



Laser-Leitsterne

Wie im ersten Teil im Abschnitt über den Wellenfrontsensor dargestellt, benötigt man für den Betrieb der adaptiven Optik einen hellen Leitstern ($m_v \leq 12$ mag) innerhalb des isoplanatischen Winkels. Bei Anwendungen in der stellaren Astronomie – etwa bei Untersuchungen von Sternstehungsgebieten oder Beobachtungen von Doppelsternen – erfüllt der zu beobachtende Stern selbst oft diese Forderung an die Helligkeit und kann somit als Wellenfront-Referenz benutzt werden. Soll jedoch ein schwächeres Objekt beobachtet werden, so ist man darauf angewiesen, nach zufällig in der Nähe befindlichen Sternen zu suchen. Diese Situation ist vor allem bei extragalaktischen Anwendungen fast immer gegeben. Da die Chance, einen geeigneten Leitstern zu finden, äußerst gering ist, ist der Einsatz der adaptiven Optik in der extragalaktischen Astronomie bisher sehr stark eingeschränkt.

Um dem abzuhelfen, haben 1985 Renaud Foy und Antoine Labeyrie vorgeschlagen, mit Hilfe von Lasern künstliche Leitsterne in der Erdatmosphäre zu erzeugen. Wie sich später herausstellte, war diese Idee bereits einige Jahre früher im Rahmen der militärischen Forschung in den USA unabhängig entwickelt worden. Zur großen Überraschung der Astronomen gaben Wissenschaftler der US Air Force 1991 bekannt, daß sie in geheimen Forschungsprogrammen die Technik der Laser-Leitsterne bereits bis zur Anwendungsreife gebracht hatten, vor allem, um Satelliten in ihrer Umlaufbahn beim Überflug eines speziellen Teleskopes scharf abbilden zu können. Die Veröffentlichung dieser Resultate löste eine Welle von Plänen aus, auch astronomische Teleskope mit Laser-Leitsternen auszustatten. Es ist allerdings keineswegs leicht, die Laser-Leitstern-Technik an astronomische Bedürfnisse anzupassen. Die direkte Übernahme der vom Militär entwickelten Lösungen verbietet sich schon aus Kostengründen, und die großen Aperturen astronomischer Teleskope – insbesondere der neuen Generation von 8-m- und 10-m-Teleskopen – stellen besondere Anforderungen. Deshalb befinden sich momentan nur einige wenige Systeme in der Testphase (von denen Alfa das einzige außerhalb der USA ist), obwohl alle großen Observatorien den Einsatz von Laser-Leitsternen planen.

Die »einfachste« Methode, einen Laser-Leitstern zu erzeugen, besteht in der Nutzung der Rayleigh-Rückstreuung in der Atmosphäre. Hierzu verwendet man einen gepulsten Laser und öffnet einen schnellen Shutter vor der Wellenfrontsensor-Kamera nur für eine kurze Zeit, während derer sich der Puls in einer Höhe von 10 bis 20 km

Künstlicher Stern über dem Calar Alto

Adaptive Optik mit Alfa am 3.5-m-Teleskop, Teil 2

von Andreas Glindemann und Andreas Quirrenbach

Im ersten Teil ging es um den Einfluß der Atmosphäre auf das im Teleskop entworfene Bild und um die Techniken zu seiner Überwindung (Tip-tilt-Systeme, deformierbare Spiegel). Hier wird die Erzeugung eines künstlichen Leitsterns beschrieben, der den Betrieb adaptiver Optik in jeder Himmelsrichtung ermöglicht.

befindet. Von unten betrachtet bildet das Streulicht dann einen hellen kompakten Fleck, der als Leitstern benutzt werden kann. Allerdings durchläuft das Licht dieses Leitsterns, der in einer endlichen Entfernung vom Teleskop erzeugt wird, einen anderen Weg in der Atmosphäre als das Licht von unendlich weit entfernten Sternen (siehe Abb. 7). Wegen dieses Unterschiedes, »fokaler Anisoplanatismus« oder »Kegel-Effekt« genannt, ist die Korrektur des Sternlichtes nicht perfekt. Die durch fokalen Anisoplanatismus verursachte Verschlechterung der Bildqualität wächst mit steigendem Teleskopdurchmesser und nimmt mit zunehmender Entfernung des Laser-Leitsternes ab. Deshalb wird für große astronomische Teleskope eine andere Technik zur Erzeugung des Leitsterns bevorzugt, nämlich Resonanz-Fluoreszenz von Natriumatomen, die sich in einer etwa 10 km dicken Schicht in 90 km Höhe befinden.

Bei der Verwendung von Laser-Leitsternen muß man immer berücksichtigen, daß der Laserstrahl ebenfalls von atmosphärischer Turbulenz beeinflusst wird. Zum einen hat dies zur Folge, daß auch bei optimaler Fokussierung die Größe des erzeugten Fleckes vom Seeing begrenzt wird, zum anderen heißt dies, daß die Position des Laser-Leitsterns nicht genau bekannt ist. Er läßt sich also nicht zur Bestimmung von Tip und Tilt verwenden. Adaptive Optik-Systeme mit Laser-Leitstern sind deswegen immer so aufgebaut, daß ein separater Tip-tilt-Sensor die Bildbewegung mit einem natürlichen Leitstern mißt; der Laser-Leitstern wird nur für die Korrektur der höheren Ordnungen verwendet. Das System ist deshalb nicht völlig unabhängig von geeigneten natürlichen Leitsternen, aber die Himmelsüberdeckung entspricht derjenigen eines reinen Tip-tilt-Systems und ist damit für die meisten astronomischen Anwendungen vollkommen ausreichend. Insbesondere besitzen viele Galaxien Kerne, die hell genug sind, um als

Tip-tilt-Referenz zu dienen; diese Objekte sind also gut geeignet für Beobachtungen mit Systemen wie Alfa.

