

Nano-Präzision für Blick in die Sterne

Hochgenaue Positioniersysteme in der aktiven und adaptiven Optik ermöglichen noch leistungsfähigere Teleskope.

Doris Knauer

Die Leistungsfähigkeit von Spiegelteleskopen definiert sich im Wesentlichen über das Auflösungs- und Lichtsammelvermögen. Um beides zu erhöhen, werden Teleskope mit immer größeren Hauptspiegeln gebaut. Äußere Störeffekte und atmosphärische Turbulenzen beeinflussen jedoch die Messergebnisse. Um das theoretische Auflösungsvermögen annähernd zu erreichen, ist es notwendig, diese Abbildungsfehler zu korrigieren. Dazu kommen hochpräzise Linearaktoren für die Spiegelsegmente ebenso zum Einsatz wie Hexapod-Systeme für den Sekundärspiegel oder spezielle Positioniertische für die CCD-Kameras.

In der erdgebundenen Astronomie kommen für den sichtbaren und nahen Infrarot-Wellenlängenbereich fast ausschließlich Spiegelteleskope zum Einsatz. Ziel ist es, mit diesen Teleskopen immer weiter entfernte Objekte in immer höherer Auflösung darzustellen. Für das theoretische Auflösungsvermögen, also den Winkelabstand

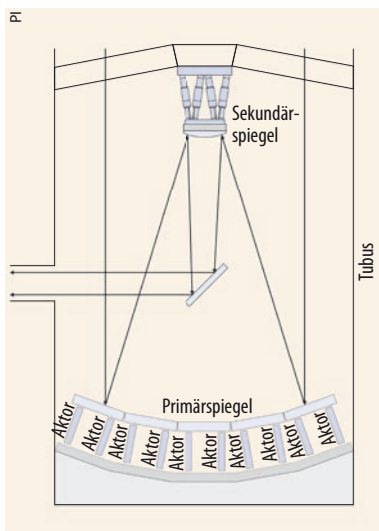
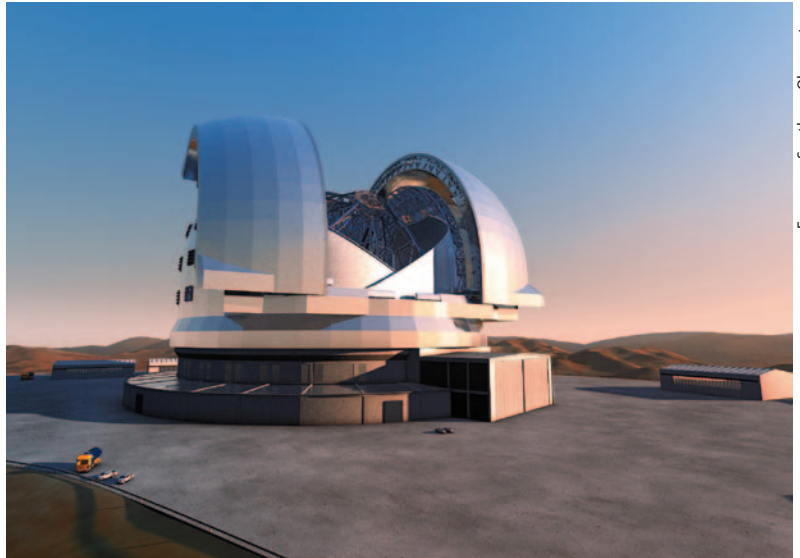


Abb. 1 Aufbau eines Spiegelteleskops am Beispiel des Nathymyth-Prinzips.



Das geplante European Extremely Large Telescope (E-ELT) wird einen Hauptspiegel mit rund 39 Metern Durchmesser haben, der aus knapp achthundert

sechseckigen Spiegелеlementen zusammengesetzt ist. Dort werden hochgenaue Positioniersysteme zum Einsatz kommen.

zwischen zwei gerade noch trennbaren Objekten, sind der Durchmesser der Teleskopoptik und die Wellenlänge des empfangenen Lichts entscheidend. Spiegelteleskope bestehen aus einem Hauptspiegel (Primärspiegel) und einem Fangspiegel (Sekundärspiegel). Beide sind in einem Tubus montiert, der sie auf einer gemeinsamen optischen Achse hält (Abb. 1). Der parabolisch geformte Hauptspiegel sammelt das einfallende Licht und fokussiert es auf den planparallelen Sekundärspiegel. Je nach Teleskopaufbau wird das Licht über einen Tertiärspiegel seitlich aus dem Tubus herausgeleitet und geht direkt oder über weitere Spiegel zum Strahlungsdetektor im wissenschaftlichen Experiment. Der Detektor wandelt die Strahlung in ein messbares Signal um und bildet sie z. B. pixelweise auf den CCD-Chip der Kamera ab. Das zu untersuchende, gebündelte Licht lässt sich vor der Aufnahme noch filtern oder einer Spektralanalyse unterziehen.

