

Adaptive Optik

Der scharfe Blick ins All und ins Auge

STEFAN HIPPLER

Heutige Großteleskope erzielen erst durch den Einsatz adaptiv optischer Systeme ihre volle Leistungsfähigkeit. Für die zukünftige Generation der Future Giant Telescopes mit Spiegeldurchmessern von 30 bis 100 m wird die adaptive Optik absolut unersetzbar sein. Doch auch auf anderen Gebieten, wie der medizinischen Optik oder der hoch auflösenden Mikroskopie, spielt sie eine entscheidende Rolle.



Fünzig Jahre ist es her, dass der amerikanische Astronom Horace W. Babcock mit seinem Aufsatz über „The Possibility of Compensating Astronomical Seeing“ die Grundlagen für die moderne adaptive Optik in der Astronomie legte. Unter dem Seeing verstehen Astronomen das Verschmieren fotografischer Aufnahmen bei langen Belichtungen, hervorgerufen durch die Turbulenzen in der Luft. Man erkennt diesen Effekt der Szintillation bereits mit bloßem Auge am Flimmern des Sternlichts.

Das Seeing verhindert das Erreichen des maximal möglichen Winkelauflösungsvermögens eines Teleskops, das durch die Beugungsgrenze gegeben ist. Diese steigt linear mit dem Spiegeldurchmesser und nimmt umgekehrt proportional zur Wellenlänge ab. Die Beugungsgrenze eines modernen Großteleskops, dessen Hauptspiegel acht- bis zehn Meter Durchmesser besitzt, liegt im sichtbaren Bereich (Wellenlänge 550 nm) bei etwa 0,014 Bogensekunden. Unter besten atmosphärischen Bedingungen erzielt man hingegen wegen des Seeing lediglich etwa 0,5 Bogensekunden. Mit adaptiver Optik lässt sich demnach das Auflösungsvermögen dieser Teleskope, sprich die Bildschärfe, um mehr als eine Größenordnung steigern – mit vergleichsweise geringen Kosten.

Allerdings waren zu Babcocks Zeiten die technischen Möglichkeiten noch nicht vorhanden, um seine Ideen in die Tat umzusetzen. Erst Anfang der 1990er-Jahre ging das erste astronomische adaptiv-optische System am 3,6-m-Teleskop der Europäischen Südsternwarte, ESO, in Chile in Betrieb. Bereits in den 70er-Jahren waren geheime Forschungen und Entwicklungen auf diesem Gebiet unter anderem im Rahmen der amerikanischen Strategic Defense Initiative (SDI, „Star Wars“) schon einen Schritt weiter gewesen. Als der kalte Krieg dem Ende zu ging, wurden die Forschungsergebnisse veröffentlicht, wovon schließlich die wissenschaftliche Entwicklung profitierte. Heute arbeitet fast jedes optische Großteleskop mit adaptiver Optik, und die im Bau befindlichen Geräte werden von vornherein mit dieser Technik ausgestattet (Abbildung 1).

Abb. 1 Das Herzstück der adaptiven Optik des 6,5-m-Teleskops auf dem Mount Hopkins in Arizona: der adaptive Sekundärspiegel mit 336 Aktuatoren montiert am Frontring des Teleskops. (Foto: L. Close, Steward Observatory, Arizona)

Der Kampf gegen die Luftunruhe

Die Ursache des astronomischen Seeing lässt sich wie folgt veranschaulichen. Das von einem Stern ausgesandte Licht stelle man sich als Kugelwelle vor, die beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre wegen der riesigen Entfernungen nahezu perfekt eben ist. Beim Durchgang durch die verschiedenen Luftschichten erfährt diese ebene Welle jedoch räumlich und zeitlich veränderliche Störungen. Warme Luftschichten steigen auf, kalte sinken ab. Es bilden sich Luftzellen mit unterschiedlichen Temperaturen, die sich konvektiv mischen. Da der Brechungsindex der Luft temperaturabhängig ist, ändern sich die optische Weglänge (sprich die Phase) und die Ausbreitungsrichtung des Lichts beim Durchgang durch die turbulente Atmosphäre ständig. Die Luftzellen wirken wie umherwandernde Linsen. Sie erzeugen die störenden Phasen- und Amplitudenfluktuationen (Szintillation).

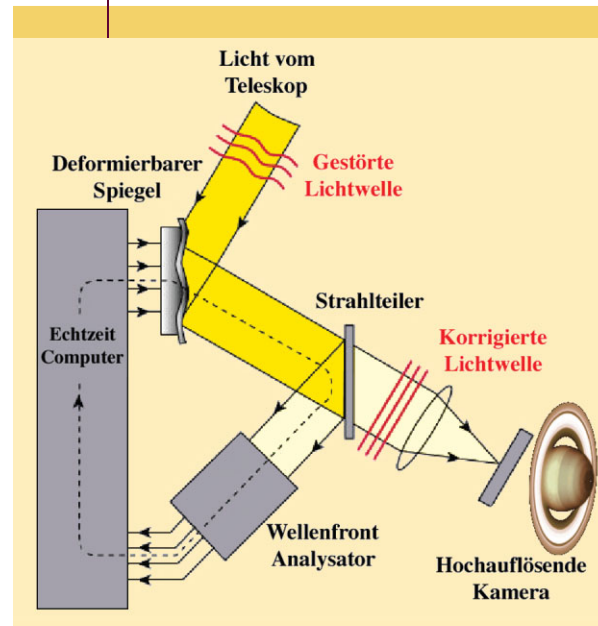
Die ursprünglich ebene Welle wird beim Durchgang durch die Atmosphäre gewellt und weist bei der Ankunft im Teleskop „Berge und Täler“ mit einer Höhe von einigen Mikrometern auf. Diese Beeinflussung der Wellenfront durch atmosphärische Turbulenzen hat zwei Folgen. Zum einen splittet die Sternabbildung in viele kleine Bilder, so genannte Speckles, auf, deren Zahl etwa der Gesamtzahl der durchquerten Turbulenzzellen entspricht. Die Speckles verteilen sich in einem kreisförmigen Gebiet mit einem Durchmesser von etwa einer halben Bogensekunde und tanzen darin, entsprechend der turbulenten Luftbewegung, in Bruchteilen von Sekunden herum. Zum anderen wandert der gesamte Speckle-Haufen langsam hin und her. Die Überlagerung dieser beiden Effekte führt bei länger belichteten Aufnahmen zu einem verwischten Sternbild, dem Seeing.

