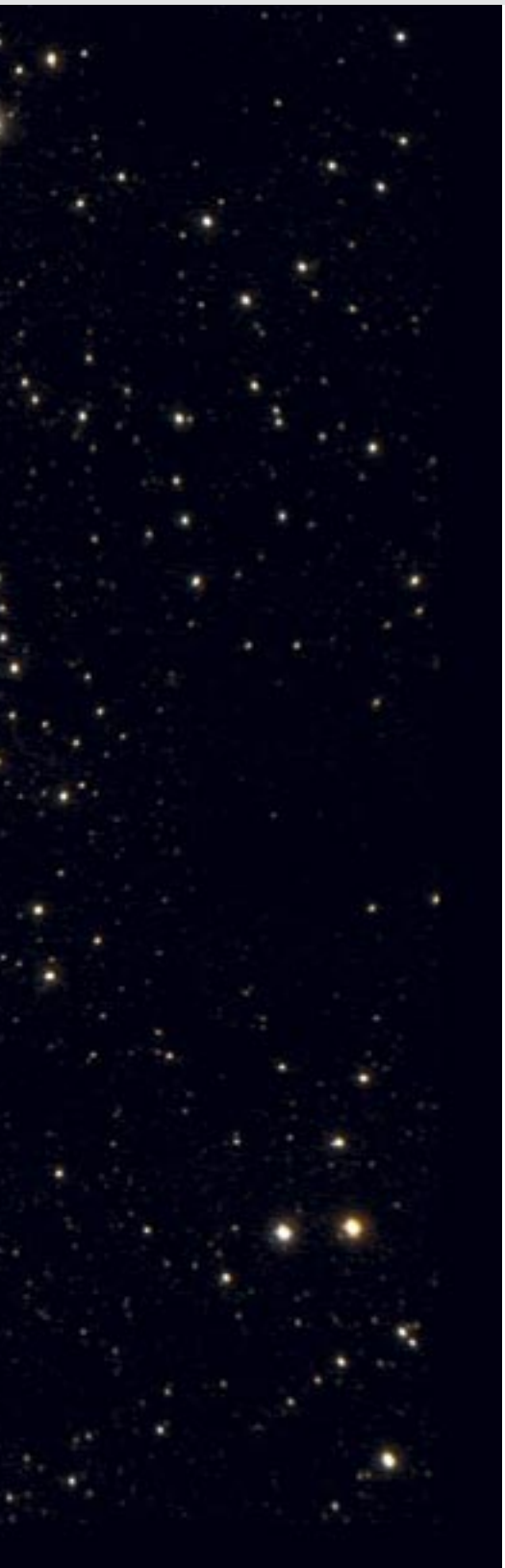

10 Bogensekunden
Zentrales
Schwarzes Loch

Didaktisches Material zu diesem Beitrag: www.wissenschaft-schulen.de und www.suw-online.de

# Künstliche Sterne und große Gesichtsfelder

## Adaptive Optik in der Astronomie, Teil 2

VON RICHARD DAVIES, STEFAN HIPPLER UND ROBERTO RAGAZZONI



Im ersten Teil dieses Artikels [1] wurden die Grundlagen der Adaptiven Optik zur Ausschaltung atmosphärischer Bildstörungen dargestellt. Es zeigte sich, dass zwei Faktoren ihren Nutzen stark einschränken: Ein relativ heller Leitstern muss innerhalb des Gesichtsfeldes stehen, und die Bildkorrektur ist nur in dessen unmittelbarer Nähe möglich. Hier geht es um die Überwindung dieser beiden Einschränkungen.

### Adaptive Optik: Eine Revolution in der Astronomie?

Anfang der 1990er Jahre schien es, als würde die Adaptive Optik (AO) die gesamte Astronomie revolutionieren. Nie wieder würden die Astronomen durch das atmosphärische Seeing eingeschränkt sein. Stattdessen wären mit den neuen Teleskopen der 8-Meter-Klasse im Infraroten (K-Band, Wellenlänge 2.2 µm) beugungsbegrenzte Aufnahmen mit 0.06 Bogensekunden Auflösung möglich.

Doch heute – mehr als zehn Jahre nach der ersten wissenschaftlichen Publikation des William-Herschel-Teleskops 1991 – erscheinen jährlich nur etwa 40 Veröffentlichungen, die auf Beobachtungen mit Hilfe der Adaptiven Optik basieren. Bis vor kurzem wurden für die meisten dieser Beobachtungen lediglich zwei AO-Systeme eingesetzt: ADONIS – ein Shack-Hartmann-System am 3.6-m-Teleskop der ESO auf La Silla in Chile – und PUEO – ein Curvature-System am 3.6-m-Canada-France-Hawaii-Teleskop auf dem Mauna Kea in Hawaii. Erst heute nimmt die Verbreitung der Adaptiven Optik in der astronomischen Forschung langsam zu.

Dafür gibt es zwei Gründe. Zum einen benötigt ein AO-System, um optimal arbeiten zu können, einen hellen Leitstern – idealerweise heller als 13 mag. Nur damit lassen sich hohe Strehl-Zahlen erreichen. (Die Strehl-Zahl ist das Verhältnis der maximalen Intensität im Bild einer Punktquelle zu ihrem beugungsbegrenzten theoretischen Wert.) Doch die meisten astronomischen Objekte sind um einiges schwächer und häufig auch nicht punktförmig. Daher kann das untersuchte Objekt selbst nicht als Leitstern benutzt werden, und ein separater Leitstern ist erforderlich. Aufgrund isoplanatischer Effekte (wie in [1] beschrieben) muss dieser Leitstern nicht nur genügend hell sein, sondern auch möglichst nahe am astronomisch interessanten Objekt stehen.

Im K-Band beträgt der maximal zulässige Winkel zwischen Leitstern und untersuchtem Objekt nur etwa 30 Bogensekunden. Sogar in der galaktischen Ebene ist daher die Chance, einen geeigneten Leitstern zu finden, sehr gering. Bei den Polen fällt sie aufgrund der viel geringeren Dichte heller Sterne bei höheren Strehl-Zahlen nahezu auf null (Abb. 1).

Um der Adaptiven Optik zum Durchbruch zu verhelfen, müsste man also entweder einen künstlichen Leitstern überall am Himmel erzeugen können, oder es müsste möglich sein, auch in größeren Abständen vom Leitstern eine gute Korrektur der Wellenfront zu erreichen be-

◀ Dieses Mosaikbild des Galaktischen Zentrums, ein Komposit aus Aufnahmen bei 2.1 und 3.8 Mikrometern Wellenlänge, entstand am 10-m-KECK-Teleskop auf Hawaii. Ein Natrium-Laserleitstern steuerte die Adaptive Optik. Die Winkelauflösung beträgt 0.056 Bogensekunden.

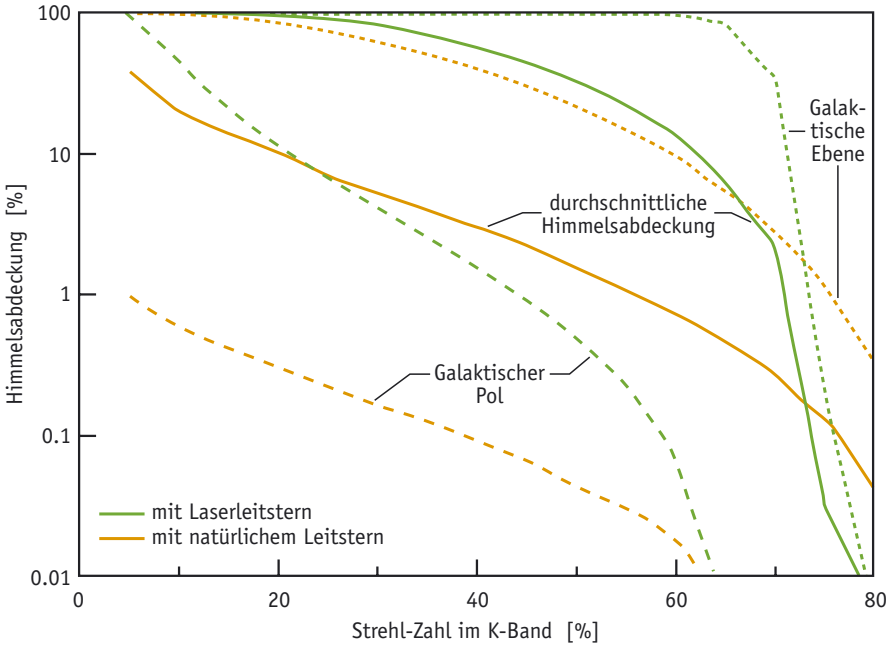



Abb. 1: Himmelsabdeckung einer Adaptiven Optik mit natürlichem Leitstern und Laserleitstern als Funktion der Strehl-Zahl im K-Band (Wellenlänge 2.2 µm).

Abb. 2: Der russische Physiker und Optiker Vladimir Pavlowitsch Linnik (1889–1984).

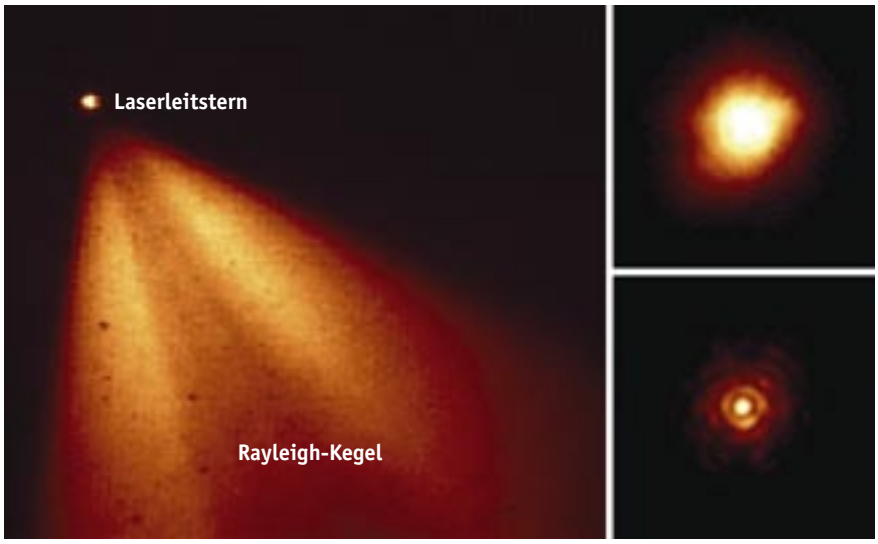



Abb. 3: Links – der Laserleitstern von ALFA, dem Laser-System auf dem Calar Alto, in ca. 90 km Höhe, mit kegelförmiger Rayleigh-Rückstreuung bis ca. 30 km Höhe. Rechts – Aufnahmen eines Sterns ohne (oben) und mit adaptiver Optik und Laserleitstern (unten). Beugungsringe sind erkennbar.

ziehungsweise lichtschwächere Leitsterne zu nutzen. Im Folgenden zeigen wir, wie sich mit neuen Technologien diese Forderungen erfüllen lassen.