Das Lichtsammel- und Auflösungsvermögen erdgebundener Teleskope lässt sich durch einen größeren Hauptspiegel steigern. Aus fertigungstechnischen Gründen werden große Hauptspiegel etwa ab zehn Meter Durchmesser aus einzelnen sechseckigen Spiegelsegmenten zusammengesetzt.

Aufgrund äußerer Störeffekte können erdgebundene Spiegelteleskope jedoch nicht die Abbildungsqualität erbringen, die theoretisch möglich wäre. Die Abweichungen vom optimalen Strahlengang entstehen unter anderem durch die Nachführung des Teleskops, um die Erdrotation oder die Bewegung der anvisierten Objekte relativ zum Himmelshintergrund auszugleichen, durch eine Verbiegung des Teleskop-Tubus aufgrund von Gravitation, durch thermische Effekte oder durch Windlast. Hochpräzise Positioniersysteme helfen in der aktiven Optik dabei, diese Einflüsse auszugleichen und eine dejustierte Optik des Teleskops, die nicht



Abb. 2 Ein hochsteifer hybrider Linearaktor ermöglicht Positioniergenauigkeit und minimale Bahnabweichung.

beugungsbegrenzt abbilden kann, zu kompensieren.

Stabiler Hauptspiegel

Um Abbildungsfehler durch eine Abweichung großer segmentierter Hauptspiegel von der geforderten Form des Paraboloids auszugleichen, müssen Aktoren die Spiegelsegmente auf den Bruchteil der Wellenlänge des Lichtes zueinander ausrichten. Diese Anforderung bedingt dynamische Antriebe, die eine nanometergenaue Positionierung ermöglichen. Hybrid-Antriebe, die einen Spindel-Motor-Antrieb mit einem piezoelektrischen Aktor kombinieren, können diese Vorgaben erfüllen (Abb. 2). Die Linearaktoren erreichen Stellwege von mehreren zehn Millimeter bei einer Auflösung von besser als 2 nm. Unter jedem Spiegelsegment sind drei Antriebe montiert, die die Höhendifferenz benachbarter Segmente ausgleichen. Wird das



Abb. 3 Aktiver Sekundärspiegel (Durchmesser 244 mm) kombiniert mit Hexapod-System, piezoelektrischer Kipp-Plattform und integrierter Momenten-kompensation.

Teleskop nachgeführt oder auf ein anderes Objekt ausgerichtet, entstehen Ausrichtungsgeschwindigkeiten von bis zu 250 $\mu\text{m/s}$. Dabei werden beachtliche Massen bewegt. So hat der einzelne Antrieb je nach Segmentgröße Lasten bis 900 N zu bewegen bzw. zu halten, wie beispielsweise bei der Nachführung des Hauptspiegels des European Extremely Large Telescope, das die Europäische Südsternwarte derzeit plant. Hier wiegt ein Spiegelsegment etwa 270 kg. Über einen hochauflösenden Sensor lassen sich eventuelle Abweichungen des Motor-Spindel-Antriebs messen und mittels des hochdynamischen Piezoaktors korrigieren. Dies garantiert eine extrem hohe Positioniergenauigkeit der Hybrid-Antriebe bei der Ausgleichsbewegung.

Sekundärspiegel im Fokus

Auch der Sekundärspiegel muss äußeren Einflüssen auf die Mechanik des Teleskops entgegenwirken, um den Lichtweg optimal zu halten. Hier eignet sich ein Hexapod-System mit sechs Freiheitsgraden der Bewegung, das hinter dem Fangspiegel montiert wird. Die Parallelkinematik des Hexapods erlaubt eine individuelle Positionierung jeder Achse mit Auflösungen im Sub-Mikrometer- und Bogensekunden-Bereich. Der Aufbau ist wesentlich kompakter und steifer als bei seriell gestapelten Mehrachsensystemen und führt zu einer sehr hohen Resonanzfrequenz. Hexapoden können die Position des Sekundärspiegels präzise über mehrere Millimeter ausrichten. Ergänzend zur Nachführung ist es möglich, das Strahlenbündel, das auf den Sekundärspiegel trifft, in z-Richtung zu fokussieren.