Die adaptive Optik kompensiert die Wanderbewegung des Flecks während der Aufnahme und biegt die „verbogene“ Welle wieder gerade (Abbildung 2). Letzteres geschieht, indem das Licht auf einen dünnen, flexiblen Spiegel fällt, der genau das gleiche Muster der Welle mit halber Höhe der „Berge und Täler“ aufweist. Nach der Reflexion ist die Welle dann wieder eben, und auf dem Detektor erscheint das unverzerrte, beugungsbegrenzte Bild. Die Deformation des Spiegels erfolgt über kleine Stellelemente auf der Rückseite.

Um dieses Vorhaben in die Realität umzusetzen, ist es nötig, die Verzerrung der Wellenfront aktuell mit einem Wellenfrontanalysator zu bestimmen und den adaptiven Spiegel dementsprechend zu verformen (siehe „Der Wellenfrontsensor“, Seite 30). Das vom Hauptspiegel kommende Lichtbündel fällt auf den adaptiv optischen Spiegel, wird von dort reflektiert und gelangt über einen Strahlteiler einmal auf den Detektor und zum anderen auf den Wellenfrontsensor. Deformierbarer Spiegel und Wellenfrontsensor bilden dabei über einen schnellen Rechner einen geschlossenen Regelkreis.

Die räumliche und zeitliche Auflösung des Regelkreises müssen den charakteristischen Eigenschaften des störenden Mediums genügen, um eine gute Korrektur zu errei-

ABB. 2 | AUFBAU



Funktionsprinzip einer adaptiven Optik.

chen. Soll beispielsweise ein 8-m-Teleskop bei einer Wellenlänge von $0,8 \mu\text{m}$ beugungsbegrenzte Bilder liefern, muss typischerweise die Wellenfront mit einer Abtastfrequenz von 2 kHz bestimmt werden. Dazu ist die Wellenfront örtlich alle $0,2 \text{ m}$ zu messen, was bei einem 8-m-Teleskop etwa 1300 Messpunkten entspricht. Der deformierbare Spiegel sollte auf der Rückseite in etwa die gleiche Zahl von Stellelementen haben.

Als Stellelemente werden häufig Piezo-Aktuatoren eingesetzt. Der zugrunde liegende Piezo-Effekt tritt bei bestimmten Keramiken wie Blei-Zirkon-Titan-Legierung auf: Beim Anlegen einer Spannung reagiert die Keramik mit einer Deformation. Der in Abbildung 1 gezeigte adaptive Spiegel nutzt so genannte Voice-Coil-Aktuatoren, die ähnlich einer Lautsprecherspule funktionieren. Durch Ändern der Polarität und Amplitude des Spulenstroms kann eine Membran angezogen und weggedrückt werden.

Man kann sich nun leicht vorstellen, dass der Echtzeitcomputer über enorme Rechenleistungen verfügen muss,

INTERNET

Allgemeines zur adaptiven Optik

www.nsf.gov/od/lpa/news/media/01/fsjan01aas.htm

Adaptive Optik in der Astronomie

www.mpia.de/AO/INSTRUMENTS/FPraktikum.html

Adaptive Optik am Auge

www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca1_2000/bille.html

MEMS und Mikrospiegel

www.fraunhofer.de/fhg/press/pi/2004/07/Mediendienst_72004Thema5.jsp

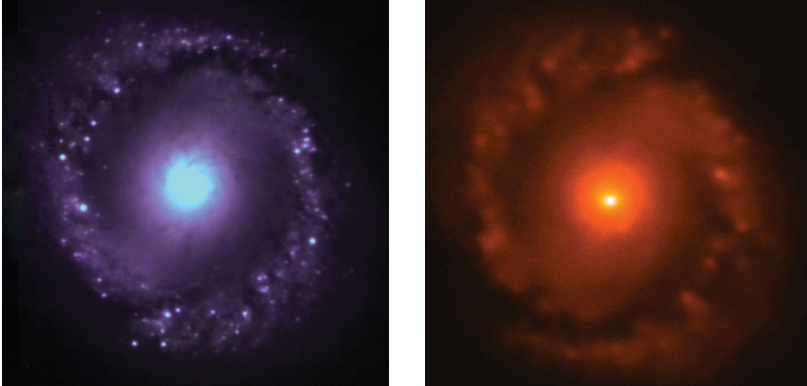


Abb. 3 Links: Der aktive Kern der Galaxie NGC 1097, aufgenommen mit der adaptiv optischen Infrarotkamera NACO am Very Large Telescope. **Rechts:** Aufnahme im nahen Infrarot mit dem Gemini-Süd-Teleskop ohne adaptive Optik bei 0,5 Bogensekunden Seeing (Fotos: A. Prieto, MPI für Astronomie, Heidelberg, Gemini Observatory/NOAO/ Abu Team).

um die in solchen Regelschleifen nötigen Matrizenmultiplikationen durchzuführen. Im Beispiel mit 1300 Korrektur-elementen muss der Rechner an die sieben Milliarden Gleitkomma-Rechenoperationen pro Sekunde ausführen. Dies lässt sich mit den heute üblichen Rechnern nur im Verbund bewerkstelligen, beispielsweise in einer Parallelrechnerkonfiguration mit gemeinsamem Hauptspeicher (Shared-memory-Prozessoren, SMP) [1]. Hierfür bräuchte man aktuell 16 bis 32 der schnellsten Prozessoren. Hinzu kommen in der Regel noch weitere Rechenaufgaben, wie Signalaufbereitung, Kompensation, Optimierung, Auslesen des Wellenfrontsensors und Ansteuerung des deformierbaren Spiegels.

Zwei Beispiele sollen die Leistungsfähigkeit dieser neuen Technik demonstrieren. Abbildung 3 zeigt links eine Infrarotaufnahme des zentralen Bereichs der Spiralgalaxie NGC 1097, aufgenommen mit der adaptiv optischen Infrarotkamera NACO am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte, ESO. Das Bild zeigt die innersten 27×27 Quadratbogensekunden der insgesamt mehrere Bogenminuten durchmessenden Galaxie in Sternbild Fornax. Zu erkennen sind ringförmig verteilte Sternentstehungsgebiete, die das Kerngebiet umgeben. Dank der hohen Winkelauflösung des Instruments zeigt dieses Bild bisher unbekannte Strukturen in der Verteilung von Gas, Staub und Sternen im gesamten Feld. Am interessantesten sind die mehrfachen Staubfinger unmittelbar beim Kern und beim Ring. Der Ring selbst ist in mehr als 200 Sternentstehungsgebiete, getrennt von feinen Filamenten, aufgelöst.