## Künstliche Leitsterne

Bereits 1957 schlug der russische Physiker und Optiker Vladimir Pavlowitsch Linnik (1889–1984, Abb. 2) vor, mit einem Flugzeug über das Teleskop zu fliegen und mit einem hellen Scheinwerfer nach unten zu strahlen. Diese Idee wurde jedoch nie verwirklicht. Zur Erzeugung künstlicher Leitsterne war eine entscheidende neue Technologie nötig, nämlich die Entwicklung des Lasers seit 1958. In der US-Armee, wo man seit den 1970er Jahren die Entwicklung Adaptiver Optiken betrieb, wurde Anfang der 1980er Jahre mit der Entwicklung eines Laserleitsterns begonnen. Die Idee eines Laserleitsterns (LLS) zur Messung der Deformation der Wellenfront durch die Atmosphäre hatte zuerst Julius Feinleib von der Firma Adaptive Optics Associates in Boston. Er hatte das Beispiel der LIDAR-Experimente vor Augen (*Light Detection and Ranging*, eine ähnliche Technik wie RADAR, aber mit sichtbarem Licht anstatt Radiowellen), die einen von einem kleinen Teleskop ausgehenden Laserstrahl benutzten.

Das daraus resultierende Projekt, geleitet vom Amerikaner Robert Q. Fugate, gipfelte in der Entwicklung eines Systems am Starfire Optical Range, einem Stützpunkt der US Air Force in New Mexico. Dabei wurde ein gepulster grüner Laser an einem 1.5-m-Teleskop installiert und auf eine Höhe von 15 Kilometer fokussiert. Hierbei wird das Licht von den Luftmolekülen zurückgestreut (die so genannte *Rayleigh-Streuung*) und anschließend mit einem Detektor im AO-System registriert.

Die Rückstreuung geschieht entlang des gesamten Weges des Laserlichts durch die Atmosphäre. Daher muss die zeitliche Abstimmung des Detektors auf die einzelnen Pulse des Lasers sehr genau sein, damit der Detektor nur den Teil des Pulses sieht, der aus 15 Kilometer Höhe zurückkommt. Ist dies gewährleistet, so sieht das AO-System einen hellen, kompakten Punkt, der genau wie ein natürlicher Leitstern benutzt werden kann, um die Deformation der ankommenden Wellenfront zu bestimmen.

Unabhängig von diesem bis 1992 geheimen Militärprojekt hatten auch zwei französische Astronomen – Antoine Labeyrie und Renaud Foy am Centre de Recherche en Géodynamique – schon 1985 die Idee, einen Laserleitstern für die Adaptive Optik zu nutzen. Sie schlugen jedoch ein anderes Konzept vor, nämlich Atome in der Mesosphäre, in einer Höhe von etwa 90 Kilometern, mit einem Laserstrahl anzuregen.

In dieser Höhe führen Ablagerungen durch Meteoriten in einer etwa zehn Kilometer dicken Schicht zu einer stark

überhöhten Dichte an Eisen-, Natrium-, Kalium- und anderen schweren Atomen. Wie sich herausstellte, bieten die Natriumatome die beste Möglichkeit, einen hellen Laserleitstern zu erzeugen. Labeyrie und Foy schlugen vor, diese Natriumatome mit einem Laser der Wellenlänge 589 Nanometer zu bestrahlen, um sie aus ihrem Grundzustand heraus anzuregen. Die dadurch induzierte Emission der Natrium-D2-Linie (gelbes Straßenlicht) könnte einen so genannten Natrium-Leitstern erzeugen.

Dieser Natrium-Leitstern wurde zuerst am 3-m-Shane-Teleskop des Lick-Observatoriums in Kalifornien und mit dem ALFA-System am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto [2] getestet, wobei bereits beachtliche Strehl-Zahlen erreicht wurden. Die ersten erfolgreichen Beobachtungen der beiden Gruppen gelangen im September 1996 beziehungsweise im Dezember 1997. In den folgenden Jahren konnten am ALFA-System Strehl-Zahlen von etwa 20 Prozent (Abb. 3), am Lick-Observatorium sogar von 60 Prozent erreicht werden. Aber beide Gruppen hatten bald auch ganz neue Probleme zu lösen.

## Neue Schwierigkeiten

Das erste Problem eines Laserleitsterns ist der in Abb. 4 dargestellte, so genannte fokale Anisoplanatismus, auch Kegeleffekt genannt. Die Ursache dafür ist die endliche Höhe des Laserleitsterns: 15 bis 25 Kilometer für einen Rayleigh-LLS und etwa 90 Kilometer für einen Natrium-LLS. Auf seinem Rückweg ins Teleskop durchquert das Licht nur einen kegelförmigen Bereich der Atmosphäre, während das Licht von den fernen astronomischen Objekten einen zylindrischen Bereich durchquert (Abb. 4, links).

Daher ist die gemessene Deformation der Wellenfront des LLS geringfügig anders als die des Sternlichts. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je größer das Teleskop und je geringer die Höhe des Laserleitsterns in der Atmosphäre ist. Bei Teleskopen mit Öffnungen von acht Metern und mehr ist er bereits so groß, dass alle heutigen Projekte einen Natrium- und keinen Rayleigh-Laserleitstern benutzen.

Eine zweite Schwierigkeit bei Laserleitsternen liegt darin, dass der Laserstrahl vom Boden aus hochgeschossen wird, um den künstlichen Stern zu erzeugen. Wie auf dem Weg durch die Atmosphäre nach unten, wird die Wellenfront des Lichts auch auf dem Weg nach oben deformiert. Dies führt dazu, dass der Laserleitstern hin und her wackelt (Abb. 4, rechts). Benutzt man zur Projektion des Lasers ein Teleskop mit mehr als 50 Zentimeter Öffnung, so lässt sich dieses Wackeln zwar auf ein Minimum reduzieren, doch kann die Bewegung des LLS nicht ganz verhindert werden.

Die gemessene Verkippung der Wellenfront ist dann eine Kombination von Aufwärts- und Abwärtsbewegung, und die einzelnen Anteile lassen sich prak-

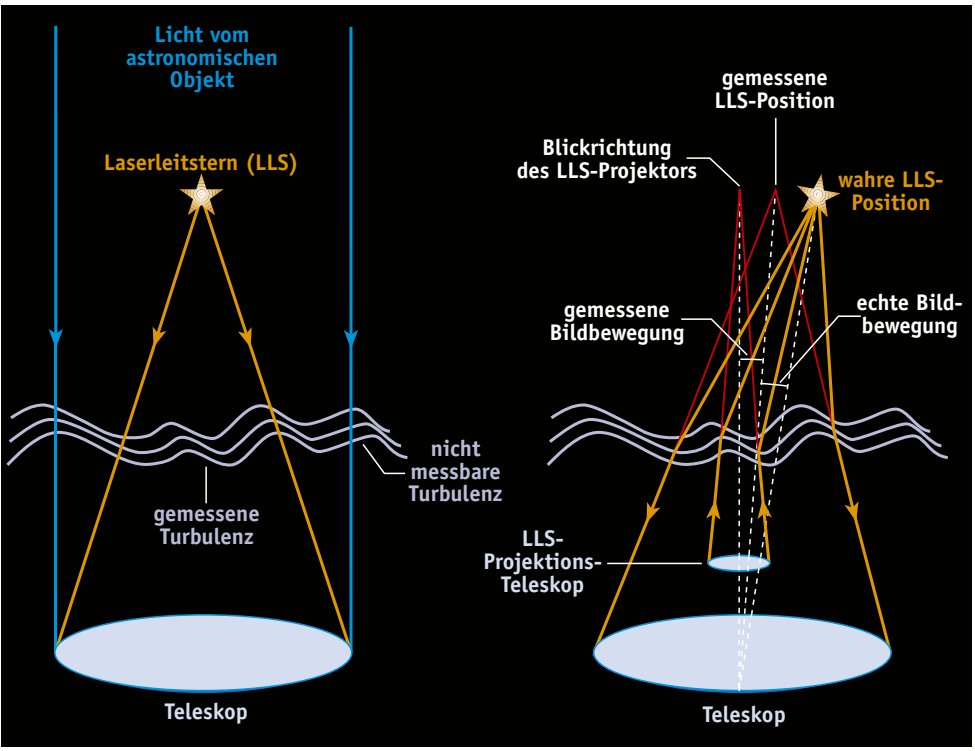



Abb. 4: Links – Kegeleffekt bei der Verwendung von Laserleitsternen (LLS). Rechts – Aus der gemessenen Position des Laserleitsterns lässt sich die von der Atmosphäre verursachte Bildverkippung nicht bestimmen.

wis
wissenschaft in die schulen!

**Klaus Tschira Stiftung gGmbH, Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen, Max-Planck-Institut für Astronomie**

ermöglichen jetzt durch ihre Kooperation die Entwicklung und Bereitstellung neuer praxisnaher Unterrichtsmaterialien für den Physikunterricht.

Ein erfahrener Mitarbeiter der Landesakademie entwickelt im Rahmen dieser Zusammenarbeit zur Zeitschrift STERNE UND WELTRAUM passendes didaktisches Material. Der Praxistest erfolgt in den Lehrerfortbildungskursen der Landesakademie und in monatlichen Unterrichtsstunden an einer ausgewählten Stützpunktschule.