Physik der Natriumschicht

Wegen des fokalen Anisoplanatismus ist es wünschenswert, den künstlichen Leitstern in möglichst großer Höhe zu erzeugen. In der oberen Atmosphäre befinden sich eine ganze Reihe verschiedener Metallatome, die dort von Mikrometeoriten deponiert werden. Sie bilden eine etwa 10 km dicke Schicht in einer mittleren Höhe von ungefähr 90 km, da sie darunter von atmosphärenchemischen Prozessen abgebaut werden. Diese Metallatome lassen sich von Lasern anregen, wenn diese auf starke Linien der jeweiligen Spezies abgestimmt werden können. Man erhält dann durch Resonanz-Fluoreszenz einen Leitstern, dessen Helligkeit von dem Produkt aus der Säulendichte¹ des jeweiligen Metalls und der Übergangsstärke der ausgewählten Linie bestimmt wird. Von allen möglichen Linien im sichtbaren Wellenlängenbereich ist es die D_2 -Linie von Natrium bei 589 nm, für die dieses Produkt maximal ist und die deshalb für die Erzeugung von Laser-Leitsternen benutzt wird. Allerdings unterliegt die Natrium-Säulendichte starken jahreszeitlichen Schwankungen mit einem Maximum im Winter und einem Minimum im Sommer, sowie unvorhersagbaren kurzfristigen Variationen. Damit kann sich die Helligkeit des Laser-Leitsterns von Nacht zu Nacht oder sogar innerhalb einer Nacht um einen Faktor 2, in Extremfällen sogar noch stärker ändern. Da außerdem die Eigenschaften der mesosphärischen Natriumschicht stark von der geographischen und geomagnetischen Breite abhängen,

¹ Die Säulendichte ist das Produkt aus Dichte und Schichtdicke; sie wird in g/cm^2 oder in Atomen/cm^2 gemessen.

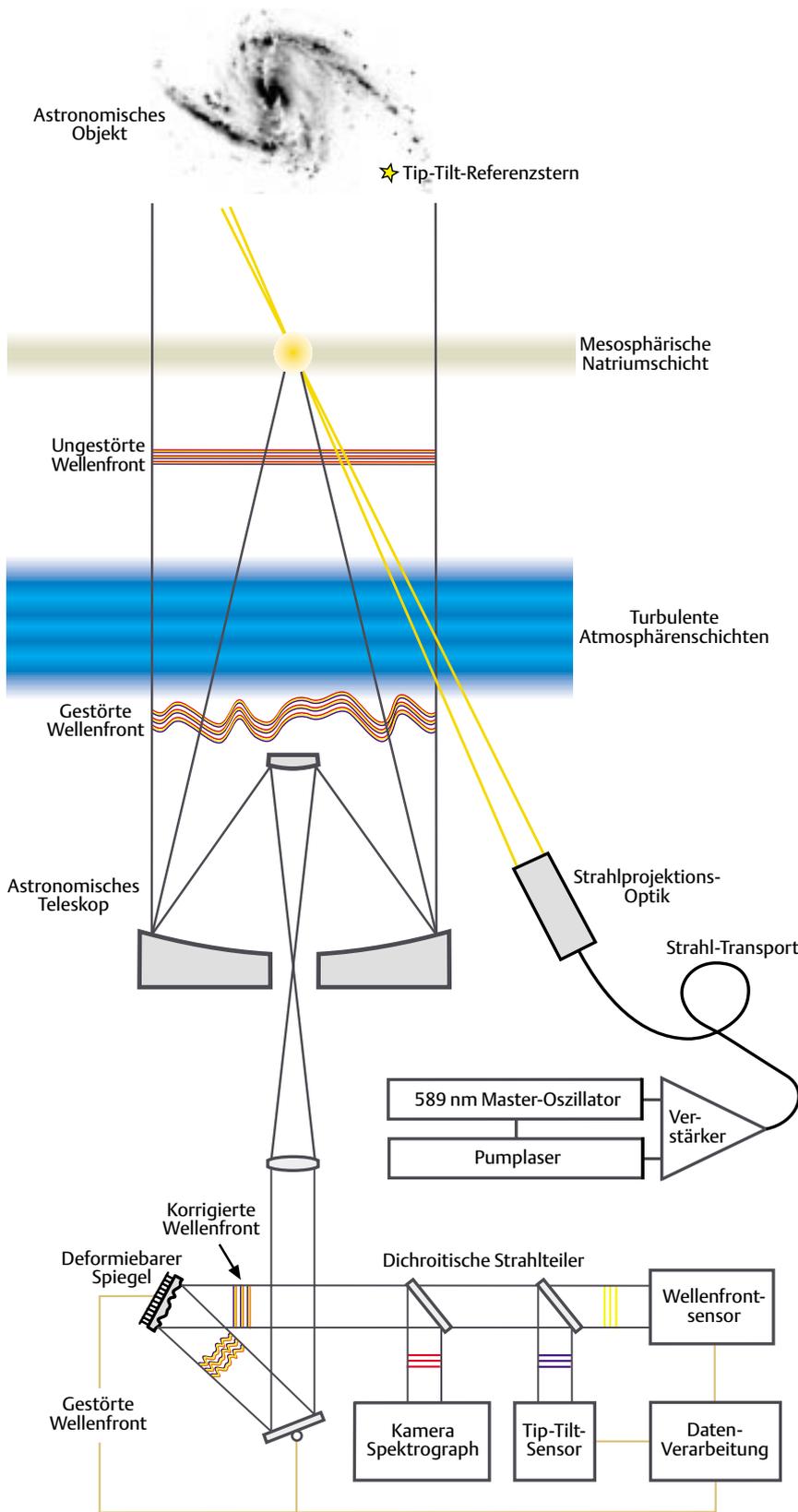


Abb. 7: Prinzip der adaptiven Optik mit Laser-Leitstern.