Das eigentliche Zentralgebiet bleibt aber unaufgelöst. Dort vermutet man ein sehr massereiches Schwarzes Loch, das für eine starke Aktivität des Kerngebietes verantwortlich ist. Die Größe dieses Bereichs ließ sich aufgrund dieser Aufnahme zu 50 Lichtjahren festlegen. Im Vergleich dazu sieht man rechts eine Aufnahme desselben Gebietes, aufgenommen mit dem amerikanischen Teleskop Gemini-Süd. Die Beobachtungsbedingungen waren mit einem Seeing

von 0,5 Bogensekunden hervorragend. Dennoch sind viele Details nicht erkennbar.

Ein weiteres Highlight astronomischer Beobachtungstechnik aus der jüngsten Vergangenheit war die Untersuchung eines sehr engen Paares Brauner Zwerge, das erst vor einigen Jahren bei einer Himmelsdurchmusterung im Infraroten gefunden wurde. Das Doppelsystem befindet sich in 40 Lichtjahren Entfernung. Mit mehreren Instrumenten, von denen NACO und Hokupa'a am Gemini-Teleskop auf Hawaii mit einer adaptiven Optik arbeiten, ist es im Laufe von vier Jahren gelungen, die Bahn der Braunen Zwerge zu bestimmen. Das ermöglichte es, die Masse und weitere Eigenschaften dieses besonders massearmen Doppelsystems zu bestimmen.

Die beiden Objekte umkreisen einander in zehn Jahren auf einer elliptischen Umlaufbahn mit etwa 2,5 Erdbahnradien Abstand. Der Winkelabstand beider Objekte von 0,18 Bogensekunden entspricht der Größe einer Ein-Euro-Münze in 25 km Entfernung. Aus den Beobachtungen ließ sich die Gesamtmasse des Systems zu knapp 15% der Sonnenmasse ableiten. Dabei hat der etwas schwerere Partner 7,5 - 9,5% der Sonnenmasse und der leichtere 5 - 7%. Objekte mit weniger als 7,5% der Sonnenmasse zünden im Innern keine dauerhafte Kernfusion und sind daher keine Sterne, sondern Braune Zwerge, auch verhinderte Sonnen oder Superplaneten genannt. Der schwerere Partner ist nach dieser Definition kein Brauner Zwerg sondern ein ultrakalter Stern.

Allerdings hat der Einsatz einer adaptiven Optik auch seine Grenzen. Der Grund hierfür ist, dass der Wellenfrontsensor eine bestimmte Mindestzahl an Photonen benötigt, um arbeiten zu können. Anders gesagt: In dem Beobachtungsfeld muss ein Stern mit bestimmter Mindesthelligkeit vorhanden sein. Dies ist aber nicht immer der Fall. Aus diesem Grund kam man schon früh auf die Idee, in ausreichender Höhe über dem Teleskop eine künstliche helle Lichtquelle zu positionieren und diese für die adaptive Optik zu nutzen. Anfang der 1980er-Jahre wurde am 1,5-m-Teleskop des Starfire Optical Range ein gepulster Laser eingesetzt, den man auf eine Höhe von 15 km fokussierte. Das grüne Laserlicht wird von den Luftmolekülen zurückgestreut und kann vom Wellenfrontsensor mit seinem zeitlich auf die von 15 km Höhe kommenden Laserpulse synchronisierten Detektor genutzt werden. Diese Art von künstlichem Laserleitstern nennt man Rayleigh Beacon.

Im Jahr 1985 regten die Astronomen Antoine Labeyrie und Renaud Foy ein verwandtes Verfahren an. Es nutzt die Tatsache, dass in circa 90 km Höhe in der Atmosphäre Natriumatome vorhanden sind, die mit einem Natriumlaser zum Leuchten angeregt werden können. Einen solchen Natrium-Laser-Leitstern entwickelten wir am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Er ging 1996 als erste europäische adaptive Optik am Calar-Alto-Observatorium in Spanien in Betrieb (Abbildung 4).

Die Helligkeit dieses künstlichen Sterns hängt neben der Natriumdichte in der Mesosphäre stark von der Aus-

gangsleistung des Lasers ab. Im Fall unseres Systems ALFA mit circa 4 W im Dauerstrichbetrieb lag dies an der Grenze der Empfindlichkeit der adaptiven Optik. Zur Zeit wird für das Very Large Teleskop in Chile ein 10-W-Laser getestet. Dieses System wird dort ab Mitte 2005 arbeiten.

Breitbandige Kommunikation

Mit der turbulenten Atmosphäre kämpfen nicht nur Astronomen. Auch wenn es darum geht, eine Kommunikationsstrecke mit möglichst hoher Bandbreite herzustellen, wird diese Technik nötig. Dies kann bei der Datenübertragung zwischen einer Bodenstation und einem Raumfahrzeug oder einem Satelliten der Fall sein. Eine solche Freistrahls-Kommunikation kann mit Lasern realisiert werden. Mitte der 1990er-Jahre wurde hiermit bereits experimentiert. So baute das Deutsche Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR, ihr Experiment SILEX (Semiconductor Inter-satellite Link Experiment). Japanische Forscher planen ein Experiment mit dem japanischen Modul JEM (Kibo), das an die Internationale Weltraumstation ISS angebaut werden soll.

Bei dieser Boden-Weltraum-Kommunikation sind hauptsächlich die von der Atmosphäre verursachten Phasenfluktuationen unerwünscht. Bei horizontaler Kommunikation, beispielsweise zwischen zwei Gebäuden auf einem Firmengelände, treten zudem durch Szintillation, also Amplitudenfluktuationen, hervorgerufene Intensitätsschwankungen hinzu.

Ein Blick ins Auge

Sorgt die turbulente Atmosphäre bei den Astronomen für unscharfe Bilder, so ist in der medizinischen Augenoptik und Augenheilkunde das Auge oft selbst der Verursacher unscharfer Bilder. Die Idee, die von der Astronomie kommende adaptive Optik auch für ophthalmologische Diagnosegeräte zu verwenden, kam 1994 auf. Damals wurde am Institut für angewandte Physik der Universität Heidelberg [2] das menschliche Auge erstmalig mit einem Wellenfrontsensor vom Typ Shack-Hartmann untersucht.

Solche bis dahin fast ausschließlich in der Astronomie eingesetzten Wellenfrontsensoren messen optische Aberrationen an mehreren Punkten der geöffneten Augenpupille. Hierbei wird ein Laserstrahl geringer Leistung ins Auge geleitet und von der Retina reflektiert. Dieser Strahl fällt über einen Strahlteiler und einen Parabolspiegel auf den deformierbaren Spiegel. Von dort aus gelangt das Licht über einen weiteren Parabolspiegel und Strahlteiler sowohl in den Wellenfrontsensor als auch in die Kamera. Der Wellenfrontsensor misst die Augenfehler und steuert den deformierbaren Spiegel so an, dass diese möglichst perfekt kompensiert werden. Gemessen wird die Differenz der von der Retina reflektierten Welle zur einfallenden planen Wellenfront auf einem Raster von beispielsweise acht mal acht Punkten über die Augenpupille mit einem Durchmesser von etwa 5 mm (Abbildung 5).