STERNE UND WELTRAUM ist seit Herbst 2003 Partner der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!«.
Diese Initiative des SPEKTRUM Verlages bietet Schülern und Lehrern naturwissenschaftlicher Fächer kostenlos hochwertige didaktische Zusatzmaterialien für den Unterricht.

**Weitere Informationen:**
Wissenschaft in die Schulen
www.wissenschaft-schulen.de
Klaus Tschira Stiftung gGmbH
www.kts.villa-bosch.de
Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen
www.sal-ds.vs.bw.schule.de
Max-Planck-Institut für Astronomie www.mpia-hd.mpg.de

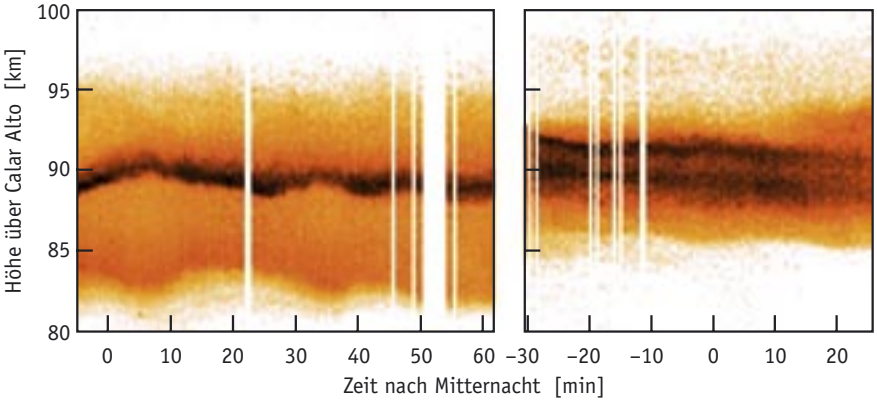



Abb. 5: LIDAR-Messungen der Natriumdichte in der Mesosphäre an zwei Tagen.

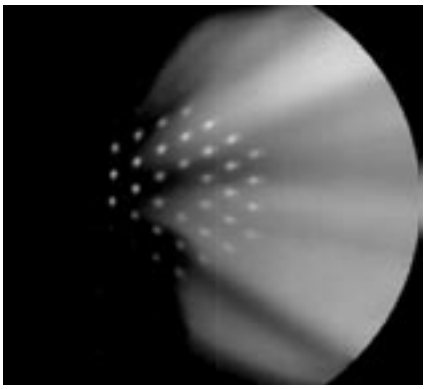
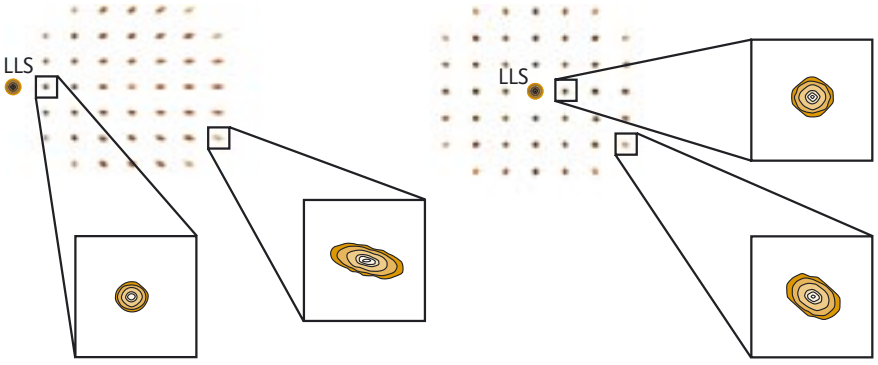


Abb. 7: Aufnahme des Keck-Laserleitsterns an verschiedenen Stellen des KECK-10-m-Spiegels.




seitliche LLS-Projektion

zentrale LLS-Projektion

Abb. 6: Das Bild des Laserleitsterns an verschiedenen Stellen der Teleskoppupille.

tisch nicht voneinander trennen. Alle heute betriebenen Laserleitsternsysteme benötigen daher zusätzlich einen natürlichen Leitstern, um die atmosphärische Bildverkippung (*Tilt*) zu messen. Da dieser so genannte *Tip-tilt-Stern* aber bis zu 60 Bogensekunden vom Beobachtungsobjekt entfernt und bis zu etwa 19 mag schwach sein darf (weil die Bildverkippung mit der gesamten Teleskop-Apertur gemessen wird), ist dies in der Praxis keine wesentliche Einschränkung.

Die dritte Schwierigkeit mit den Laserleitsternen liegt in der Variation der Höhe der Natriumschicht im Laufe einer Nacht (Abb. 5): Der Fokus des Laserleitsterns muss dieser Veränderung folgen, denn anderenfalls wird der deformierbare Spiegel defokussiert und das Beobachtungsobjekt erscheint entsprechend unscharf. Innerhalb von einer bis zwei Minuten kann sich die Höhe der Natriumschicht durchaus um bis zu 400 Meter verändern. An einem 8-m-Teleskop kann dadurch die Strehl-Zahl um bis zu zehn Prozent im K-Band (und wesentlich mehr bei kürzeren Wellenlängen) verschlechtert werden.

Doch glücklicherweise lässt sich dieser Effekt mit Hilfe des Wellenfrontsensors messen, denn im zeitlichen Mittel sollte die von der Atmosphäre verursachte Defokussierung null sein. Wird ein zeitlicher Mittelwert ungleich null gemessen, so ist dies höchst wahrscheinlich durch eine Änderung der Höhe der Natriumschicht verursacht und kann entsprechend korrigiert werden, ohne das Bild des Beobachtungsobjekts zu verschlechtern.

Schließlich führt die endliche Dicke der Natriumschicht zu einem zigarrenförmigen LLS. Liegt dieser LLS nicht exakt in der Blickrichtung des Teleskops, so erscheint er nicht mehr rund, sondern leicht elliptisch (Abb. 6 links). Aus diesem Grund wurde für das europäische *Very Large Telescope* (VLT) in Chile beschlossen, den Laser von direkt oberhalb des Sekundärspiegels hochzuschießen, damit kein Teil des Hauptspiegels mehr als vier Meter von der Achse des (zigarrenförmigen) LLS entfernt ist. Hingegen wird am 10-m-KECK-Teleskop auf dem Mauna Kea der LLS von der einen Seite des Teleskops aus projiziert (Abb. 7) und erscheint von der anderen Seite aus bis zu 2.5 Bogensekunden groß, was die Leistung des AO-Systems beeinträchtigt.

## Der richtige Laser

Sind alle diese Probleme gelöst, so bleibt noch die technologische Herausforderung, einen brauchbaren Laser zu bauen. Da es für Laser mit 589 Nanometer Wellenlänge keine kommerzielle Anwendung gibt, müssen die Astronomen die nötige Entwicklungsarbeit selbst leisten. Die ersten auf dem Calar Alto (ALFA, [2]) und am Lick-Observatorium benutzten Laser basieren auf dem selben Prinzip: Hochleistungslaser regen Moleküle in einer Farbstofflösung an, und die Wellenlänge des von diesen Molekülen abgestrahlten Lichts wird auf den gewünschten Wert eingestellt.

Die ersten beiden Systeme für 8-m-Teleskope wurden vom Lick- beziehungsweise vom ALFA-Team entwickelt: Es handelt sich um das LLS-System für das KECK-II-Teleskop, gebaut vom *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), und um das LLS-System für das 8.2-m-Teleskop des VLT auf dem Cerro Paranal in Chile mit seinem PARSEC (*Paranal Artificial light Source for Extendend Coverage*) genannten Laser. Dieses System wurde von den Max-Planck-Instituten für extraterrestrische Physik in Garching und für Astronomie in Heidelberg entwickelt und gebaut. Beide Systeme brachten eine wesentliche Verbesserung verglichen mit den Lasern der ersten Generation – sowohl in Hinblick auf die erzielte Ausgangsleistung, als auch auf den Grad der Automatisierung.

Heute werden neue Techniken eingesetzt. Der Laser für das GEMINI-Nord-Teleskop auf Hawaii ist ein Frequenzsummen-Laser, der zwei infrarote Laser in einem speziellen Kristall so überlagert, dass der resultierende Laserstrahl genau die Summe der Frequenzen der beiden einzelnen Laser hat. LLNL entwickelt hingegen zusammen mit der ESO in Garching einen Faser-Laser, bei dem das Laserlicht direkt innerhalb einer optischen Faser erzeugt wird.