ganges zu heben. Dies hat zur Folge, daß die Helligkeit des Leitsternes nicht mehr linear mit der Laserleistung anwächst, sondern sich einem konstanten Wert nähert. Die Investition in höhere Laserleistung zahlt sich also nur bis zu einer gewissen Grenze aus. Dies hat wichtige Konsequenzen für die Auswahl geeigneter Lasertypen; die kritische Leistung für das Auftreten von Sättigung hängt nämlich von der Bandbreite des Lasers ab. Dies liegt daran, daß die D₂-Linie in der Natriumschicht »inhomogen verbreitert« ist. Inhomogene Verbreiterung tritt dann auf, wenn die einzelnen Atome mit Licht geringfügig unterschiedlicher Wellenlänge in Resonanz sind; bei der D₂-Linie ist dies zum einen aufgrund der thermischen Bewegung und des damit verbundenen Dopplereffektes der Fall, zum anderen aufgrund eines atomphysikalischen Effektes, der Hyperfeinaufspaltung². Ist nun die Laserstrahlung schmalbandiger als die inhomogen verbreiterte D₂-Linie, so tritt sie nur mit denjenigen Atomen in Wechselwirkung, die aufgrund ihrer momentanen Dopplergeschwindigkeit die Resonanzbedingung erfüllen und die sich im »richtigen« Hyperfeinniveau befinden. Im konkreten Fall der D₂-Linie heißt dies, daß ein schmalbandiger Laser nur mit einem von hundert Natriumatomen in Wechselwirkung treten kann. Für Dauerstrich-Laser ist dies nicht weiter bedeutsam, da sich mit derzeit verfügbaren Techniken die Sättigungsschwelle nicht erreichen läßt. Will man jedoch einen gepulsten Laser verwenden, so ist zu beachten, daß die eingestrahelte Leistung während des Pulses um ein Vielfaches höher ist als die mittlere Leistung. So gibt beispielsweise ein Laser mit einer mittleren Leistung von 25 W, einer Pulsdauer von 150 ns und einer Puls wiederholungsrate von 30 kHz³, während der Pulse eine Leistung von 5.6 kW ab ($5.6 \text{ kW} \times 30 \text{ kHz} \times 150 \text{ ns} = 25 \text{ W}$). Da dies bei einer schmalen Linie zur Sättigung führen würde, muß die Linienbreite des Lasers dem Profil der D₂-Linie in der Natriumschicht angepaßt werden, so daß die Laserleistung auf alle Atome dort verteilt wird. Einer weiteren Verbesserung gepulster Laser zu größeren Leistungen hin sind durch Sättigungseffekte enge Grenzen gesetzt.

Ein weiterer Effekt, der wichtige Konsequenzen für die Helligkeit des Laser-Leit-

müssen an jedem Teleskopstandort eigene Testserien durchgeführt werden, um die Leistungsmerkmale eines Laser-Leitstern-Systems charakterisieren zu können.

Verwendet man einen relativ schwachen Laser, so erhält man von der Natriumschicht ein Rückstreusignal, dessen Stärke proportional zur eingestrahelten Laserlei-

stung ist. Geht man jedoch zu höheren Leistungen über, so muß man die Wechselwirkung des Laserlichtes mit den Natriumatomen im Detail berücksichtigen. Der wichtigste Effekt ist die Sättigung, die dann eintritt, wenn die Bestrahlungsstärke ausreicht, einen signifikanten Anteil der Natriumatome in das obere Niveau des D₂-Über-

² Die Hyperfeinaufspaltung resultiert aus einer Kopplung zwischen den magnetischen Momenten der Elektronen und des Atomkerns; die Orientierung des Kernmagneten beeinflusst die Energieniveaus in der Atomhülle und damit die Übergangsfrequenzen.

³ Diese Daten entsprechen einem Laser, der vom Lawrence-Livermore Labor für das Keck-Teleskop entwickelt wird.

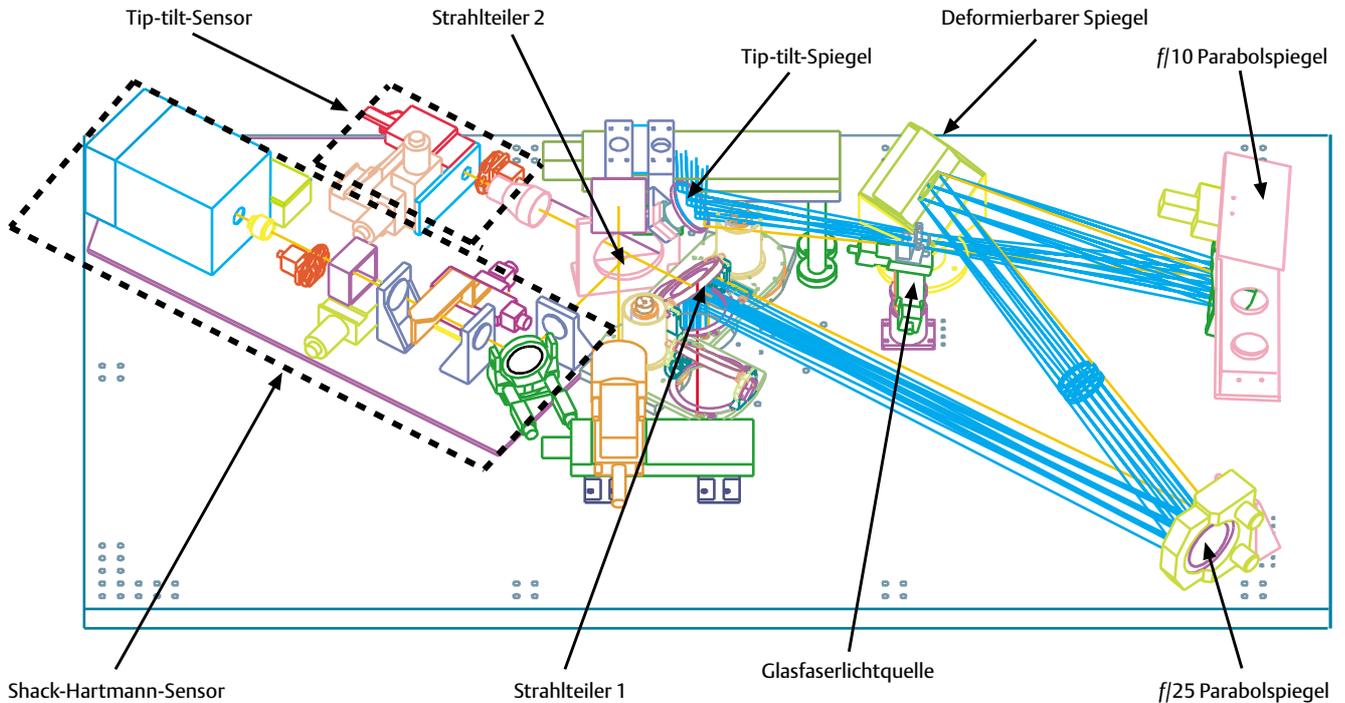


Abb. 8: Die Grundplatte von Alfa mit allen optomechanischen Elementen. Das Sternlicht fällt senkrecht von oben auf den Tip-tilt-Spiegel und wird seitlich umgelenkt. An die Stelle des Teleskopfokus kann auch eine Glasfaserlichtquelle gefahren werden. Nach der Reflexion am $f/10$ -Parabolspiegel entsteht auf dem deformierbaren Spiegel ein Bild der Teleskopapertur. Der $f/25$ -Parabolspiegel entwirft den korrigierten Fokus nach Reflexion am Strahlteiler 1 unter der Grundplatte. Das durchgelassene sichtbare Licht wird vom Strahlteiler 2 noch einmal aufgeteilt in das vom Laserleitstern stammende Licht, das in den Shack-Hartmann-Sensor geleitet wird, und das übrige sichtbare Licht, das in den Tip-tilt-Sensor fällt.

