

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 38 (1980)
Heft: 179

Artikel: Das Multiple Mirror Telescope MMT auf Mount Hopkins : Prototyp einer neuen Fernrohr-Generation
Autor: Tarnutzer, Andreas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-899558>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Das Multiple Mirror Telescope MMT auf Mount Hopkins

ANDREAS TARNUTZER

Prototyp einer neuen Fernrohr-Generation

Der nachfolgende Artikel basiert auf einem Besuch anlässlich der SAG-Studienreise in die USA vom November 1979. Viele technische Details wurden aus den uns überlassenen Unterlagen 1) und anderen Publikationen 2) 3) 4) 5) entnommen.

1. Einleitung

Man erreicht das MMT, das Mehrfach-Spiegelteleskop auf dem Mount Hopkins, von Tucson in Arizona auf der Interstate 19 südwärts fahrend, Richtung Nogales. Nach rund 65 km verlässt man die Autobahn beim Exit 48, rund 45 km vor der mexikanischen Grenze und meldet sich in Amado im Bureau-Gebäude der Sternwarte.

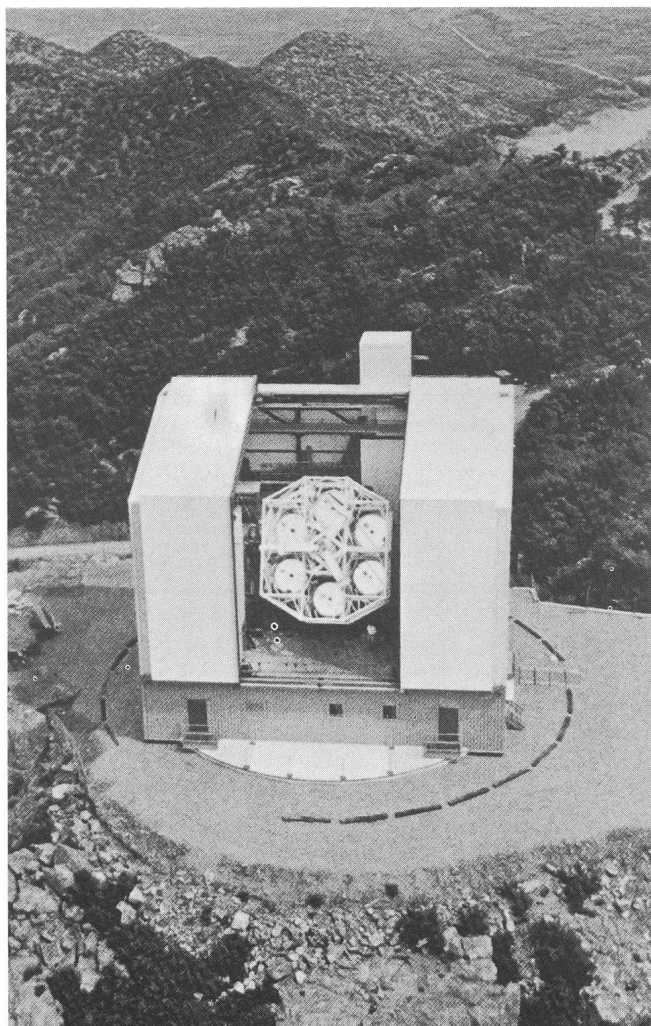


Abb. 1: Luftaufnahme des MMT mit geöffnetem Schieber. Die beiden Eingangstüren vorne geben einen Begriff von der Grösse der Anlage. Foto Ted Offret. Die übrigen Fotos dieses Artikels sind vom Autor.

Schon auf der Autobahn, in der rund 800 m hoch gelegenen Ebene, entdeckt man das weisse Gebäude der Sternwarte auf einem der links gelegenen bizarren «Hügel». Die Fahrt hinauf im Autobus der Sternwarte führt auf einer gewundenen Naturstrasse an recht schroffen Abhängen und tiefen Schluchten vorbei und ist ein Erlebnis für sich, und man realisiert bald, dass die *Santa Rita Mountains* alles andere als kleine Hügel sind. Je näher man der Sternwarte kommt, umso weiter oben erscheint sie, bis man nach einer einstündigen Fahrt, gehörig durchgeschüttelt und mit Staub reichlich eingedeckt, den obersten Parkplatz erreicht. Die letzten 100 m geht man zu Fuss bis zum 2606 m hohen Gipfel und steht dann vor dem riesigen Gebäude. Siehe Bild 1.