Zur Kompensation niederfrequenter Vibrationen oder Störungen werden die Hexapod-Systeme mit Piezo-Kippspiegel-Systemen kombiniert. Diese Kipp-Plattformen zeichnen sich durch kurze Ansprechzeiten aus und sind ideal für kleine Korrekturwinkel von ± 2 mrad bei Frequenzen bis mehreren 100 Hz. Um zu ver-

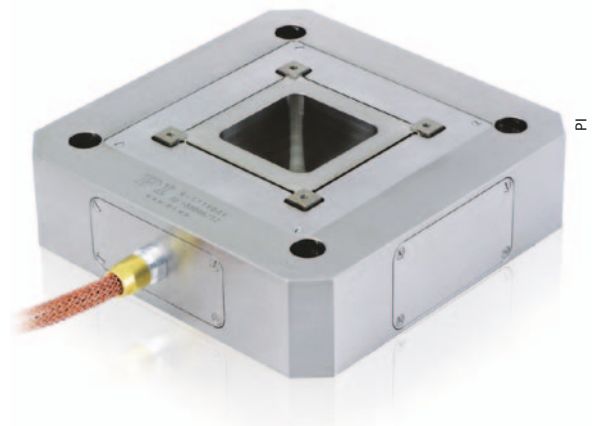


Abb. 4 Der Positioniertisch für die CCD-Wissenschaftskamera eignet sich für Kryostaten und Vakuumtechnik.

hindern, dass schnelle Kippbewegungen Reaktionskräfte in die Teleskopstruktur einleiten, sind die Positioniersysteme mit einer integrierten Momentenkompensation ausgestattet (Abb. 3).

Präzise positioniert

Außerhalb des Tubus wird die Strahlung teilweise über mehrere Spiegelsysteme geführt, bis sie auf die CCD-Sensoren im Experiment trifft. Häufig schwenkt das Experiment mit dem Teleskop mit. Um den Strahlengang für eine hohe Bildqualität stabil zu halten, sind Antriebe nötig, die auch über die Lageänderung des Teleskops präzise in Position bleiben. Klassische kinematische Spiegelhalter mit Standardaktoren können unter den teilweise beschränkten Platzverhältnissen im Experiment nicht die geforderte Stabilität, Auflösung und

PIEZOAKTOREN

Piezoaktoren wandeln elektrische Spannung direkt in mechanische Auslenkung und umgekehrt. Dabei lassen sich Stellwege von einigen hundert Mikrometern und hoher Dynamik mit Frequenzen bis zu mehreren hundert Hertz erreichen. Da die Auslenkung des Piezoaktors auf Verschiebungen innerhalb der molekularen Struktur beruht, gibt es keine rotierende oder reibende Mechanik. Dadurch sind Bewegungen im Sub-Nanometerbereich mit schnellen Ansprechzeiten und hoher Dynamik möglich.

Best of

Resonanzfrequenz erzielen. Piezoelektrische Schreitantriebe kombinieren dagegen große Stellwege mit hoher Steifigkeit und hoher Auflösung bei gleichzeitig kompaktem Bauraum. Sie gewährleisten damit eine große Positionsstabilität bei der Strahlführung.

Die Justierung der Wissenschaftskamera spielt bei der Abbildungsqualität ebenfalls eine entscheidende Rolle. Damit über die gesamte Fläche des CCD-Chips die Bildinformationen in Fokusebene bleiben, werden zur 5-Achsen-Positionierung der Kamera Positioniersysteme mit Piezomotoren eingesetzt (Abb. 4). Da sich die Kamera in einem Kryostat und häufig im Vakuum befindet, um thermisches Rauschen und Kondensationsbildung zu vermeiden, müssen die Antriebe unter diesen Bedingungen zuverlässig und präzise arbeiten und gleichzeitig kompakt gebaut sein. Sie gewährleisten, dass der Fo-

kus stabil bleibt und Verkippungen ausgeglichen werden.

Adaptiv gegen Turbulenzen

Durchläuft eine plane Lichtwellenfront eines weit entfernten Sterns die Erdatmosphäre, wird die Strahlung aufgrund atmosphärischer Turbulenzen gebrochen, und das Licht legt unterschiedlich lange Wege zurück. Es kommt zu einer Verzerrung der ehemals ebenen Wellenfront von einigen Mikrometern und damit zur Verschlechterung der Bildqualität bei erdgebundenen Messungen im optischen Spektralbereich. In Folge dessen wird die Abbildung unscharf dargestellt (Seeing). Um eine korrigierte Lichtwelle an die hochauflösende Kamera weiterzuleiten, sind Techniken der adaptiven Optik nötig (Abb. 5): Die im Teleskop gebündelte Strahlung wird von einem deformierbaren Spiegel geglättet und reflektiert. Ein Strahlteiler leitet einen Teil des Lichts zur Kamera, der andere Teil des Strahls gelangt zum Wellenfrontsensor, der die verbleibenden und die neu hinzu gekommenen Störungen der Wellenfront misst. Bevor die gestörten Lichtwellen den deformierbaren Spiegel erreichen, treffen sie auf einen Piezo-Kippspiegel (Abb. 6). Der schnelle Kippspiegel kompensiert das Bildzittern (Jitter), das durch die atmosphärischen Turbulenzen und durch Vibrationen in der Teleskopstruktur entsteht und leitet den Strahlengang zum deformierbaren Spiegel. Dabei muss die Positionierung des Kippspiegels mit