Ziel all dieser Systeme ist es, einen Laser zu erzeugen, der die Natriumatome in der Mesosphäre so effizient wie möglich anregt und zugleich robust und einfach zu handhaben ist. Doch bis jetzt gibt es noch keine Einigkeit über die beste Strategie. Soll beispielsweise der Laser kontinuierlich sein oder nur gepulst? Sollte es ein 10-MHz-Einzelfrequenz-Laser oder doch besser ein 3-GHz-Breitband-Laser sein? Wie hoch sollte seine Leistung sein? Ist es

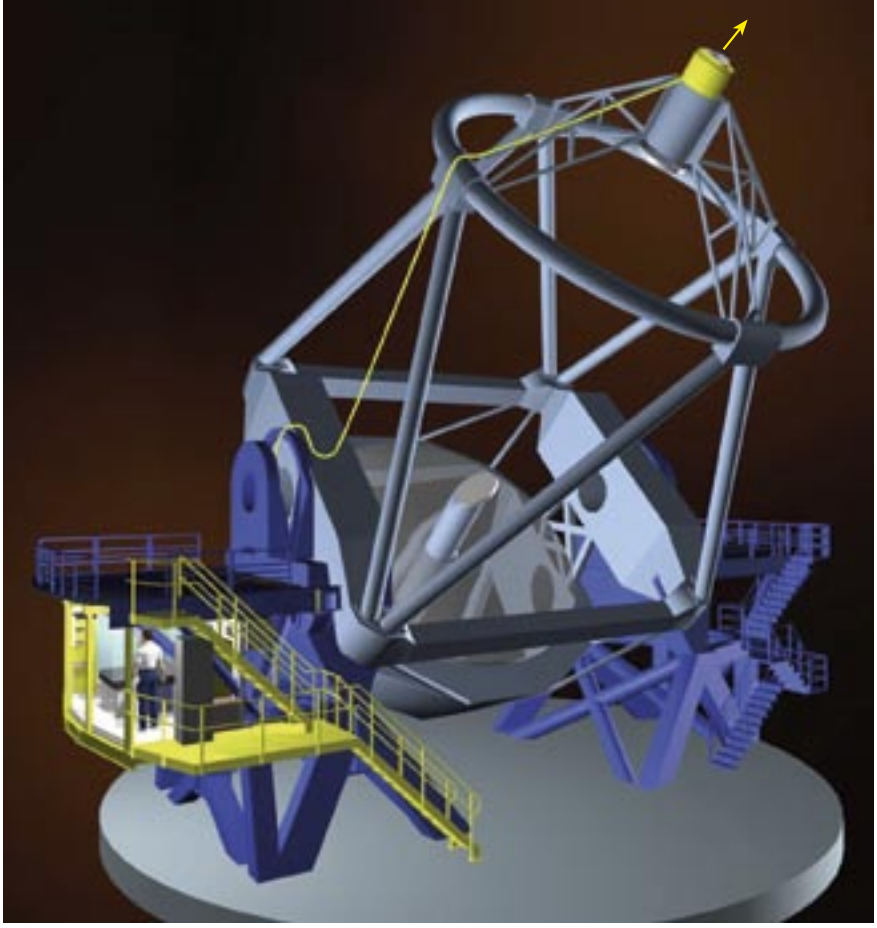
besser, den Laser von der Seite des Teleskops aus zu projizieren oder von oberhalb des Sekundärspiegels? Welche Sicherheitsmaßnahmen müssen eingebaut werden? Wie lässt sich verhindern, dass Flugzeuge durch den Strahl fliegen?

## Der Laserleitstern am VLT

Wir beschränken uns hier auf eine kurze Beschreibung des Laserleitstern-Systems für das 8.2-m-Teleskop des VLT auf dem Cerro Paranal in Chile. Dieses System wird erstmals im Mai 2005 am Teleskop installiert (Abb. 8).

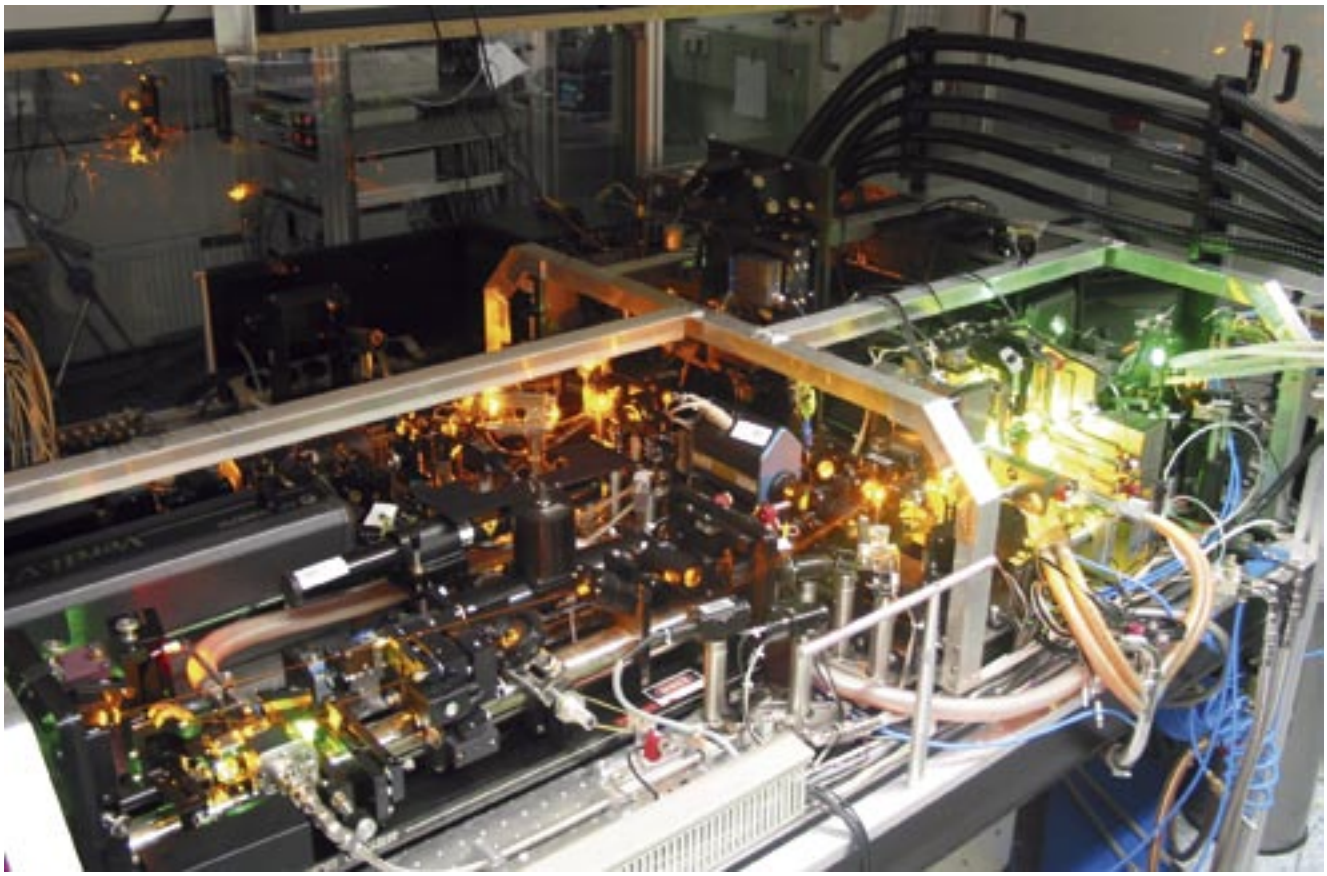
PARSEC, der Laser dieses Systems (Abb. 9), ist ein kontinuierlicher Einzelfrequenzlaser. Er besteht aus fünf Festkörper-Pumplasern, jeder davon hat eine Leistung von zehn Watt, seine Wellenlänge von 532 Nanometer ist genau auf den verwendeten Farbstoff (Rhodamine 6G) abgestimmt, der in Äthylenglykol gelöst ist und durch drei Saphir-Ventile mit nahezu 30 bar durch den Laserstrahl der Pumplaser geschossen wird. Jeder der drei Strahlen aus gelöstem Farbstoff ist nur 0.2 Millimeter dick und hat eine Geschwindigkeit von 40 Metern pro Sekunde. Einer der Farbstoffstrahlen befindet sich innerhalb des Hauptlasers, der ein abgewandelter kommerzieller Ringlaser ist.

Ringlaser sind komplizierter als lineare Laser, aber ihre Effizienz ist höher, da das Licht keine stehenden Wellen bilden kann. Der Hauptlaser ist äußerst stabil und produziert einen nahezu perfek-



▲ Abb. 8: Das VLT-Teleskop YEPUN mit dem am Frontring montierten Laserprojektionsteleskop (gelb). Der Laser selbst befindet sich in der Kabine unterhalb der Nasmyth-Fokusstation. Der Pfeil zeigt in Richtung des Laserleitsterns.

▼ Abb. 9: Der von den Max-Planck-Instituten für extraterrestrische Physik und Astronomie für das VLT gebaute Laser PARSEC im Labor. Vorne links der Hauptlaser (oranges Licht), hinten rechts der Verstärkerlaser (gepumpt mit grünem Licht).



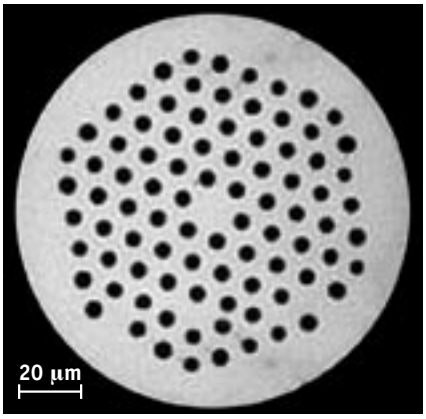



Abb. 10: Photonische Kristallfaser mit Siliziumkern und mikroskopisch kleinen Luftröhrchen.

ten Laserstrahl, der in einen Verstärker gespeist wird. Dieser Verstärker ist ein speziell gefertigter Resonanzhohlraum und beinhaltet die anderen beiden Farbstoffstrahlen. Durch die Kopplung an den Hauptlaser sind alle drei Laserstrahlen in Resonanz miteinander, womit die Leistung bis auf 20 Watt gesteigert werden kann. Während des normalen Betriebs wird PARSEC aber wohl eher bei 10 bis 12 Watt arbeiten.

Der Ausgangsstrahl des Laser-Moduls von PARSEC wird durch eine Glasfaser zum Teleskop übertragen (Abb. 8). Allerdings haben die bisher verfügbaren Ein-Moden-Glasfasern einen Kanal von nur etwa vier Mikrometern Durchmesser. Fokussiert man die zehn Watt des Lasers auf eine so kleine Fläche, so ergibt sich eine enorme Energiedichte von etwa $10^{12}$ Watt pro Quadratmeter. Bei solchen Energiedichten treten nichtlineare Effekte auf, die dazu führen, dass das meiste Licht bereits am Fasereingang zurückgeworfen wird.

Um dies zu umgehen, gibt es zwei Tricks. Zum einen verwendet man keine gewöhnliche Ein-Moden-Glasfaser, sondern eine neuartige »Photonische Kristallfaser« Diese besteht aus einem Silikatkern mit 15 Mikrometern Durchmesser, umgeben von zahlreichen mikroskopisch kleinen »Luftlöchern«, wodurch das Licht aufgrund von Totalreflexion im Kern gefangen bleibt (Abb. 10). Der zweite Trick ist, das einfarbige Laserlicht durch einen Hochleistungsmodulator in vier verschiedene Farben aufzuteilen (Abb. 11). Bei einem Unterschied in der Frequenz von jeweils 100 Megahertz bewegen sich die Laserstrahlen voneinander unabhängig durch die Faser. Mit diesen beiden neuen Technologien ist es gelungen, die Energiedichte des Strahls weit unter die Schwelle für nichtlineare Effekte abzusenken.