2. Gründe, die zum Bau des MMT geführt haben

Schon seit dem Anfang des 17. Jahrhunderts, als *Galilei* sein Fernrohr für astronomische Beobachtungen benutzte, ging die Entwicklung zu immer grösseren Fernrohren weiter, da man so immer mehr Details sehen konnte. Zuerst wurde vor allem die Brennweite vergrössert, doch führte dies bald zu recht umständlichen Instrumenten, wie dasjenige des *Hevelius* in Danzig. Später erlaubte es die Erfindung des Achromaten durch *FRAUNHOFER*, die Objektivenlinsen immer grösser zu machen und man erreichte im letzten Jahrhundert mit dem 1-m-Refraktor auf Yerkes die obere Grenze, deren Überschreitung zu keinem Gewinn mehr führen würde.

Die Spiegelteleskope ihrerseits waren leichter herzustellen. Man erreichte 1907 auf Mount Wilson den Durchmesser von 1,5 m (wenn man vom unhandlichen Metallspiegel vom *Earl of Rosse* mit 1,8 m Durchmesser absieht, der 1845 gebaut wurde), 1918 ebenfalls auf Mount Wilson 2,5 m und 1948 auf Mount Palomar den Durchmesser von 5 m. Aber bereits hier sah man die enormen Schwierigkeiten und die immensen Kosten einer weiteren Vergrösserung, so dass die Amerikaner keine Pläne mehr für grössere Fernrohre machten. Dass sich die Russen zum Bau eines 6-m-Reflektors entschlossen, ist wohl zum Teil einem gewissen Konkurrenzdenken zuzuschreiben . . .

Da jedoch anzunehmen ist, dass mit *wesentlich* grösseren Fernrohren auch wesentliche neue Entdeckungen zu machen sind, musste man folgerichtig nach andern Lösungen suchen. Eine Möglichkeit besteht darin, den grossen Hauptspiegel in mehrere kleinere Spiegel aufzuteilen, die dann leichter und billiger herzustellen sind als ein grosser. Das MMT auf Mount Hopkins ist das erste eines solchen Fernrohrs. Es besteht aus sechs Fernrohren von je 1,8 m Durchmesser, die alle auf einen gemeinsamen Brennpunkt arbeiten. Das ganze System entspricht einem einzigen Reflektor von 4,5 m Durchmesser und ist somit das drittgrösste Fernrohr auf der Welt. Sofern sich dieses Konzept bewährt, kann man einen weitem Schritt tun. Bereits sind Vorstudien im Gange für Fernrohre, die einem Durchmesser von 10 m und 25 m entsprechen!

Die Aufteilung in einzelne Fernrohre und die Leichtbau-

weise hat aber noch einen weiteren Vorteil: Die einzelnen Teile der Fernrohre könnten in den Weltraum transportiert und dort zu einem sehr grossen Instrument zusammengebaut werden. Die Abwesenheit der Luft würde diesem ganz enorme Vorteile bringen.

3. Vorgänger des MMT

Die Idee, eine grosse Spiegelfläche in mehrere kleine aufzuteilen, ist eigentlich nicht neu. Um das damals schwierige Parabolisieren zu umgehen, experimentierte der nachmalige *Earl of Rosse* bereits 1828 an einem zweiteiligen 15-cm-Spiegel aus Spiegelbronze, der aus einem zentralen Spiegel und einem 4 cm breiten, aussenstehenden Ring bestand. Beide wiesen eine sphärische Fläche auf.

Das erste brauchbare Mehrfach-Spiegelteleskop wurde aber in Italien vom damaligen Leiter der Sternwarte Bologna, Professor Guido Horn d'Arturo gebaut. Es sollte aus trapezförmigen sphärischen Einzelspiegeln bestehen, einen Gesamtdurchmesser von 1 m aufweisen und im alten, 1712 erbauten Turm der Sternwarte senkrecht nach oben gerichtet fest eingebaut sein. Mit nur teilweise fertig gestelltem Spiegel konnte 1935 die erste Fotografie aufgenommen wer-

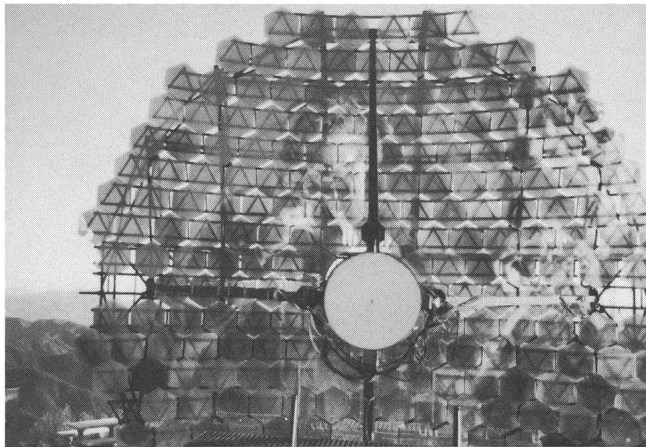


Abb. 2: Das 10 m-Spiegelteleskop für indirekten Nachweis von γ -Strahlen auf einem Nebengipfel des Mount Hopkins, das ungeschützt im Freien steht. Im Spiegel reflektiert erkennt man den Autor, wie er diese Aufnahme macht . . .

den. Die politische Situation und der Krieg unterbrachen dann seine Arbeit, Horn d'Arturo musste untertauchen.