sterns hat, ist das optische Pumpen. Der Grundzustand des Natriumatoms hat zwei Hyperfeinniveaus, der angeregte Zustand der D_2 -Linie drei. Die Wechselwirkung intensiven Laserlichtes mit den Natrium-Atomen führt wie beschrieben dazu, daß ein Teil der Atome vom Grundzustand in den angeregten Zustand überführt wird und damit Sättigung auftritt. Außerdem findet aber auch eine Umverteilung zwischen den einzelnen Hyperfeinniveaus statt; dies wird als optisches Pumpen bezeichnet. Ein schmalbandiger Laser tritt nur mit einem Hyperfeinniveau des Grundzustandes in Wechselwirkung; im Extremfall kann dieser Hyperfeinzustand durch optisches Pumpen völlig entvölkert werden. Dann kann keine weitere Absorption des Laserlichtes erfolgen; man spricht von optisch induzierter Transparenz. Dies hat katastrophale Folgen für die Helligkeit des Leitsterns: Der Laserstrahl befördert in kürzester Zeit alle Atome in Zustände, in denen sie nicht mehr mit ihm wechselwirken können, der Leitstern schaltet sich quasi selbst aus! Glücklicherweise sorgen Stöße der Natriumatome mit dem Hintergrund-Gas und die Wechselwirkung der atomaren magnetischen Momente mit dem Erdmagnetfeld für eine Mischung der Hyperfeinzustände und reduzieren damit das optische Pumpen. Außerdem ergibt eine genauere atomphysikalische Analyse, daß bei der Verwendung von zirkular polarisiertem Licht keine optisch induzierte Transparenz auftritt. Experimentelle Ergebnisse mit Dauerstrich-Lasern zeigen, daß bei gleicher Leistung zirkular polarisiertes Licht etwa 20-30% hellere Leitsterne

erzeugt als linear polarisiertes; bei gepulsten Lasern kann der Gewinn durch zirkulare Polarisation noch größer sein.

Alfa

Die adaptive Optik, die am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto eingesetzt wird, hat einen Piezospiegel mit 97 Aktuatoren und einen Shack-Hartmann-Sensor mit bis zu 100 Subaperturen. Das System ist für Beobachtungen im nahen Infrarot konzipiert.

Beim Entwurf des optischen Systems für Alfa war dafür zu sorgen, daß ein Bild der Teleskopapertur auf dem deformierbaren Spiegel entsteht und daß nach der Reflexion des Lichts an dem deformierbaren Spiegel wieder ein, jetzt korrigiertes, Bild des Sterns entworfen wird. Diese Aufgabe kann mit zwei Parabolspiegeln gelöst werden. Aus praktischen Gründen wird der Strahl, wie bei Charm, vor dem ersten Parabolspiegel in die Horizontale umgelenkt, so daß Alfa horizontal am Teleskop hängt. Der Umlenkspiegel wird als Tip-tilt-Spiegel ausgelegt (siehe Abb. 8). Der erste

Parabolspiegel ($f/10$ -Parabolspiegel in Abb. 8) macht aus dem vom Teleskopfokus ausgehenden Lichtbündel ein paralleles Bündel, das auf den deformierbaren Spiegel trifft. Der zweite Parabolspiegel ($f/25$ -Parabolspiegel) wird so in das vom deformierbaren Spiegel reflektierte parallele Bündel gestellt, daß im Fokus des Parabolspiegels das korrigierte Bild entsteht. Die Bezeichnungen $f/10$ - und $f/25$ -Parabolspiegel in Abb. 8 rühren daher, daß sich die Brennweiten der beiden Spiegel wie 2.5 : 1 verhalten, so daß aus dem $f/10$ -Strahlenbündel im Teleskopfokus ein $f/25$ -Bündel im korrigierten Bild wird. Dadurch wird der Abbildungsmaßstab in der Infrarotkamera dem verbesserten Auflösungsvermögen im korrigierten Bild angepaßt.

Aus den physikalischen Abmessungen des deformierbaren Spiegels, er hat einen Durchmesser von 70 mm, und dem Öffnungsverhältnis $f/10$ des Teleskopfokus ergeben sich die Eckdaten des optischen Systems. Der erste Parabolspiegel hat 700 mm Brennweite, der zweite 1650 mm. Das ist der Grund, warum die Grundplatte von Alfa mit einer Länge von 2.7 m und einer Breite von 1.5 m recht ausladend geworden