Das andere Ende der Faser befindet sich am Projektionsteleskop auf dem oberen Haltering des Hauptteleskops. Dort gibt es auch zwei Kameras, die den Luftverkehr überwachen. Obwohl der aufgeweitete Strahl bereits zu schwach ist, um Schaden anzurichten, wird er dennoch automatisch abgeschaltet, sobald ein Flugzeug entdeckt wird, um die Piloten nicht zu blenden.

## Eine strahlende Zukunft für Laserleitsterne

Die erste erfolgreiche Korrektur der Wellenfrontdeformation durch einen Laserleitstern der neuen Generation an großen Teleskopen wurde am 7. Oktober 2003 bekannt gegeben (Abb. 12). Damals gelang es Peter Wizinowich und seinem Team, am 10.2-m-Teleskop KECK II während ei-

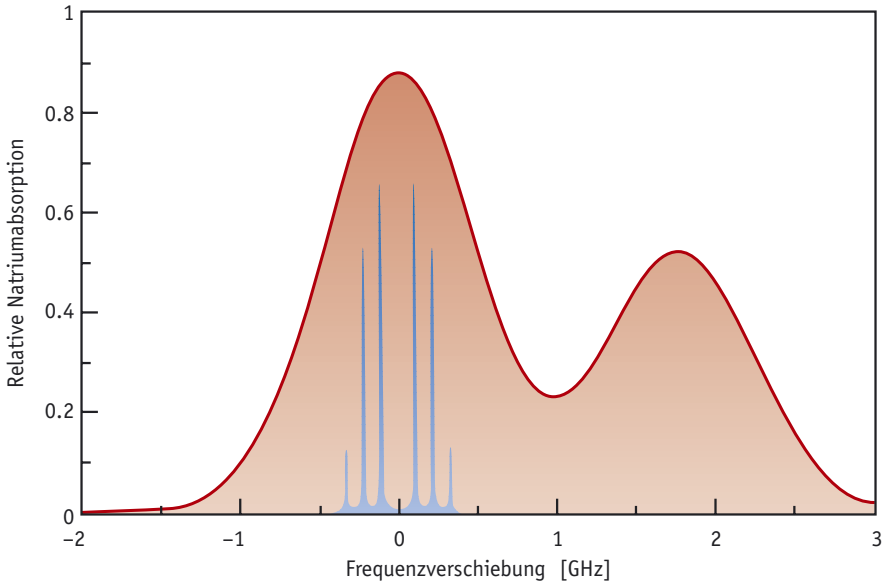



Abb. 11: Aufteilung des Laserlichts in vier um jeweils 100 MHz verschobene Farben (blau). Die rote Kurve zeigt die Absorptionswahrscheinlichkeit der Natrium-D2-Linie mit den beiden Maxima entsprechend der Hyperfeinstrukturaufspaltung des Natrium-Grundzustandes.

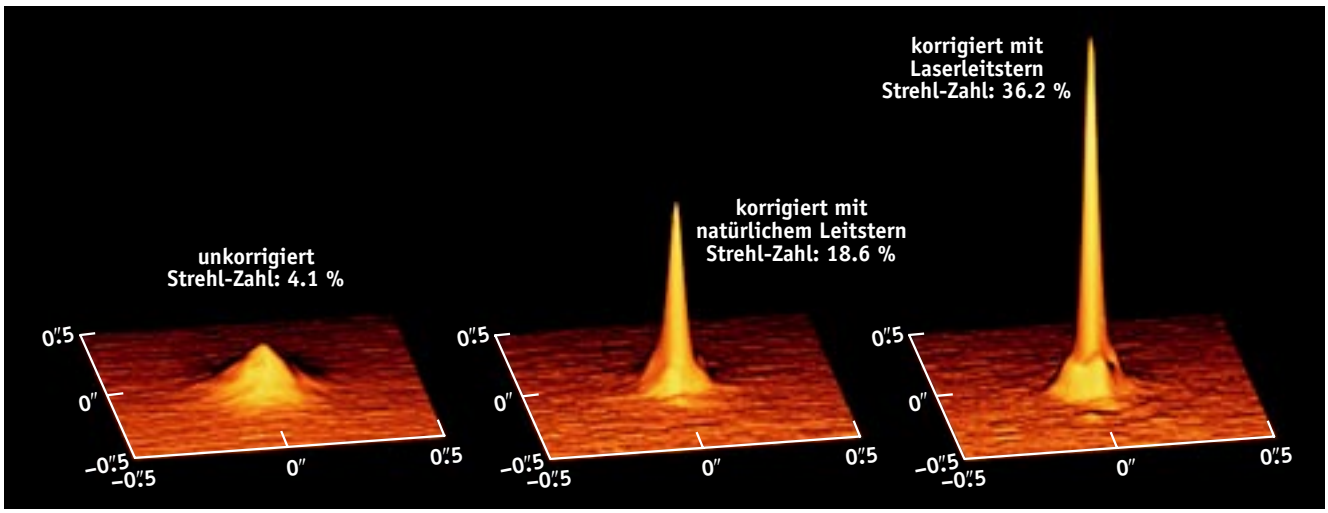



Abb. 12: Erste Ergebnisse der Adaptiven Optik am KECK-Teleskop. Links – Aufnahme eines Sterns ohne Adaptive Optik. Mitte – mit Adaptiver Optik und lichtschwachem natürlichem Leitstern. Rechts – mit Adaptiver Optik und Laserleitstern.

ner Nacht mit äußerst gutem Seeing die Adaptive Optik zunächst an einem nur 14 mag hellen natürlichen Stern zu betreiben und eine Strehl-Zahl von 19 Prozent zu erreichen. Dann konnte mit dem Laserleitstern als Referenz die Strehl-Zahl bis auf 36 Prozent gesteigert werden.

Dieses einfache Ergebnis von einem hochkomplexen Stück Ingenieurskunst gibt einen Ausblick darauf, was mit Laserleitsternen und Adaptiver Optik in naher Zukunft möglich sein wird. Im Mai 2005 soll am VLT in Chile der erste Laser installiert werden und hoffentlich bald danach für die astronomische Nutzung einsatzbereit sein. Wenig später wird das Lasersystem des GEMINI-Teleskops auf Hawaii zum Einsatz kommen.

Im Folgenden geht es um Methoden und Technologien der Adaptiven Optik für die nächste Generation bodengebundener Großteleskope.

## Großteleskope von morgen: atmosphärische Tomographie und Multikonjugierte Adaptive Optik

**Die dritte Dimension:** Bei den bisher beschriebenen Formen der Adaptiven Optik kommt es nicht so sehr darauf an, in welcher Höhe zwischen dem zu beobachtenden Objekt und dem Teleskop die Wellenfront durch die atmosphärischen Turbulenzen gestört wird. Betrachten wir zum Beispiel einen Lichtstrahl, der auf eine gewisse Stelle des Hauptspiegels eines 8- oder 10-m-Teleskops trifft, so interessiert allein die Abweichung dieses Strahls von der Geraden, die er ohne Turbulenz beschreiben würde. Die Details, wo genau in der etwa 20 Kilometer hohen Atmosphäre der Lichtstrahl abgelenkt wird, werden vernachlässigt: In dieser Form betrachtet die Adaptive Optik die Atmosphäre nur als zweidimensionale, flache Scheibe – ihr fehlt die dritte Dimension!

Deshalb sind die Bilder herkömmlicher Systeme der Adaptiven Optik auf einen nur sehr kleinen Bereich um den Leitstern herum beschränkt (Anisoplanatismus, vgl. [1]). Sobald man aber diese Einschränkung überwinden, also den Bereich vergrößern möchte, innerhalb dessen die Korrektur durch die Adaptive Optik akzeptabel ist, wird die genaue Lage der Turbulenzen in der Atmosphäre entscheidend.

Diesen Effekt erläutert Abb. 13: Angenommen, die Turbulenzen in der Atmosphäre beschränken sich auf eine dünne Schicht direkt über dem Teleskop. Dann ist die Aberration der Wellenfronten die gleiche, egal wo das zu beobachtende Objekt am Himmel steht. Sind die Turbulenzen jedoch wesentlich weiter vom Teleskop entfernt, so ist die Deformation der am Teleskop eintreffenden Wellenfronten für jede Beobachtungsrichtung eine andere. Als anschauliches Beispiel dafür betrachten wir die Plejaden (Abb. 14). Ihre beiden hellsten Sterne, Alcyone und Atlas, sind nur 0.5 Grad von einander entfernt. Dies ist eine kleine Entfernung für die herkömmliche Astrophotographie, aber für die Adaptive Optik ist sie riesig.

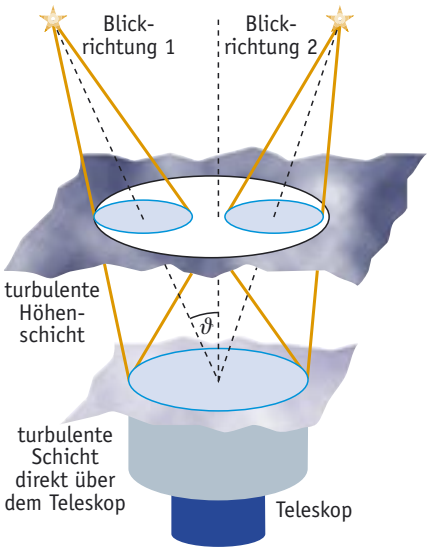



Abb. 13: Wellenfrontdeformationen für zwei Blickrichtungen und zwei turbulente Schichten über dem Teleskop.