Nach dem Krieg konnte er ein neues Fernrohr bauen. Es bestand aus 61 sechseckigen sphärischen Spiegeln genau gleicher Brennweite (10,41 m); diese waren so angeordnet, dass sie als Ganzes einen parabolischen Spiegel von 1,8 m Durchmesser ergaben. Mit diesem Instrument entdeckte er zusammen mit seinem Mitarbeiter G. B. LACCHINI viele lichtschwache Veränderliche, für welche Lichtkurven erstellt wurden.

Da das Fernrohr fest auf den Zenit gerichtet war, musste beim Fotografieren zum Nachführen der Plattenhalter entsprechend verschoben werden, was die Belichtungszeit auf 6,5 Minuten begrenzte. Es konnte auch nur ein $1,3^\circ$ breiter Streifen des Himmels bestrichen werden. HORN D'ARTUROS Idee war, viele solche billig herstellbare Instrumente über alle Breitengrade verteilt aufzustellen, so dass der ganze Himmel hätte bestrichen werden können. Er schlug auch vor, sehr grosse solche Fernrohre unter Ausnutzung von Bodenformationen zu bauen. Damit nahm er die Idee des 300 m-Radioteleskops in Arecibo, Puerto Rico, voraus.

Ein weiterer Versuch für ein Mehrfach-Spiegelteleskop wurde 1949 vom damaligen Direktor der Sternwarte Turku in Finnland, Y. VÄISÄLÄ vorgeschlagen. Er beschrieb ein Modell, das er zu bauen begonnen hatte, das aus sechs runden Spiegeln von je 32 cm Durchmesser bestand, die ringförmig angeordnet waren und wie beim MMT einen siebenten Spiegel in der Mitte enthielt. Dazu hatte er eine Korrektorlinse vorgebaut. Das Ganze entsprach einem Einzelspiegel von 85 cm Durchmesser und 2,58 m Brennweite. Auch dieses Fernrohr war für feste, senkrechte Aufstellung gedacht.

Diese beiden unkonventionellen Instrumente wurden leider nicht genügend beachtet. Wohl wurden mit der Zeit mehrere Parabolspiegel gebaut, die aus vielen sechseckigen sphärischen Spiegeln zusammengesetzt wurden. Sie werden aber allesamt nicht für optische Abbildung, sondern nur als Lichtsammelner für elektrische Detektoren verwendet und erheben deshalb keinen Anspruch auf optische Genauigkeit. Eines davon ist das 10-m-Teleskop auf Mount Hopkins, Bild 2, das aus 248 einzelnen Spiegeln besteht und für den indirekten Nachweis von γ -Strahlen dient.

4. Die optische Auslegung des MMT

Wie bei jedem Teleskop ist auch hier der Spiegel das Hauptstück, wobei man allerdings beim MMT zum ersten Mal in der Mehrzahl sprechen muss. Es war ein Glücksfall, dass mehrere Spiegel-Rohnteile zur Verfügung standen, die versuchsweise als Planspiegel in Leichtbauweise für die Raumfahrt hergestellt wurden.

Jeder der Hauptspiegel besteht aus zwei Quarzscheiben von 1,8 m Durchmesser und 2,5 cm Dicke. Dazwischen liegt eine Rippenkonstruktion von sich rechtwinklig kreuzenden Quarzstreifen, 1 cm dick und 28 cm hoch im Abstand von 7 cm. Aussen herum wurde ein Quarzrohr gelegt, 28 cm lang und etwas kleiner im Aussendurchmesser als die beiden Quarzscheiben. Das ganze Gebilde wurde anschliessend in einem Ofen erhitzt und zusammen gesintert. Um die recht dünne Quarzplatte wegen der benötigten Parabolform möglichst wenig zu schwächen, wurde der ganze Rohnteil nachträglich noch durchgebogen. Dazu wurde er auf eine Keramikform mit dem gewünschten Krümmungsradius gelegt und in einem Ofen während 70 Stunden auf 1100° erhitzt. Anschliessend erhöhte man die Temperatur innerhalb von 20 Minuten auf 1550°C , bis das Quarz zu fließen begann und sich durch sein eigenes Gewicht der Form anpasste. Dann wurde langsam abgekühlt und nach Erreichen der Raumtemperatur noch spannungsfrei gegläht.

Die Masse jedes Rohspiegels ist 545 kg, verglichen mit 1820 kg eines konventionellen massiven Spiegels gleicher Grösse. Alle 6 Spiegel zusammen haben somit eine Masse von 3270 kg, ein äquivalenter massiver Spiegel von 4,5 m Durchmesser würde aber 35 000 kg wiegen!