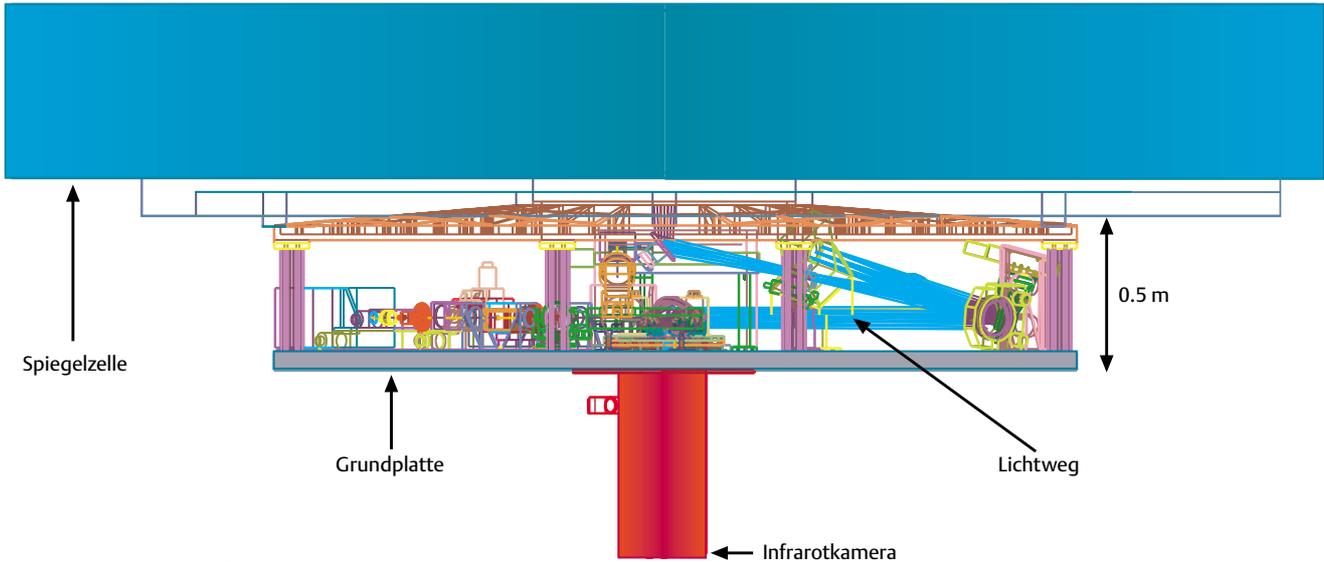


Abb. 9: Gesamtansicht des Systems an der 4 m durchmessenden Spiegelzelle des 3.5-m-Teleskops. Die Länge der Grundplatte von Alfa beträgt 2.7 m. Oben: Schemazeichnung. Rechts: Das Gerät am Teleskop.

ist. Abb. 9 zeigt das Gesamtsystem mit Infrarotkamera an der 4 m durchmessenden Spiegelzelle des 3.5-m-Teleskops.

Am CFHT (Hawaii) wurde ein sehr ähnliches System installiert. Allerdings ist der deformierbare Spiegel hier ein relativ kleiner bimorpher Spiegel und die Dimensionen des Systems sind mit ungefähr $1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ sehr viel kompakter.

Vor den korrigierten Fokus wird ein Strahlteiler (Strahlteiler 1 in Abb. 8) gesetzt, der das infrarote Licht senkrecht nach unten in die Infrarotkamera reflektiert. Wenn dieser Strahlteiler sowie der Tip-tilt-Spiegel aus dem Strahlengang geklappt werden, landet der Teleskopfokus völlig unbeeinflusst von Alfa ebenfalls in der Infrarotkamera. Bei schlechtem Seeing oder bei unlösbaren Problemen mit dem Instrument kann man dann immer noch unkorrigierte astronomische Beobachtungen durchführen.

Der von Strahlteiler 1 transmittierte sichtbare Anteil geht zum Tip-tilt- und zum Shack-Hartmann-Sensor. Hier wird mit einem weiteren Strahlteiler (Strahlteiler 2 in Abb. 8) dafür gesorgt, daß alle Photonen des Laser-Leitsterns im Shack-Hartmann-Sensor landen und die der übrigen Wellenlängenbereiche zum Tip-tilt-Sensor gelangen.

Dadurch, daß der Shack-Hartmann-Sensor im Strahlengang nach dem deformierbaren Spiegel angeordnet ist, liegt ein geschlossener Regelkreis vor, wie er im Prinzip in Abb. 5 (Teil 1) dargestellt ist. Jede Änderung auf dem deformierbaren Spiegel hat einen Effekt im Shack-Hartmann-Sensor. Woher weiß der Shack-Hartmann-Sensor nun, welches Muster der Einzel-





Abb. 10: Der Alfa-Laserstrahl über der Kuppel des 3.5-m-Teleskopes.

bilder zu der gewünschten ebenen Welle gehört?

Hierzu kann eine Glasfaserlichtquelle mit einem Durchmesser von 4 μm als perfekte Punktquelle in den Teleskopfokus geschwenkt werden, von der eine ungestörte Kugelwelle ausgeht. Die Position der Einzelbilder des Shack-Hartmann-Sensors, die zu dieser Welle gehört, wird von dem System als Referenz angesehen. Wenn durch die Korrektur mit dem deformierbaren Spiegel dieses Muster im Shack-Hartmann-Sensor entsteht, sind die Wellenfront und das dazugehörige Bild des Sterns perfekt.

Um diesen Zustand zu erreichen, muß zunächst das ganze optische System justiert werden, um von der perfekten Punktquelle (der Glasfaser) ein perfektes Bild auf der Infrarotkamera zu erzeugen. Neben der optomechanischen Justage der beiden Parabolspiegel muß man auch dafür sorgen, daß der deformierbare Spiegel im neutralen Zustand perfekt eben ist. Diese Ebenheit wird mit einem Twyman-Green-Interferometer unabhängig vom optischen Strahlengang in Alfa überprüft. Durch Ansteuerung der Spannungen an den Piezoaktuatoren im statischen Zustand wird dafür gesorgt, daß der deformierbare Spiegel hinreichend eben ist, so daß das Bild der Glasfaser auf der Infrarotkamera beugungsbegrenzt ist.

Um die Justage zu erleichtern, sind nahezu alle optischen Elemente motorisch einstellbar. Die Bedienung erfolgt über ein Graphical User Interface (GUI) auf dem Bildschirm einer Workstation. Wenn diese Prozedur beendet ist, wird die Glasfaser aus dem Bild herausgeschwenkt, und man kann den Leitstern auf den Shack-Hartmann-Sensor abbilden und den Regelkreis schließen.