Auf diese Weise lassen sich die Augenfehler objektiv und von hoher Ordnung bestimmen und für diagnostische

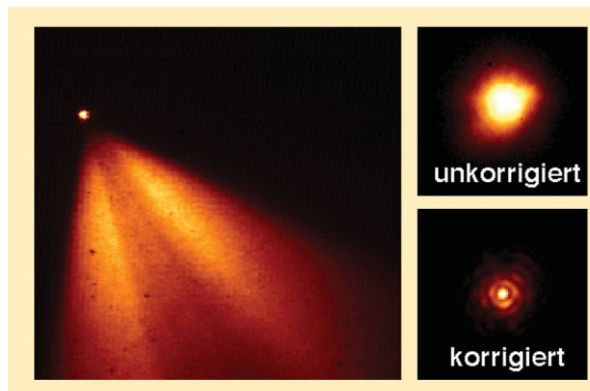


Abb. 4 Links: Bild des ALFA-Laserleitsterns mit Rayleigh-Rückstreuung aus der Teleskopkuppel heraus aufgenommen. Rechts: Aufnahmen eines Sterns mit und ohne lasergestützte adaptive Optik.

Zwecke mit einem deformierbaren Spiegel in Echtzeit korrigieren. Mit dieser Methode gelang es Forschern von der Universität Rochester, USA, erstmals, einzelne Photorezeptoren am lebenden Auge darzustellen [3]. Die Retina des menschlichen Auges besitzt zwei Arten lichtempfindlicher Photorezeptoren. Für die Erkennung von Grauwerten sorgen in jedem Auge etwa 120 Millionen Stäbchen, das Farbsehen übernehmen circa 6,5 Millionen Zäpfchen. Unter den Zäpfchen gibt es rot-, grün- und blauempfindliche im Verhältnis 10:10:1. Die Farbverteilung der Zäpfchen kann individuell deutlich unterschiedlich sein (Abbildung 6). Die Breite eines Zäpfchens beträgt etwa 3 μm . Bis vor einigen Jahren war die genaue Verteilung der roten und grünen Zäpfchen am lebenden Auge nicht messbar.

Scharfer Blick in lebende Zellen

Mit ähnlichen Problemen wie die Astronomen kämpfen auch Biologen, wenn sie immer feinere Strukturen in biologischem Gewebe untersuchen wollen, ohne das Gewebe zu schädigen. Hier sind in der Vergangenheit enorme Verbesserungen gegenüber dem klassischen Lichtmikroskop gelungen. Ohne auf die Funktionsweise einzugehen, seien

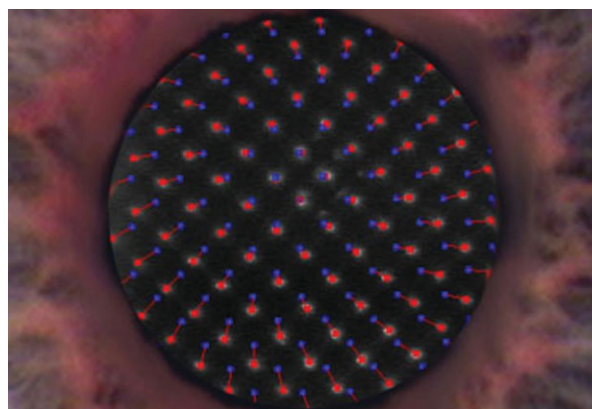


Abb. 5 Auge mit geöffneter Iris. Über der schwarzen Pupille sind die Messdaten des Shack-Hartmann-Wellenfrontsensors abgebildet. Die Referenzwellenfront (blaue Punkte) und die vom Auge verzerrte Wellenfront (rote Punkte) weichen sichtbar voneinander ab (Foto: J. Schwiegerling, University of Arizona).

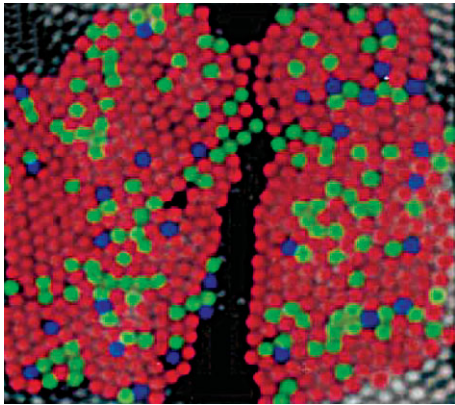


Abb. 6 Mit adaptiver Optik gewonnene Falschfarbenaufnahme der nasalen Retina. Blaue, grüne und rote Farben repräsentieren die kurz-, mittel- und langwellig empfindlichen Zäpfchen. (Foto: David R. Williams, Center for Visual Science, University of Rochester, USA.)

hier als Beispiele die konfokale Mikroskopie, die Laser-Scanning-Konfokalmikroskopie, die 4π -Mikroskopie und aktuell die Stimulated Emission Depletion (STED)-Mikroskopie erwähnt. Inzwischen wurde auch die optische Kohärenztomografie erfolgreich mit adaptiver Optik gekoppelt.

Die adaptive Optik kommt bei der so genannten Zweiphotonen-Mikroskopie zum Einsatz [4]. Hier wird das Licht eines gepulsten Infrarotlasers durch das Objektiv eines Mikroskops fokussiert. Nur im Brennpunkt ist die Lichtintensität so hoch, dass zwei Infrarotphotonen gleichzeitig von bestimmten

Molekülen aufgenommen werden. Diese werden hierdurch zur Emission von Fluoreszenzlicht angeregt. So entsteht ausschließlich im Brennpunkt die Fluoreszenz. Um einen zweidimensionalen optischen Schnitt durch ein Gewebe zu erhalten, muss man dieses mit dem Laserstrahl scannen. Wie in Abbildung 7 skizziert, lenkt man den Infrarotlaserstrahl via Scannereinheit (schwarz gestrichelter Rahmen) über ein Okular und durch einen Strahlteiler auf einen deformierbaren Spiegel. Von dort wird das Licht reflektiert und gelangt über den Strahlteiler und einen weiteren Farbteiler durch das Objektiv auf die Probe. Das vom Fluoreszenzfarbstoff emittierte Licht (mit der halben Wellenlänge des

anregenden Laserlichts) wird vom Farbteiler auf den Detektor (Photomultiplier) gelenkt.