Abb. 14: Das Siebengestirn, dessen beide hellsten Sterne Atlas und Alcyone etwa 0.5 Grad auseinander liegen. (Bild: HST)

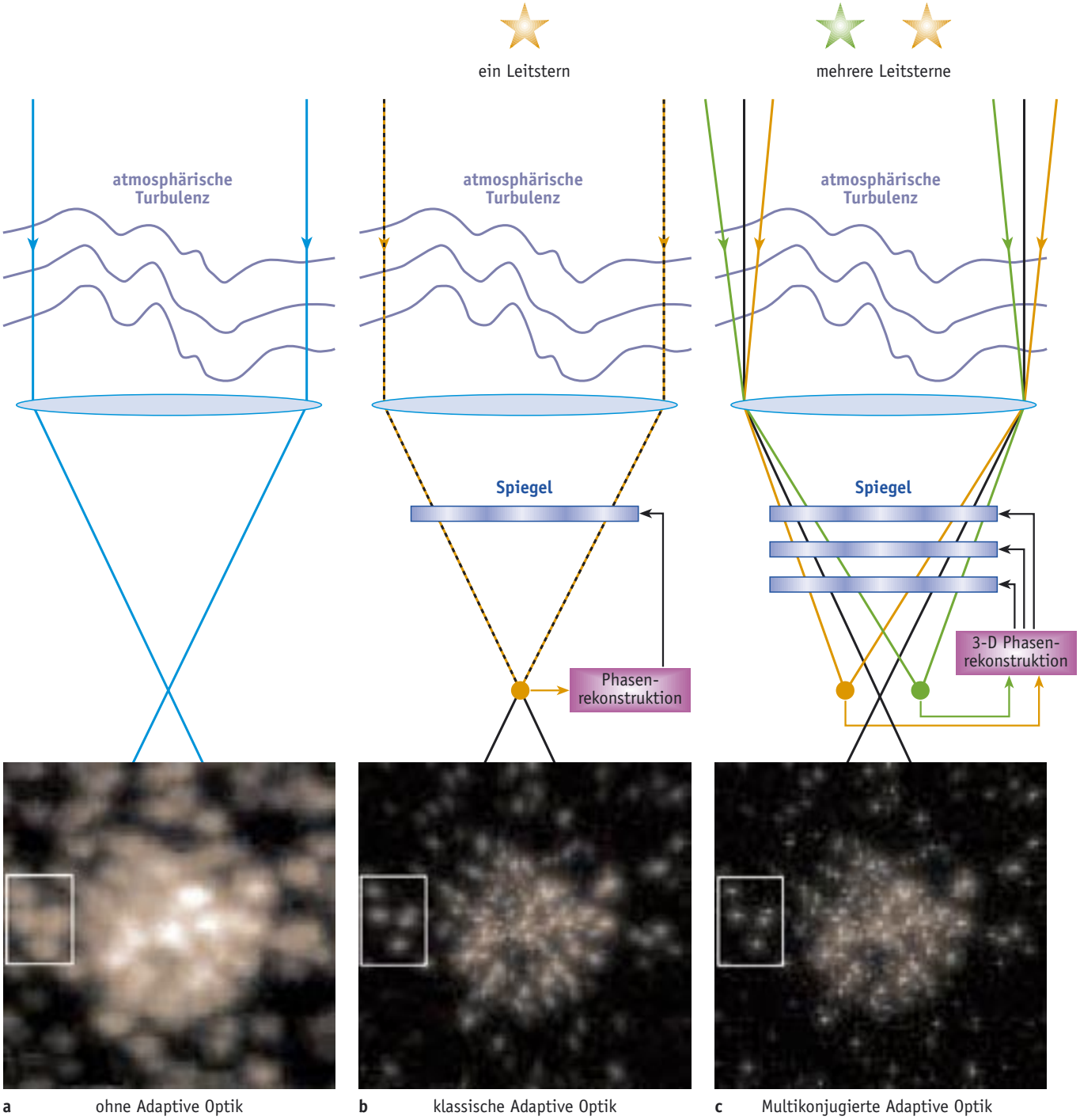



Abb. 15: Oben – Funktionsprinzip der Multikonjugierten Adaptiven Optik (c) im Vergleich zur herkömmlichen Adaptiven Optik (b) und ohne Adaptive Optik (a). Unten – simulierte Ergebnisse.

Warum? Befinden sich die Turbulenzen in einer Höhe von, sagen wir, zehn Kilometern, so verlaufen die Lichtstrahlen dieser beiden Sterne, die auf die gleiche Stelle des Hauptspiegels treffen, in dieser Höhe bereits 87 Meter voneinander entfernt. Die beiden Lichtstrahlen werden also von den Turbulenzen vollkommen unterschiedlich beeinflusst, das heißt: Die Korrektur der Wellenfronten mit dem einen Stern als Leitstern ist für den anderen komplett falsch – und umgekehrt!

**Ein deformierbarer Spiegel hilft, aber zwei oder drei helfen noch viel mehr...** Herkömmliche Adaptive Optik ermöglicht beugungsbegrenzte Aufnahmen nur innerhalb eines sehr kleinen Gesichtsfeldes, viel kleiner als beispielsweise die Ausdehnung der Plejaden. Zur Lösung dieses Problems muss die dritte Dimension berücksichtigt, also in Echtzeit nicht nur die Deformationen der Wellenfront bestimmt werden, sondern auch die Höhe, in der sie in der Atmosphäre erzeugt werden. Im zweiten Schritt müssen diese Deformationen an entsprechender Stelle im Strahlengang des Teleskops korrigiert werden.

Dieses Konzept, welches als Multikonjugierte Adaptive Optik (MCAO) bezeichnet wird, wurde 1988 von Jacques Beckers vorgeschlagen. Hierbei werden die Störungen in verschiedenen Schichten der Atmosphäre korrigiert, indem zu jeder dieser Schichten ein deformierbarer Spiegel konjugiert wird (Abb. 15). Konjugiert bedeutet, dass der Spiegel an genau die optische Position in den Strahlengang gesetzt wird, an der die entsprechende turbulente Schicht der Atmosphäre scharf abgebildet wird. In unserem Beispiel hätte das adaptiv-optische System einen deformierbaren Spiegel, der die Turbulenzen nahe am Boden korrigiert, und einen zweiten, welcher die Turbulenzen in einer Höhe von zehn Kilometern kompensiert.

Werden beide Spiegel richtig gesteuert, und nimmt man weiterhin an, dass die Turbulenzen außerhalb dieser bei-

den Schichten vernachlässigbar sind, so ist eine Korrektur der Deformation der Wellenfronten über einen viel größeren Winkelbereich möglich. Die gesamten Plejaden lassen sich dann mit beugungsbegrenzter Schärfe abbilden. Momentan versuchen weltweit mehrere Arbeitsgruppen dieses Ziel zu erreichen. Wir geben hier einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand. Doch der Leser sei gewarnt: Den meisten der hier präsentierten Ergebnisse fehlt noch der ultimative Test am Himmel!

■ **Die Höhe der Turbulenzen:** Bisher gab es die meisten Fortschritte bei der Messung der Deformation der Wellenfront in Abhängigkeit von der Höhe über dem Teleskop. Diese Messung ist eine Variante der Tomographie der atmosphärischen Turbulenzen. Eine uns allen vertraute Form der Tomographie ist unser zweiäugiges Sehen. Es ermöglicht uns, die Entfernung naher Objekte abzuschätzen, da ihre scheinbare Position vor einem entfernten Hintergrund, mit je einem Auge gesehen, leicht unterschiedlich ist. Um die Höhe der atmosphärischen Turbulenzen zu messen, muss man sie – ganz ähnlich – aus zwei verschiedenen Richtungen betrachten.

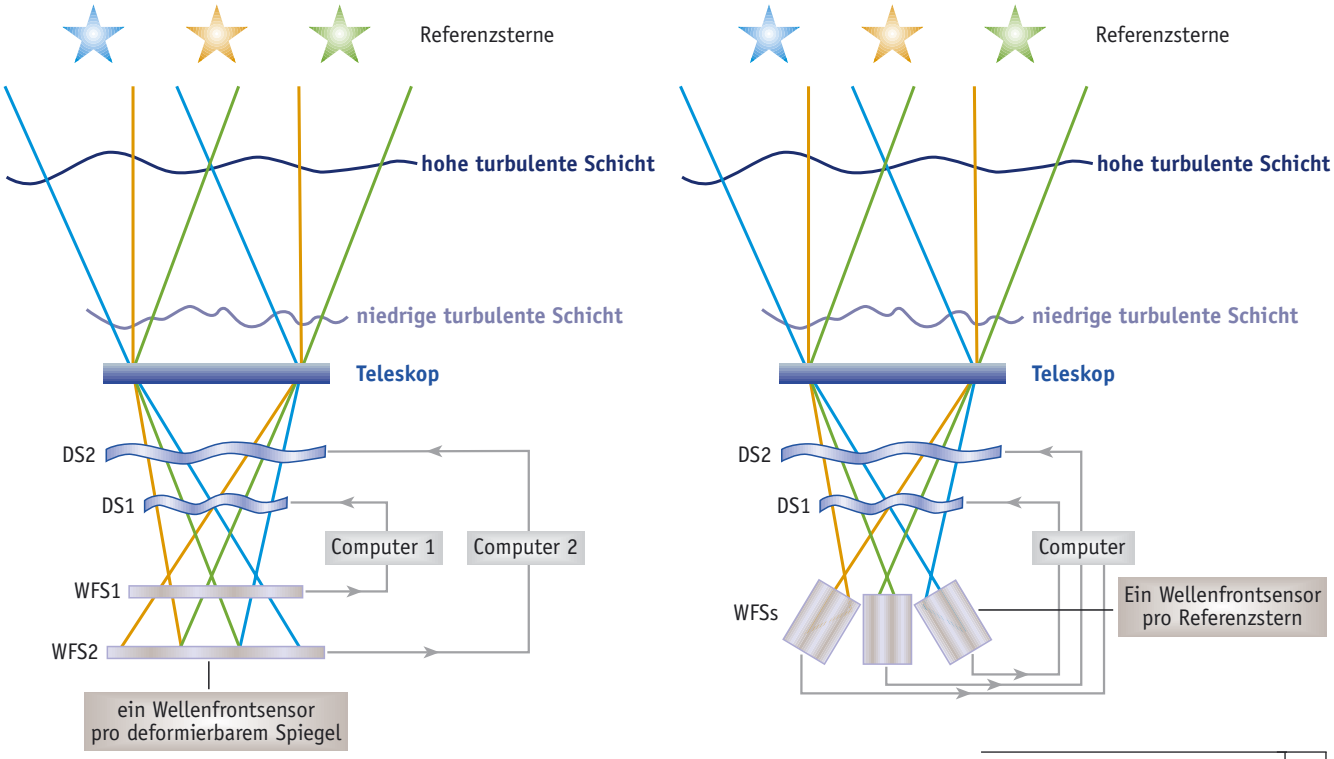
Mit dem Teleskop haben wir zwar nur ein Auge, aber dafür können wir innerhalb des Gesichtsfeldes mehrere Sterne gleichzeitig anschauen. Daraus wird die Höhenabhängigkeit der atmosphärischen Turbulenzen berechnet, indem die gemessenen deformierten Wellenfronten der einzelnen Sterne in einem leistungsfähigen Computer verglichen werden. Treten die Turbulenzen in einer Höhe von etwa zehn Kilometern auf, so sind die gemessen Deformationen für die einzelnen Sterne leicht unterschiedlich, für Turbulenzen knapp über dem Teleskop sind sie aber für alle Sterne gleich. Die erforderliche Analyse, die noch dazu in Echtzeit ausgeführt werden muss, ist sehr komplex.