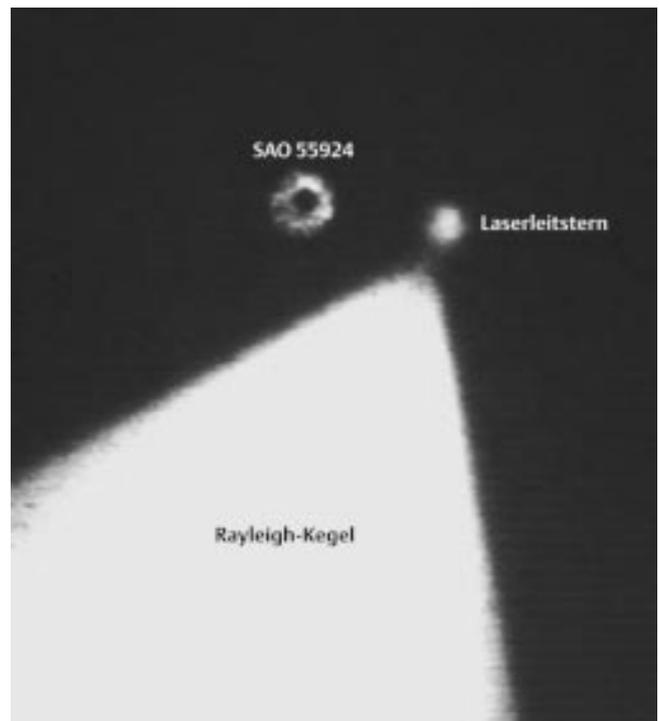
Der Alfa-Laser

Zur Erzeugung des Natrium-Leitsternes ist Alfa mit einem entsprechenden Lasersystem ausgerüstet. Das Herzstück dieses Systems ist ein kommerziell erhältlicher Farbstoff-Ringlaser, dessen Frequenz über einen großen Bereich sehr genau abgestimmt werden kann. Das »aktive Medium« des Farbstofflasers besteht aus einem Farbstoffstrahl, der unter hohem Druck aus einer Düse gepreßt wird. Das grüne und blaue Licht eines Argon-Ionenlasers wird in den Farbstoffstrahl fokussiert und regt dort die Farbstoffmoleküle an; die angereg-

ten Moleküle können dann über einen großen Wellenlängenbereich Licht abgeben. Das aktive Medium befindet sich aber in einem Resonator mit extrem hoher Güte; dieser Resonator wählt aus dem breiten Spektrum des Farbstoffes eine einzige Frequenz aus und erzwingt kohärente Emission aller Farbstoffmoleküle in einer einzelnen schmalen Linie. Die Resonanzfrequenz des Resonators läßt sich mechanisch verändern; dies ermöglicht das Durchstimmen des Farbstofflasers. Bei Alfa wird ein kleiner Teil des Lichtes vom Farbstofflaser in eine Natriumzelle gelenkt. Wenn der Farbstofflaser genau auf das Maximum der D_2 -Linie abgestimmt ist, erzeugt die Natriumzelle ein Signal, das in einem geschlossenen Regelkreis zur Stabilisierung der Laserfrequenz verwendet wird.

Der Farbstofflaser ist also eigentlich nichts anderes als ein Konvertor, der das Licht des sogenannten Pump lasers in Licht einer über einen großen Bereich frei wählbaren Frequenz verwandelt. Als Pump laser dient bei Alfa ein Argon-Ionenlaser. Er gehört zur Familie der Gasentladungslaser und ist damit ein »großer Bruder« der Helium-Neon-Laser, die als Richtlaser zu Justierzwecken, als Laser-Zeiger und als Demonstrationslaser weite Verbreitung gefunden haben. Allerdings stellt der Alfa-Pump laser mit seinen 25 W Ausgangsleistung in mehreren grünen und blauen Linien die Helium-Neon-Laser weit in den Schatten, die als augensichere Justier- und Demonstrationslaser typischerweise 0.5 mW in der roten Linie bei 633 nm abgeben.

Abb. 11: Aufnahme des Laserstrahls mit der Leitkamera des 3.5-m-Teleskopes. Der helle Kegel ist die Rückstreuung in der unteren Atmosphäre (Rayleigh-Streuung und Aerosol-Streuung). Der helle Fleck am Ende des Kegels entsteht in der mesosphärischen Natrium-Schicht; er dient als Leitstern für das adaptive Optik-System. Außerdem ist auf diesem Bild ein Stern erkennbar. Da das Teleskop für diesen Test auf eine Entfernung von 90 km fokussiert war, erscheint der Stern stark defokussiert.





Dieser Faktor 50 000 in der Ausgangsleistung macht sich leider auch in der Stromaufnahme bemerkbar: Der Argon-Ionenlaser von Alfa benötigt mit etwa 50 kW eine Leistung, mit der man auch einen Mittelklassewagen zügig bewegen könnte! An einem Observatorium besteht das größere Problem nicht darin, einen entsprechenden Stromanschluß zu bekommen, sondern darin, zu verhindern, daß die gesamte Leistung als Abwärme in die Nähe der Kuppel gelangt und dort lokale Luftunruhe erzeugt. Glücklicherweise besitzt der Calar Alto eine Kühlanlage mit hinreichender Kapazität und in einiger Entfernung von den Teleskopen. Die 50 kW Abwärme des Pumplasers können also mit Kühlwasser zur Kühlanlage transportiert und dort in sicherer Entfernung in die Luft abgegeben werden.

Die 25 W grünes und blaues Licht des Pumplasers werden vom Farbstofflaser in 4 W Natrium-Licht umgesetzt; damit kann man einen Laser-Leitstern erzeugen, der etwa so hell ist wie ein Stern 11. Größe, wenn man ihn mit einer CCD-Kamera ohne Filter betrachtet (Abb. 10, 11 und 12). Die Alfa-Laser arbeiten im Dauerstrich-Betrieb; dadurch vermeidet man die oben beschriebenen Probleme mit einer Sättigung des Signals in der Natriumschicht. Außerdem erhält man mit Dauerstrich-Lasern bei gleicher Leistung hellere Leitsterne als mit gepulsten Lasern. Ein weiterer Vorteil des Dauerstrich-Betriebes besteht darin, daß das Lasersystem und die adaptive Optik weitgehend unabhängig voneinander arbeiten können. Bei einem gepulsten Laser dagegen ist oft – je nach der gewählten Pulsrepetitionsrate – eine Synchronisierung zwischen den Laserpulsen und einem Shutter oder der Elektronik der Wellenfrontsensor-Kamera erforderlich. Daneben werfen gepulste Laser erhebliche gewichtigere Sicherheitsfragen auf, da ja die Spitzenleistung während der Pulse viel größer ist als die Durchschnittsleistung. Aus allen diesen Gründen erschien ein Dauerstrich-System bei der Auswahl des Lasers für Alfa attraktiv. Dazu kommt, daß von allen Möglichkeiten die Kombination Argon-Ionenlaser und Farbstofflaser die einzige ist, die ohne weiteres auf dem Markt erhältlich ist; alle anderen Lasertypen erfordern entweder erhebliche eigene Entwicklungsarbeit oder Unterstützung durch ein spezialisiertes Laserlabor.