Die Vorteile dieser Methode liegen darin, dass Infrarotlicht biologische Proben weniger stark schädigt als UV-Licht und es weniger stark gestreut wird. Außerdem entsteht außerhalb der Brennebene kein störendes Fluoreszenzlicht, wodurch sich der Kontrast erhöht. Mit diesem Verfahren gelang es kürzlich einer Forschergruppe in Glasgow, den Tiefenbereich des zu untersuchenden Gewebevolumens von $3,4 \mu\text{m}$ auf $46,2 \mu\text{m}$ zu erhöhen und eine Tiefenauflösung von $1,25 \mu\text{m}$ zu erzielen.

Aufgabe des deformierbaren Spiegels ist es, das auf die Probe fallende Laserlicht möglichst präzise in der gewünschten Tiefe zu fokussieren. Dabei verursachen die vor dem zu untersuchenden Volumen liegenden Gewebeschichten optische Verzerrungen.

Diese können mit dem deformierbaren Spiegel kompensiert werden. Im hier gezeigten Aufbau wurde der deformierbare Spiegel in einer Regelschleife so angesteuert, dass der Detektor das schärfste und gleichzeitig hellste, kontrastreichste Signal liefert.

Große Kapazitäten bei optischen Speichermedien

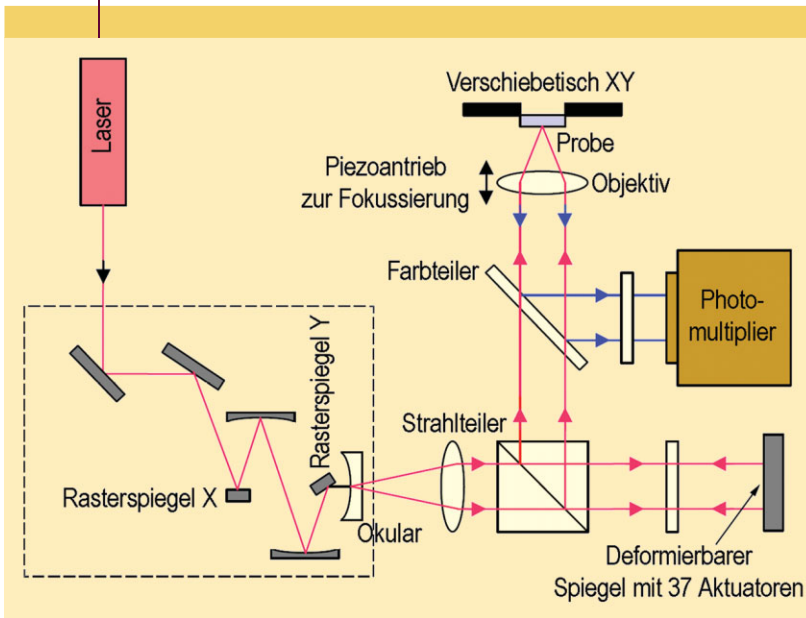
Eine ähnliche Problematik wie bei der Zweiphotonen-Mikroskopie tritt beim Lesen und Schreiben in optischen Medien auf – ein kritischer Punkt auf dem Weg zu immer höheren Speicherdichten [5]. Bei herkömmlichen DVDs beträgt der Spurbabstand circa $0,6 \mu\text{m}$ und die Länge der Datenbits (pits) circa $0,3 \mu\text{m}$ (Abbildung 8 links unten). Bei den gerade auf den Markt kommenden Blu-Ray- oder HD-DVDs sind diese Strukturen bereits um einen Faktor zwei kleiner. Um solche Strukturen in mehreren Ebenen (Multi-layer-DVD) auszulesen und zu beschreiben, werden statt roter Laser bei konventionellen DVDs blaue Laser mit Wellenlängen um die $0,4 \mu\text{m}$ eingesetzt. Für diese Technologie reicht eine Fokussier- und Trackingeinheit des Schreib-Lese-Kopfs (Abbildung 8 links und rechts oben) gerade noch aus. Doch auch hier führen Variationen in den Schutz- und Informationsschichten der DVD zu optischen Verzerrungen, wie Verkipfung, Defokussierung und Koma.

Da heutige DVD-Laufwerke mit bis zu 180 Umdrehungen pro Sekunde laufen, muss die Regelung sehr schnell sein. Bei dieser Umdrehungsfrequenz laufen die Pits auf der äußeren Spur mit einer Geschwindigkeit von etwa 56 m/s unter dem Schreib-Lese-Kopf vorbei. Dabei soll der Laser-spot radial nicht mehr als $0,022 \mu\text{m}$ von der zu lesenden Spur abweichen. Und das, obwohl die Spur mit maximal 180 Hz bis zu $100 \mu\text{m}$ oszillieren kann, denn genauer lässt sich die DVD im Laufwerk nicht zentrieren. Optisches Tracking, Fokuskorrektur und in Zukunft auch Korrektur höherer Aberrationen mit adaptiver Optik sind bei diesen Anforderungen unersetzlich.

Star Wars mit Flugzeugen

Während des Kalten Krieges startete US-Präsident Ronald Reagan das SDI-Programm. Es basierte auf einer Idee von

ABB. 7 AUFBAU



Versuchsaufbau des Zweiphotonen-Mikroskops mit adaptiver Optik.

Edward Teller, mit Röntgenlasern aus dem Weltraum feindliche Raketen abzuschießen. Nach dem Mauerfall 1989 wurde das SDI-Programm offiziell eingestellt. Dennoch wurde unter dem Projektnamen National Missile Defense weiter an ähnlichen Techniken geforscht.

Eines der teuersten US-Militär-Projekte auf dem Gebiet der Hochenergie-Laserwaffen ist das Airborne Laser System. Hier wird das Lasersystem an Bord einer modifizierten Boeing 747 installiert. Um den Laserstrahl punktgenau ans Ziel zu bringen, ist eine adaptive Optik nötig. Der Aufwand ist allerdings deutlich höher als bei den bisher genannten Systemen.