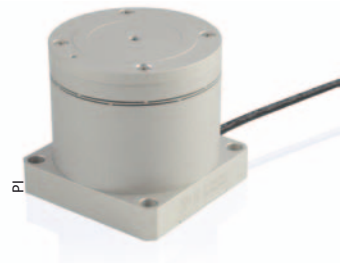


Abb. 6 Schnelle Piezo-Kipp-Plattformen erlauben hochdynamische und präzise Kippbewegungen.

Frequenzen von mehreren hundert Hertz bis Kilohertz und Stellwegen von 0,1 bis 2 mrad erfolgen.

Zur Bestimmung der optischen Störungen kann der Wellenfrontsensor einen geeigneten Leitstern in der Nähe des Beobachtungsobjekts analysieren oder das Licht eines künstlichen Laserleitsterns zur Analyse verwenden. Die Störungen werden in Echtzeit gemessen, in einem Echtzeitcomputer verarbeitet und in einer Regelschleife in entsprechende Signale für den Piezo-Kippspiegel und den deformierbaren Spiegel umgerechnet, um die Bildinformationen soweit wie möglich von Verzerrungen zu befreien.

Fazit

Nur mit hochgenauen Positionierlösungen in der aktiven und adaptiven Optik ist es möglich, die theoretische Auflösung erdgebundener Spiegelteleskope annähernd zu erreichen und immer hochauflösendere Messergebnisse und bessere wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Frühzeit des Kosmos zu generieren.

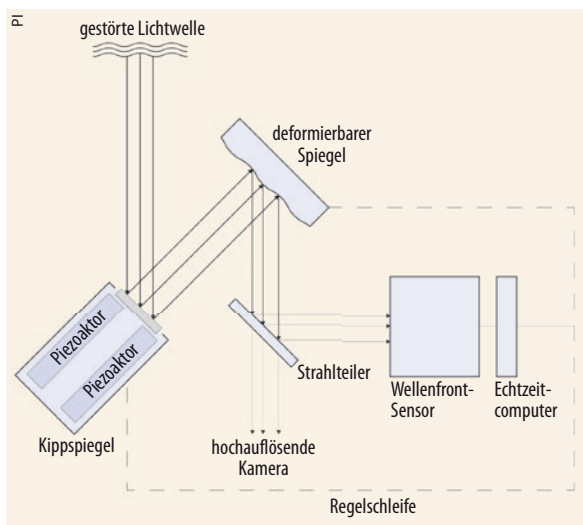
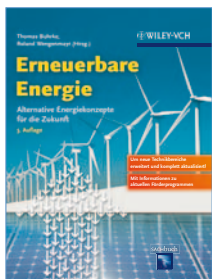


Abb. 5 Prinzip und Komponenten der adaptiven Optik.



T. Bührke, / R. Wengenmayr (Hrsg.)

Erneuerbare Energie

Alternative Energiekonzepte für die Zukunft

Führende Wissenschaftler erklären wie u. a. Photovoltaik, Solarthermie, Solare Klimatechnik, Wind- und Wasserkraft, Brennstoffzellen, energieeffizientes Bauen, Wasserstoffspeicher zur Netzstabilisierung funktionieren. Das hochaktuelle Thema jetzt in der 3. Auflage mit 20 % mehr Information!

Pressestimmen zur Voraufgabe:

„Herausragend ist die Aufbereitung des Bandes mit vielen Grafiken...“

Die Rheinpfalz, Pirmasenser Zeitung

„Mit diesem Buch stößt der Wiley-VCH Verlag eine neue Tür auf. ... das Lesen macht Spaß. Man wünscht sich mehr davon.“

Materials and Corrosion

„Allgemein verständlich und trotzdem fachlich korrekt bietet das Buch einen schnellen, kompakten Überblick zum Titelthema.“

VDI-Nachrichten

3., aktualis. u. erg. Aufl.
Dezember 2011 182 S. mit
130 Abb., davon 128 in Farbe,
und 9 Tab. Gebunden € 34,90
ISBN: 978-3-527-41108-5

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, E-Mail: service@wiley-vch.de, www.wiley-vch.de

 WILEY-VCH