Der Alfa-Strahlprojektor

Das Lasersystem von Alfa befindet sich im Coudé-Labor des 3.5-m-Teleskopes. Von dort wird der Laserstrahl rückwärts durch den Coudé-Strahlengang geführt.



Abb. 12: Aufnahme des Natrium-Fleckens mit dem 1.23-m-Teleskop, 276 m vom 3.5-m-Teleskop entfernt. Aufgrund des Abstandes der beiden Teleskope und der Dicke der Natriumschicht (etwa 10 km, mit einer mittleren Höhe von 90 km) erscheint der Natrium-Fleck stark elongiert; seine Länge ist hier etwa 140". Die Helligkeitsverteilung längs des Striches gibt das Dichteprofil in der Natriumschicht wieder.

Bevor der Laserstrahl den Strahlengang des Teleskops oberhalb des Hauptspiegels kreuzen würde, wird er von einem kleinen Spiegel auf der Deklinationsachse nach unten abgelenkt und unter der Spiegelzelle hindurch zu einem Projektionsteleskop geführt, das an der Seite der Spiegelzelle angebracht ist. Das Projektionsteleskop ist ein Spiegelteleskop in Cassegrain-Anordnung mit 50 cm Durchmesser. Dieser Durchmesser wurde gewählt, um einen möglichst kompakten Leitstern zu erhalten; dies ist dann der Fall, wenn der Durchmesser des Projektors etwa $3 r_0$ entspricht.

Der Strahlengang des Lasers ist mit einer ganzen Reihe von motorisierten Spiegeln ausgestattet, die eine aktive Nachführung des Strahls ermöglichen. Die Strahlage wird an mehreren Stellen mit positionsempfindlichen Detektoren gemessen, so daß Abweichungen von der Sollposition korrigiert werden können. Dies ermöglicht es, den Laserstrahl immer korrekt in das Projektionsteleskop einzufädeln. Ohne diese aktive Regelung würden kleine Abweichungen von der idealen Strahlführung exakt durch die Deklinationsachse zu einer Vignettierung des Laserstrahles führen, wenn das Teleskop vom Zenit weggeschwenkt wird. Außerdem kann der Sekundärspiegel des Projektionsteleskops sowohl mit Piezoaktuatoren gekippt als

auch mit einem Motor längs der Achse verstellt werden. Diese Steuerung ist notwendig, um den Laser in die Natriumschicht fokussieren zu können und um den Laserleitstern immer im Zentrum des Gesichtsfeldes des Wellenfrontsensors zu halten.

Da die Führung des Laserstrahls vom Coudé-Labor zum Projektionsteleskop und die benötigte Regelung doch recht aufwendig sind, erscheint die Alternative sehr attraktiv, den Laserstrahl mittels einer Glasfaser zu transportieren. Hierzu werden derzeit in Zusammenarbeit mit der Europäischen Südsternwarte (ESO) vorbereitende Tests mit dem Alfa-Laser durchgeführt. Es ist notwendig, die hohe Qualität des Laserstrahls beim Transport durch die Glasfaser zu erhalten, damit er noch richtig in die Natriumschicht fokussiert werden kann. Dies ist nur mit Fasern möglich, deren Kern einen Durchmesser von höchstens 6 μm hat. Die größte Schwierigkeit besteht darin, den Laser in eine so kleine Faser einzukoppeln, ohne daß erhebliche Leistungsverluste entstehen oder gar die Faser zerstört wird. Die Leistungsdichte, die an der Faserspitze auftritt, beträgt nämlich ca. $1.4 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$. Dies entspricht der Leistungsdichte, die man erhalten würde, wenn man den gesamten von einem mittelgroßen Elektrizitätsversorger wie etwa den Bayernwerken erzeugten Strom

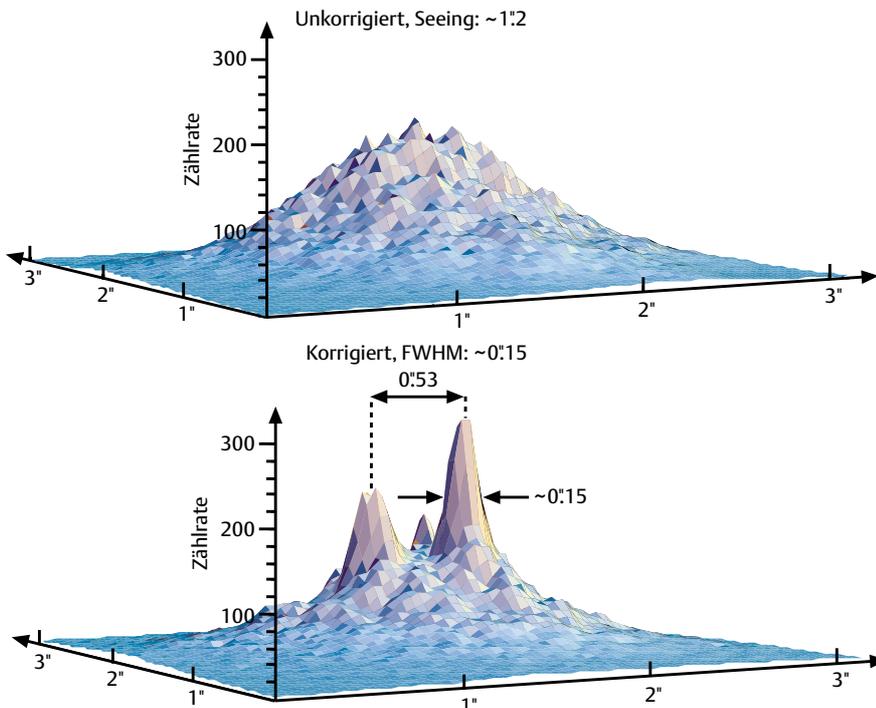


Abb. 13: Das allererste Bild von Alfa bei der Wellenlänge $2.2 \mu\text{m}$, aufgenommen am 7. Oktober 1996, 22:00 MEZ. Der Doppelstern 72 Peg mit einem Abstand der Komponenten von $0.53''$ wurde eindeutig aufgelöst. Die Halbwertsbreite beträgt $0.15''$, die Beugungsgrenze bei dieser Wellenlänge beträgt am 3.5-m-Teleskop $0.12''$.