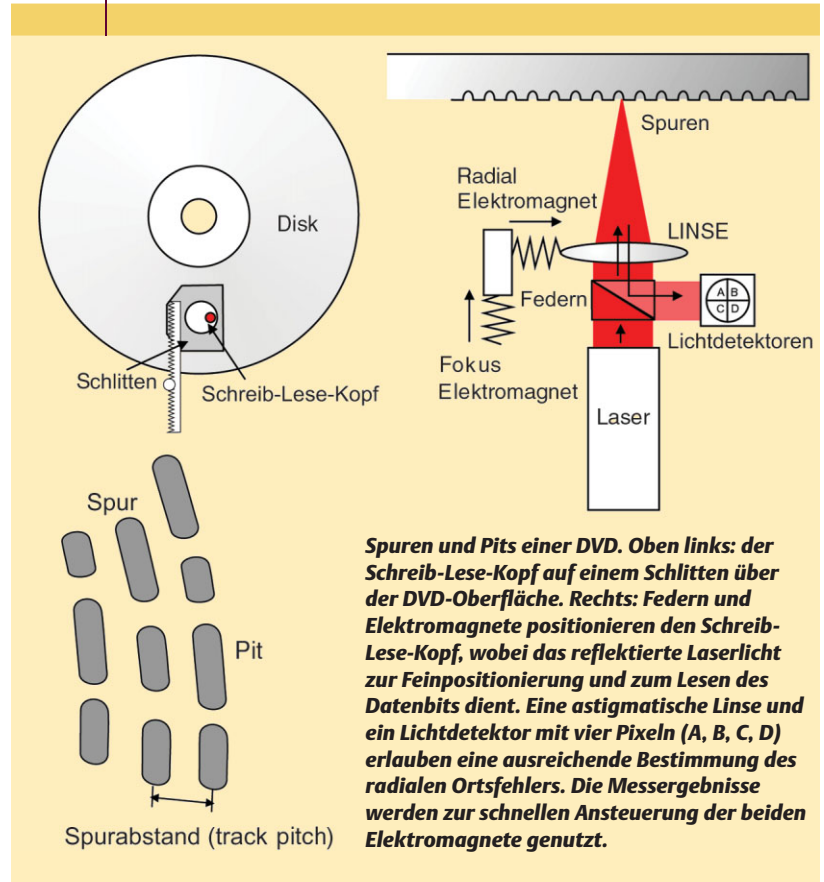
Die adaptive Optik mit Hochenergie-Laser fliegt mit relativ hoher Geschwindigkeit in 13 km Höhe durch die Atmosphäre. Auch das Zielobjekt wird sich im Allgemeinen sehr schnell bewegen. Aus diesem Grund wird es zuerst mit einem Laser geringerer Leistung verfolgt. Dann kompensiert die adaptive Optik mit einem aus 341 Aktuatoren bestehenden deformierbaren Spiegel mit einer Frequenz von 1000 Hz die optische Turbulenz zwischen Laser und Zielkörper. Dieser wird von einem weiteren Laser – dem so genannten Tracking and Illuminating Laser – vorher anvisiert und das reflektierte Licht als Referenz für die adaptive Optik genutzt. Dann richtet man den Strahl des Hochenergie-Lasers aus der Flugzeugnase auf das Ziel. In dieser circa sieben Tonnen schweren, rotierbaren Nase sitzt hinter einem Spezialfenster ein 1,5-m-Teleskop. Das lenkt den mit der adaptiven Optik korrigierten Hochenergie-Laserstrahl schließlich in Richtung Ziel. Ein erster Test dieser fliegenden Kampfstation wird frühestens 2005 stattfinden.

Scharfe Laser für die Hochenergie-Physik

Alle Hochleistungslaser leiden aufgrund thermischer Effekte unter mangelnder Strahlqualität. Das ist auch ein Problem bei den Teilchenphysikern der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt, die mit Hochenergie-Lasern die Eigenschaften extremer Plasmen untersuchen. Dies sind zum Beispiel dichte Plasmen bei Temperaturen von 10^5 - 10^6 K (10-100 eV) oder dichte Plasmen im Bereich der Trägheitsfusion. Die Strahlqualität soll nun ein Gerät mit dem Namen PHELIX (Petawatt High Energy Laser for Heavy Ion Experiments) verbessern. Es hat eine adaptive Optik, die Energiedichten in der Größenordnung von 10^{21} Watt/cm² ermöglicht. Neben statischen Aberrationen sind es vor allem thermo-optische Aberrationen im Hauptverstärker der Laseranlage, welche die adaptive Optik kompensieren soll.

Die im Verstärker entstehenden optischen Aberrationen misst ein Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor. Als Korrektur-element dient ein dielektrisch beschichteter, bimorpher Spiegel mit 31 Elektroden. In einem ersten Test wurde mit diesen Komponenten die Strahlqualität eines Laserpulses am Ausgang des Vorverstärkers deutlich verbessert. Ziel der adaptiven Optik bei PHELIX ist die Verbesserung der Strahlqualität um einen Faktor zehn und damit einer Intensitätssteigerung um nahezu das Hundertfache.

ABB. 8 | SPUREN UND PITS

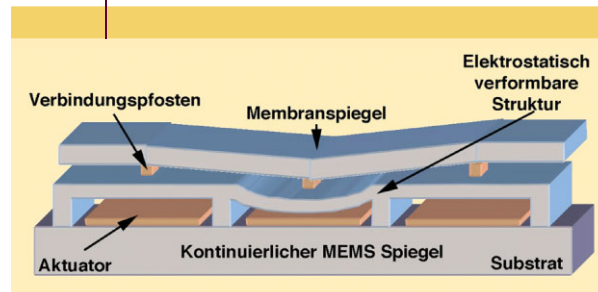


Mit Massenmarkt-Komponenten zu bezahlbaren Systemen

Die bisher vorgestellten adaptiv optischen Systeme haben eines gemeinsam: Ihre hoch spezialisierten Einzelkomponenten – Wellenfrontsensoren, Korrektur-elemente, Echtzeit-Kontrollsysteme – sind teuer. Ein mehrere Milliarden Euro teures militärisches System freut zwar die Herstellerfirmen, aber schon bei der Grundlagenforschung wie der Astronomie stößt man bei Preisen von mehreren Millionen Euro an Grenzen.

Von den drei zentralen Komponenten einer adaptiven Optik kann das Korrektur-element mit einem Preis von rund

ABB. 9 | MEMS-SPIEGEL



Schematischer Aufbau eines MEMS-Spiegels mit kontaktierter Spiegelmembran.

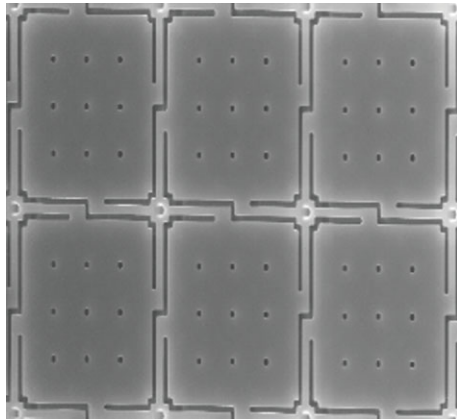


Abb. 10 Raster-Elektronenmikroskop Aufnahme eines Mikrospiegelarrays des Fraunhofer-Instituts IPMS in Dresden. Ein einzelnes Element ist 40 μm breit. Gut erkennbar sind die vier Gelenkarme (Foto: Fhl IPMS, Dresden).