■ **Mit und ohne Leitstern:** Bis Laserleitsterne allgemein verfügbar sind, ist man bei der herkömmlichen Adaptiven Optik auf helle, natürliche Leitsterne beschränkt, die noch dazu sehr nahe am zu beobachtenden astronomischen Objekt stehen müssen. Man benutzt so viele natürliche Leitsterne wie nur möglich – wenn auch nur sehr schwache – und überlagert anschließend das Licht all dieser Sterne in einem Detektor. Stehen beispielsweise fünf starke Laser zur Verfügung, so können fünf künstliche Leitsterne derart am Himmel angeordnet werden, dass die tomographischen Messungen möglichst einfach werden. Dabei kann der Algorithmus zur Berechnung der atmosphärischen Tomographie schon vorher gelöst werden, denn die Positionen der Leitsterne sind bekannt und für alle Beobachtungen die gleichen. Wir werden diese beiden Ansätze später noch genauer betrachten.

Eines der beiden identischen 8-m-Teleskope des GEMINI-Projekts steht auf dem Mauna Kea in Hawaii, das andere auf dem Cerro Pachon in Chile. Das erste hat bereits ein herkömmliches adaptiv-optisches System, am zweiten soll in den nächsten Jahren eine Multikonjugierte Adaptive Optik installiert werden. Dieses System beinhaltet drei deformierbare Spiegel, die zu den turbulenten Schichten in Bodennähe, in fünf Kilometer und in zehn Kilometer Höhe konjugiert sind. Die Deformationen der Wellenfronten werden an insgesamt fünf Laserleitsternen mit jeweils einem Shack-Hartmann-Sensor gemessen. Vier dieser Leitsterne werden in die Kanten eines Quadrats mit zwei Bogenminuten Seitenlänge projiziert, der fünfte in die Mitte dieses Quadrats.

Die beiden größten Probleme bei der Realisierung dieses Projektes sind zum einen die erforderliche enorme Laserleistung (wie oben beschrieben, benötigt man für jeden einzelnen Laserleitstern etwa 10 bis 20 Watt), und zum anderen die Rechenleistung der Computer. Um dieses komplexe Problem zu lösen, versucht man es so weit wie möglich zu vereinfachen. Da die relative Position der Laserleitsterne für alle beobachteten Objekte die gleiche ist, kann man das System einmal für alle weiteren Beobachtungen kalibrieren. Für die Kalibration wird nacheinander jeder Aktuator jedes deformierbaren Spiegels um eine bestimmte Strecke ausgelenkt und die Reaktion aller fünf Shack-Hartmann-Sensoren darauf gemessen. Daraus lernt der Computer, welche Spannungen er an welche Aktuatoren anlegen muss, um die aktuell ge-

▼ Abb. 16: Prinzip der Schichten-orientierten (links) und der Stern-orientierten (rechts) Multikonjugierten Adaptiven Optik. DS1 und DS2 bezeichnen die jeweils zu einer turbulenten Schicht optisch konjugierten deformierbaren Spiegel. WFS1, WFS2 und WFSs bezeichnen die verwendeten Wellenfrontsensoren.



## Literaturhinweise und Internetadressen


[1] **Stefan Hippler, Markus Kasper:** Dem Seeing ein Schnippchen schlagen (Adaptive Optik in der Astronomie, Teil 1), SuW 10/2004, S. 32–42.

[2] **Andreas Glindemann, Andreas Quirrenbach:** Künstlicher Stern über dem Calar Alto. Teil 1, SuW 11/1997, S. 950–955; Teil 2, SuW 12/1997, S. 1038–1044.

[3] **Stefan Hippler:** Scharfe Bilder für das Large Binocular Telescope, Sterne und Weltraum 3/2002, S. 12–13.

[4] **Einweihung des Large Binocular Telescope**, SuW 11/2004, S. 16–17.

[5] **Stefan Hippler:** Der scharfe Blick ins All und ins Auge. Physik in unserer Zeit, 1/2005, S. 24–31.

Adaptive Optik mit Laserleitstern am MPIA: **www.mpia.de/AO/INSTRUMENTS/AOInstruments.html**

Das Projekt PARSEC: **www.mpe.mpg.de/ir/parsec**

Adaptive Optik mit Laserleitstern am Keck Teleskop: **www.keck.hawaii.edu/optics/lgsao**

Multi-Conjugate Adaptive Optics Demonstrator der ESO: **www.eso.org/projects/aot/mad**

Multi-Conjugate Adaptive Optics am GEMINI-Teleskop: **www.gemini.edu/sciops/instruments/adaptiveOptics/MCAOPrimer.html**

Das OWL-Projekt: **www.eso.org/projects/owl**


messene Deformation der Wellenfronten zu korrigieren.

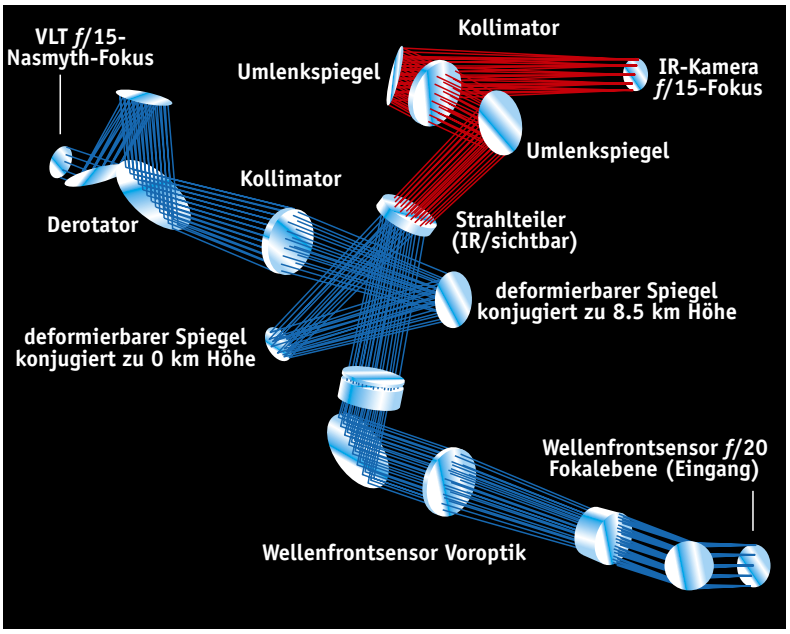
Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit für das MCAO-System von GEMINI-Süd liegt darin, eine hohe photometrische Genauigkeit über ein für Adaptive Optiken extrem großes Gesichtsfeld von einigen Bogenminuten zu erreichen. Da, wie bereits beschrieben, der Laserstrahl bereits auf seinem Weg nach oben durch die Atmosphäre gestört wird und daher der künstliche Stern hin und her wackelt, benötigt man zur vollständigen Korrektur der Wellenfront noch einige zusätzliche natürliche Leitsterne. Da diese sehr schwach sein dürfen (ca. 19 mag) und an beliebiger Stelle innerhalb des etwa zwei Bogenminuten großen Quadrats liegen können, ist die Himmelsabdeckung durch dieses MCAO-System dennoch nahezu komplett.

Im Gegensatz zu dieser so genannten Stern-orientierten MCAO, werden bei der zweiten Technik, der Schichten-orientierten MCAO, nur natürliche Leitsterne benutzt. Sobald das zu beobachtende Gebiet am Himmel ausgewählt ist, werden die darin enthaltenen Sterne nach ihrer Helligkeit und Entfernung zum Zentrum sortiert. Dann wird für die (typischerweise zehn) dafür am besten geeigneten Sterne jeweils die Deformation der Wellenfronten gemessen. Dazu wird an die Position eines jeden dieser Sterne in der Brennebene des Teleskops mit Hilfe eines motorisierten Roboterarms jeweils eine kleine Glaspyramide gesetzt, die sein Licht in vier Strahlen aufspaltet.

Wie diese Aufspaltung des Lichts durch die einzelnen Pyramiden genau geschieht, hängt davon ab, wie die Deformationen der einzelnen Wellenfronten aussehen. Der einfache Fall einer reinen Verkippung der Wellenfront führt zu einer Verschiebung des Sternbildes weg von der Spitze der Pyramide und damit zu einer Erhöhung der Intensität in einem der vier aufgespalteten Strahlen, relativ zu den drei anderen (vgl. [1]).

Das interessante an diesem Ansatz ist, dass das Licht aller Pyramiden mit einem einzigen optischen System auf einen oder mehrere Detektoren abgebildet wird (je ein Detektor ist zu jeder zu korrigierenden Schicht konjugiert). Auf diesem Weg addiert sich das Licht aller Leitsterne im Detektor und man erhält ein stärkeres Signal, so dass die einzelnen Sterne viel schwächer sein dürfen.