nehmen würde, um eine einzige Kochplatte zu heizen! Dementsprechend muß man mit größter Sorgfalt dafür sorgen, daß die Faserspitze glatt und sauber ist. In den bisherigen Experimenten ist es gelungen, etwa 70% der Laserleistung durch eine 40 m lange Faser zu transportieren. Sollte es gelingen, diesen Wert auch im Dauerbetrieb zu realisieren, so könnte die Strahlführung des Alfa-Lasers durch eine Glasfaser ersetzt werden.

Erste Ergebnisse und Ausblick

Die erste Beobachtungskampagne mit Alfa wurde vom 3.–10. Oktober 1996 am 3.5-m-Teleskop auf dem Calar Alto durchgeführt. Trotz widriger Wetterbedingungen gelang es, einen Doppelstern (72 Peg) mit einem Abstand von 0.53 Bogensekunden eindeutig aufzulösen. Der Stern wurde hier auch als Leitstern für den Shack-Hartmann-Sensor verwendet. Die Halbwertsbreite (FWHM) war mit 0.15 Bogensekunden nahe an der Beugungsgrenze des Teleskops von $0.13''$ bei der Beobachtungswellenlänge von $2.2 \mu\text{m}$. Das korrigierte Bild in Abb. 13 zeigt deutlich einen Halo, der nicht nur durch den relativ niedrigen Korrekturgrad verursacht wird, sondern auch durch den nicht perfekt ebenen deformierbaren Spiegel.

Abb. 14 zeigt ein Ergebnis aus dem Februar 1997, bei dem das Intensitätsmaximum verzehnfacht ist und der Doppelstern ϕ UMa mit einem Abstand von $0.24''$ eindeutig getrennt ist. Auch hier war der Stern selbst der Leitstern für Alfa. Dieses Bild wurde durch dünne Wolken bei einem relativ schlechten Seeing von $1.7''$ aufgenommen. Der große Fortschritt ist im wesentlichen durch den Einbau des Twyman-Green-Interferometers zu erklären, mit dem die Ebenheit des deformierbaren Spiegels im Ruhezustand kontrolliert wer-

den kann. Erste Messungen mit dem Laserleitstern haben ergeben, daß die erwartete Helligkeit $V \sim 10 \text{ mag}$ erreicht wird.

Die Zukunft

Alle neuen Teleskope der 10-m-Klasse, das Large Binocular Telescope (LBT), die VLTs der ESO, die Keck-Teleskope, das japanische 8-m-Teleskop Subaru und die beiden britisch-amerikanischen 8-m-Teleskope Gemini sollen mit adaptiver Optik ausgerüstet werden. Die Zahl der Aktuatoren reicht dabei von wenigen Dutzend bis zu 1000 (LBT). Auch wenn man an den nächsten Schritt der Beobachtungstechnik denkt, die Koppelung mehrerer Teleskope zu optischen Interferometern, schafft erst die adaptive Optik die Voraussetzung dafür, zu extrem lichtschwachen Objekten vorzudringen, indem durch die Korrektur der Wellenfront mehr Licht zur Interferenz gebracht werden kann.

Alle Untersuchungen der Sternentstehung sowie der Entstehung von Planeten aus zirkumstellaren Scheiben, die Suche nach Braunen Zwergen, die Untersuchung des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxis, Beobachtungen normaler und aktiver galaktischer Kerne, Abbildungen von Gravitationslinsen und viele andere Beobachtungen werden davon profitieren, daß mit der adaptiven Optik der Blick großer Teleskope um das 10–20fache geschärft werden kann. □

Das Alfa-Team: Leiter des Projekts waren die beiden Autoren sowie Donald Hamilton. Weiterhin waren beteiligt: Am MPA in Heidelberg Stefan Hippler, Ralf-Rainer Rohloff, Karl Wagner, Karl Zimmermann, sowie die Feinwerktechnische Werkstatt (Leitung: Heinrich Bellemann) und die Elektronik-Werkstatt (Leitung: Bernhard Grimm). Am MPE in Garching: Wolfgang Hackenberg, Christoph Holstenberg, Norbert Wilnhammer und Anton Emslander.

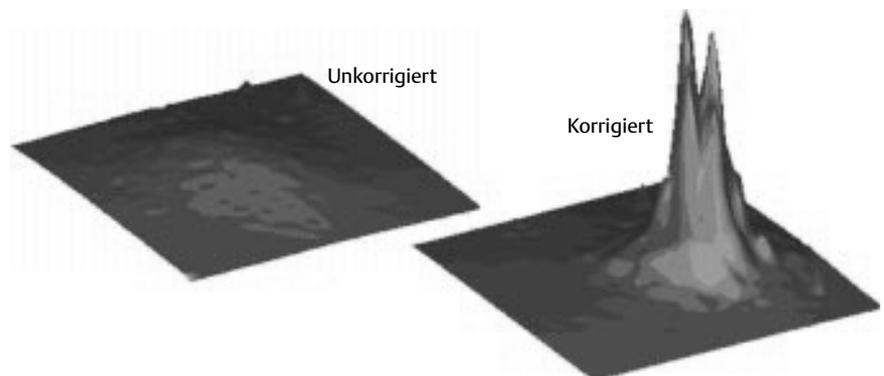


Abb. 14: Das bisher beste Resultat, wieder bei der Wellenlänge $2.2 \mu\text{m}$, aufgenommen während der Beobachtungskampagne im Februar 1997. Der Doppelstern ϕ UMa, Abstand $0.24''$, wurde klar aufgelöst, und das Intensitätsmaximum wurde verzehnfacht. Die Aufnahme wurde bei mäßigem Seeing von $1.7''$ durch dünne Wolken gemacht.