800 Euro pro Aktuator leicht der größte Kostenfaktor sein. Der Preis für das Echtzeit-Kontrollsystem steigt hauptsächlich mit der Korrekturfrequenz der adaptiven Optik. Liegt diese bei einigen Hertz, tut es in der Regel schon ein Standard-Doppelprozessor-Rechner, wie er für einige Tausend Euro im Regal steht. Wellenfrontsensoren (meistens vom Typ Shack-Hartmann), die mit CMOS- oder CCD-Detektoren sichtbares Licht analysieren, können heutzutage fertig konfektioniert für zehn- bis dreißigtausend Euro geordert werden.

Insbesondere in der Augenheilkunde verspricht man sich eine deutliche Kostenreduzierung bei den Korrektur-elementen durch den Einsatz von Mikrosystemen, wie so genannter MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) oder MOEMS (Micro Optical Electro-Mechanical Systems, auch optische MEMS genannt). Der bekannteste MEMS-Spiegel, der Digital Micro-Mirror Device (DMD) Spiegel von Texas Instruments, wurde seit 1996 mehr als zwei Millionen Mal verkauft. Mit seinen 1,3 Millionen Kippspiegeln findet man ihn vorwiegend in Videoprojektoren. Durch die hohe Ansteuerfrequenz der Mikrospiegel um 100 kHz lassen sich bei Videofrequenzen von 50 bis 100 Hz 1024 Graustufen darstellen. Farbe wird in der Regel durch eine rotierende Farbfilterscheibe vor dem Spiegel generiert. Jeder Mikrospiegel des DMD kann sich entlang einer Achse um maximal ± 12 Grad verkippen. Andere MEMS-Architekturen, wie sie beispielsweise vom Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme in Dresden [6], von der Boston Micromachines Corporation oder am Berkeley Sensor & Actuator Center fabriziert werden, haben im Vergleich zum DMD mehr Freiheitsgrade (Zwei-Achsen-Verkipfung, Hebe-Senken-Verstellung).

Bei allen MEMS-Spiegeln werden die Aktuatoren über elektrostatische Kräfte bewegt (Abbildung 9). Hierfür wird eine Elektrode gegenüber einer Maske aus einzeln ansteuerbaren Elektroden angebracht. Elektrostatische An- und Abstoßung zwischen den Elektroden (wie bei einem Kondensator) führen zu Verformungen.

Im Prinzip gibt es zwei praktische Umsetzungen dieses Prinzips: Entweder ist die Elektrodenmaske unbeweglich und die gegenüberliegende Elektrode bewegt sich oder umgekehrt. Im zweiten Fall kann die bewegliche Elektrode direkt mit einem reflektierenden Material beschichtet werden, und fertig ist der deformierbare Spiegel. Im ersten Fall kontaktiert man eine beschichtete dünne Glasplatte an die Einzelelektroden und erhält ein MOEMS, ähnlich einem Piezo-Aktuator-Spiegel. Der typische Abstand zweier Aktuatoren (entspricht in der Regel der Größe eines Mikrospiegels) eines MOEMS liegt für den Spiegel von Texas Instruments bei 16 μm , für den des Fraunhofer-Instituts (Abbildung 10) bei 40 μm und beim Boston-Micromachines-Spiegel bei 330 μm . Allerdings reicht der Korrekturhub bei den heutigen MOEMS-Spiegeln noch nicht für alle Anwendungsgebiete adaptiver Optiken aus.

Dies trifft insbesondere auf die Astronomie zu. Ähnliches gilt für die optische Qualität der Spiegeloberflächen. Diese Probleme werden in näherer Zukunft aber wohl gelöst werden können.

MEMS-Spiegel werden mit herkömmlicher CMOS-Halbleitertechnologie hergestellt, einzig die Oberflächenbehandlung benötigt einen tieferen und spezialisierteren Ätzvorgang. Darauf beruht auch die Hoffnung, dass solche Systeme zu erschwinglichen Preisen erhältlich sein werden. Ein komplettes MEMS-System mit 140 Aktuatoren und Rechneransteuerung kostet derzeit immerhin noch etwa 25 000 Euro (Boston Micromachines Corporation).

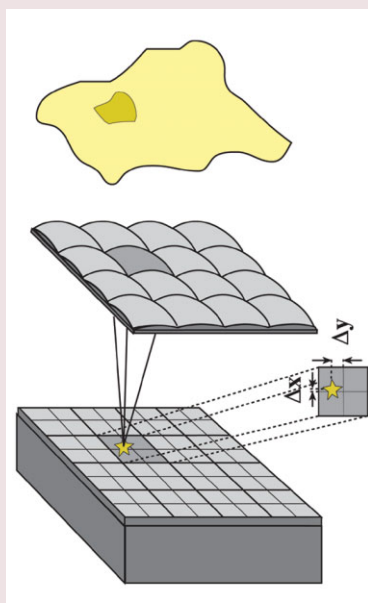
DER WELLENFRONTSENSOR

In der adaptiven Optik verwendet man zur Wellenfrontanalyse meistens Shack-Hartmann-Sensoren [7]. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts setzte Johannes Franz Hartmann zum Testen einer optischen Linse eine Maske mit Löchern ein, die er hinter der Linse anbrachte. Jedes dieser Löcher erzeugt eine Abbildung, wobei deren Position ein Maß für die lokale Neigung der Lichtwellenfront über die benutzte Apertur (das Loch) ist.

Roland Shack hatte dann Ende der 1960er-Jahre die Idee, die Löcher durch kleine, in einem Gitter angeordnete Linsen zu ersetzen. Zusammen mit einem Strahlteiler erlaubt es dieser Aufbau, Optiken gleichzeitig zu nutzen und zu testen.

Der Shack-Hartmann-Sensor unterteilt also die Wellenfront in ein Gitter kleinerer Bereiche, die dann durch die Mikrolinsen individuell abgebildet werden und ein Gitter von Punktbildfunktionen erzeugen. Deren laterale Position, bezogen auf vorher bestimmte Referenzpositionen (meistens mit Hilfe einer perfekt ebenen Welle bestimmt), misst dann lokale Wellenfrontneigungen über die Flächen der Mikrolinsen. Aus den lokalen Neigungen, also ersten Ableitungen der Wellenfront, lässt sich dann der Wellenfrontfehler bestimmen.

Die einzelnen Mikrolinsen des Gitters messen typischerweise einen Millimeter und die Punktbildfunktionen werden mit CCD-Kameras aufgenommen. Modernste CCDs für adaptive Optik Anwendungen besitzen 128 x 128 Pixel und lassen sich mit 2 kHz auslesen.