Da diese Schichten-orientierte MCAO nur natürliche Leitsterne benutzt, hat sie den Nachteil, dass die Himmelsabdeckung nur sehr klein ist. Noch dazu hängt die Qualität der Korrektur der Wellenfront von der Verteilung der Leitsterne im Gesichtsfeld und von ihrer Helligkeit ab. Deshalb lässt sich hier die Himmelsabdeckung im Voraus nicht genau berechnen. Wie schon gesagt, ist sie stark richtungsabhängig – in den für extragalaktische Forschung besonders interessanten Gebieten nahe den galaktischen Polen beträgt sie nur wenige zehn Prozent.



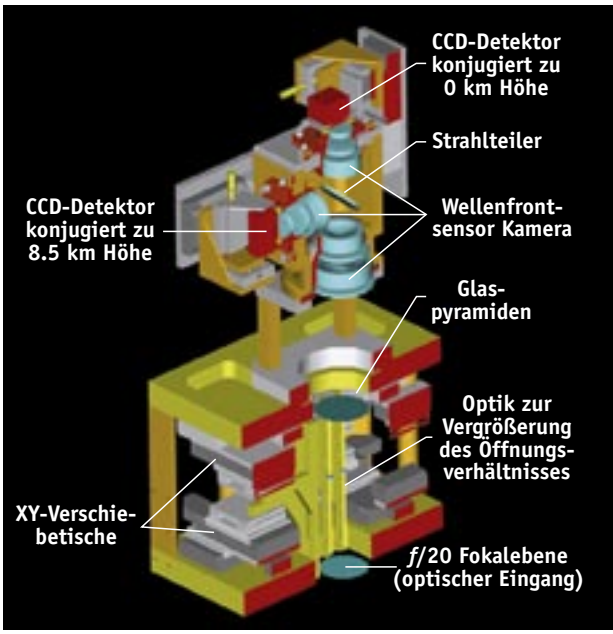




Abb. 17: Das MAD-Instrument. Links – Optisches Design mit zwei deformierbaren, zu 0 km und 8.5 km Höhe über dem Teleskop konjugierten Spiegeln. Rechts – Wellenfrontsensoren für die Schichten-orientierte MCAO.

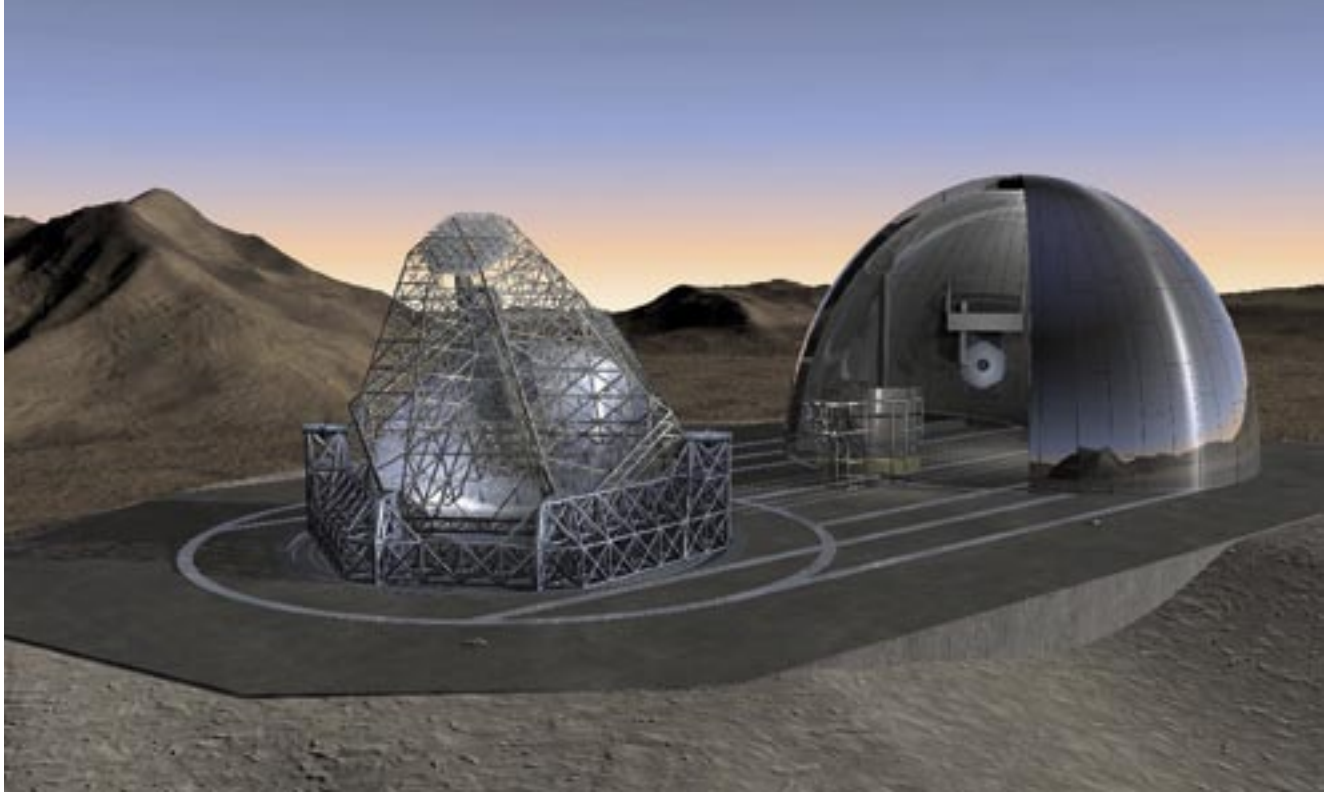


Abb. 18: Das geplante optische 100-m-Teleskop der Eso (OWL, Overwhelmingly Large Telescope). Die Schutzkuppel ist geöffnet und zur Seite gefahren.

## Experimente am Himmel bringen die Entscheidung

Die Europäische Südsternwarte baut zur Zeit den »*Multi-conjugate Adaptive Optics Demonstrator*« MAD – also verrückt ... in der Tat kein schlechter Name. Damit lassen sich die beiden Techniken, Stern- und Schichten-orientierte MCAO, unter den gleichen Bedingungen testen, um einen aussagekräftigen Vergleich zu ermöglichen: Man benutzt das selbe Teleskop, die selben deformierbaren Spiegel, die selbe Kamera und das selbe Gebiet am Himmel.

Dabei kommt eine Infrarot-Kamera mit einem Gesichtsfeld von einer Bogenminute zum Einsatz, das in einem zweiten Schritt auf zwei Bogenminuten erweitert werden kann. Die Korrektur der Wellenfront wird durch zwei deformierbare Spiegel übernommen (Abb. 17, links). Zur Messung der Wellenfront dienen (für die Stern-orientierte MCAO) drei Shack-Hartmann-Sensoren und drei Detektoren oder (für die Schichten-orientierte MCAO) acht Pyramiden und zwei zum Boden beziehungsweise zu 8.5 Kilometer Höhe konjugierte Detektoren (Abb. 17, rechts).

Zwei weitere Instrumente werden in naher Zukunft das Spektrum der Adaptiven Optiksysteme an 8-m-Teleskopen vervollständigen. Das erste ist LINC-NIRVANA, ein Interferometer für das nahe Infrarot am *Large Binocular Telescope* (LBT, [4]). Das zweite Instrument, genannt MUSE, wird an einem der Teleskope des VLT installiert werden. MUSE korrigiert die deformierte Wellenfront innerhalb eines Gesichtsfeldes von einer Bogenminute Durchmesser zumindest teilweise.

Dadurch wird die gleichzeitige Spektroskopie zahlreicher Objekte möglich, für die eine nicht ganz perfekt beugungsbegrenzte Auflösung ausreicht. LINC-NIRVANA wird eine verbesserte Version der Schichten-orientierten MCAO einsetzen, um mit Hilfe von bis zu 20 natürlichen Leitsternen eine beugungsbegrenzte Auflösung innerhalb eines Gesichtsfeldes von bis zu sechs Bogenminuten zu ermöglichen. MUSE dagegen wird bis zu vier Natrium-Laserleitsterne benutzen, um nur die atmosphärische Turbulenz in Bodennähe zu kompensieren.

Die vier beschriebenen Projekte (MAD, GEMINI, LINC-NIRVANA und MUSE) werden für die Entwicklung der großen Teleskope der nächsten Generation, der so genannten *Extremely Large Telescopes*, eine entscheidende Rolle spielen. Solche Teleskope, mit Öffnungen von bis zu 100 Metern (Abb. 18), werden Bilder von ungeahnter Schärfe und Brillanz liefern – aber nur dann, wenn es gelingt, ihre beugungsbegrenzte Auflösung zu verwirklichen. Der dazu erforderliche, enorme Aufwand lohnt sich nur, wenn dies für hinreichend große Gesichtsfelder gelingt, wenn also die Techniken der Multikonjugierten Adaptiven Optik ausgereift sind. Es kann daher nicht genug betont werden, wie wichtig es ist, die Resultate der hier beschriebenen visionären Projekte in die Pläne für die Teleskope der nächsten Generation einfließen zu lassen. Wie gesagt, die Auswahl der besten Methode wird am Himmel entschieden. □

(Aus dem Englischen von Sebastian Egner)

**Richard Davies** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestriche Physik in Garching bei München, mit den Forschungsschwerpunkten Laserleitstern für Adaptive Optik, Starbursts und Aktive Galaxienkerne.

**Stefan Hippler** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, mit Forschungsschwerpunkt Adaptive Optik.

**Roberto Ragazzoni** ist Professor am astrophysikalischen Observatorium Arcetri (Florenz), mit Forschungsschwerpunkt Adaptive Optik. Für seine Arbeiten zur Multikonjugierten Adaptiven Optik und für den Aufbau einer Arbeitsgruppe am MPI für Astronomie in Heidelberg erhielt er 2001 den Wolfgang-Paul-Preis der Alexander-von-Humboldt-Stiftung.