Messprinzip des Shack-Hartmann-Wellenfrontsensors.

Neben MEMS-Spiegeln können auch Flüssigkristall-Lichtmodulatoren (Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM) als adaptive Korrektur Elemente eingesetzt werden. Im Center for Visual Science der University of Rochester wurde ein solches System für eine Anwendung in der Augenheilkunde getestet (Abbildung 11). Dazu wird ein von einem Computer generiertes normales VGA-Signal an ein LCD angelegt, das ein Laser durchleuchtet. Das so generierte Intensitätsmuster (Write Light in Abbildung 11) wird auf einen dielektrischen Spiegel projiziert und dort in der Schicht mit photoleitendem, amorphem Silizium absorbiert. Ohne Licht fließt kein Strom zwischen den beiden durchsichtigen Elektroden. Mit Licht fällt die angelegte Vorspannung zwischen den Elektroden. Dadurch ändern die Moleküle in der Flüssigkristallschicht ihre Orientierung und erzeugen so die gewünschte Phasenänderung für das „Read Light“, das es zu korrigieren gilt. Dieses durchläuft von der anderen Seite den Flüssigkristall und wird am dielektrischen Spiegel reflektiert.

Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass keine Pixelstruktur vorhanden ist und somit keine unerwünschten Beugungseffekte auftreten. Auch ist die räumliche Auflösung mit 640×480 Pixeln sehr hoch. Ein Nachteil ist die Wellenlängenabhängigkeit und die ausschließlich flache Phasenkorrektur im Vergleich zu deformierbaren Spiegeln mit kontinuierlicher Oberfläche. Die korrigierbare Phase liegt zwischen 0 und 2π , also entsprechend einem Phasenhub von maximal einer Wellenlänge.

Die adaptive Optik bahnt sich also langsam einen Weg aus der Grundlagenforschung in die Technik der Alltagswelt. Die medizinische Diagnostik, Laserchirurgie, Geräte zum Lesen und Schreiben optischer Speichermedien und in einigen Jahren möglicherweise auch die Autoindustrie sind hier nur einige Beispiele. Dort könnte sich der Trend zu weiterer Automatisierung und passiver Sicherheit mittels vielfacher optischer Sensoren weiter verstärken. Mit der Awtowerbung für adaptives Kurvenlicht (Adaptive Forward Lighting) ist ein erster Schritt getan.

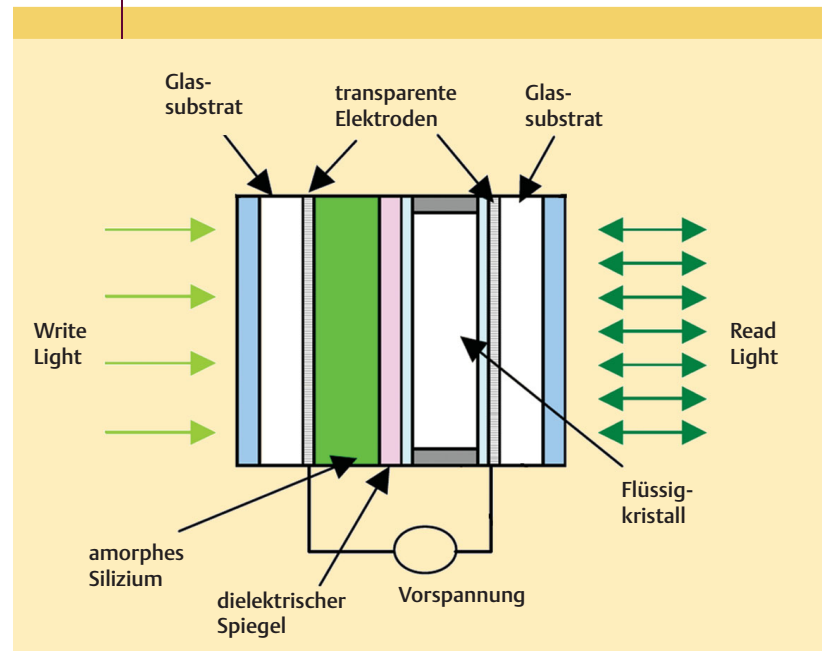
Zusammenfassung

Mit adaptiver Optik lassen sich optische Störungen, wie sie beispielsweise von der turbulenten Erdatmosphäre, dem menschlichen Auge oder biologischem Zellmaterial hervorgerufen werden, in Echtzeit korrigieren. Sowohl in der Astronomie, der medizinischen Forschung, der Augenheilkunde, der optischen Informationstechnologie als auch auf dem Gebiet der Hochleistungslaser und militärischen Luftabwehr sind adaptive Optiken heutzutage eine entscheidende Schlüsseltechnologie. In den nächsten Jahren wird sich herausstellen, ob sie auch in unser Alltagsleben einziehen werden.

Stichworte

Adaptive Optik, Großteleskope, Beugungsgrenze, Seeing, Wellenfrontanalyse, Shack-Hartmann-Sensor, Airborne Laser, Laserleitsterne, deformierbare Spiegel, MEMS, Zwei-Photonen-Mikroskopie.

ABB. 11 | MODULATOR



Schematischer Aufbau des Hamamatsu Spatial Light Modulators (nach Riza und Jorgens, Optics Express 12, 2004).

Literatur

- [1] S. Hippler, D. Looze, W. Gaessler, SPIE 5490 im Druck.
- [2] J. Liang et al., J. Opt. Soc. Am. A **1994**, 11, 1949.
- [3] J. Liang, D.R. Williams, D. Miller, J. Opt. Soc. Am. A **1997**, 14, 2884.
- [4] W. Denk, J.H. Strickler, W.W. Webb, Science **1990**, 248, 73.
- [5] K.-H. Brenner, P. Kümmler, U. Krackhardt, in: Simulation in Physik, Informatik und Informationstechnik (SYSI), S. 43, 66. Physikertagung, Leipzig (2002)
- [6] A. Gehner et al., Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme, "Adaptive Optical Phase Forming – Future Development Objectives", Workshop CD, March 2004
- [7] S. Hippler, M. Kasper, Sterne und Weltraum **2004**, 43(10), 32.

Der Autor



Stefan Hippler, Jahrgang 1959, Studium der Physik an der Justus-Liebig-Universität Giessen, dort Promotion über Elektronenemission von Festkörpern nach Ionenbeschuss. Seit 1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Forschungsschwerpunkte seit 1994 sind adaptive Optik und Echtzeitkontrollsysteme.

Anschrift

Dr. Stefan Hippler, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg, hippler@MPIA.de