Als optisches System wurde das nach *Cassegrain* gewählt. Die parabolischen Hauptspiegel haben eine Brennweite von 493 cm, und da alle 6 Spiegel den gleichen Abbildungs-massstab haben sollen, musste diese mit einer Toleranz von $\pm 2,5$ mm eingehalten werden. Es ergibt sich so ein Öffnungsverhältnis von 1:2,7. Die hyperbolischen Sekundärspiegel mit 26 cm Durchmesser verlängern die Gesamtbrennweite auf 58 m, was für jedes einzelne Teleskopsystem ein Öffnungsverhältnis von 1:32 ergibt. Der Abbildungs-massstab in der Bildebene beträgt 3,6 Winkelsekunden pro mm.

Bild 3 zeigt einen Schnitt durch das MMT, mit zweien der

insgesamt 6 Teleskope. Nach dem Sekundärspiegel trifft der Lichtkegel kurz vor dem Hauptspiegel auf einen Planspiegel (Tertiärspiegel) und anschliessend auf den Strahlenbündler, der die 6 Lichtkegel auf den Brennpunkt richtet. Der Strahlenbündler ist eine Pyramide mit 6 aluminisierten Planflächen. Unten in Bild 3 ist noch vergrössert dargestellt, wie die 6 Strahlenkegel im Brennpunkt zusammenreffen. Der diese 6 Kegel einhüllende Kegel entspricht einem Gesamt-Öffnungsverhältnis von 1:9. Streng genommen kann nicht von *einer* Bildebene gesprochen werden: die Bildebene jedes Einzelkegels steht senkrecht zu seiner Mittelachse. Folglich schneiden sich im Bildpunkt 6 verschiedene Ebenen. Der Nachteil ist allerdings klein; es entsteht eine «mittlere» Bildebene senkrecht zur Achse des MMT mit einem brauchbaren Bildfeld von bis zu 5 Winkelminuten.

Man hätte diesen Nachteil auch umgehen können. Durch

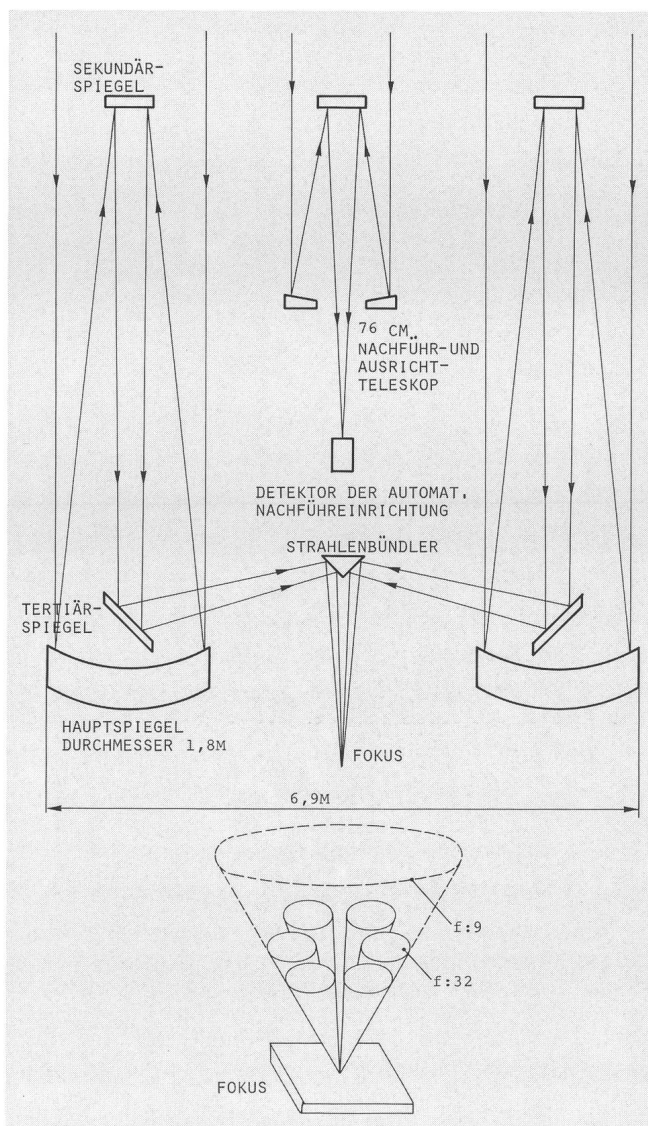


Abb. 3: Strahlengang im MMT, wobei nur 2 gegenüberliegende der insgesamt sechs Teleskope gezeichnet sind. Unten sind vergrössert die 6 Strahlenkegel 1:32 eingezeichnet mit dem diese alle einhüllenden Kegel 1:9. Oben in der Mitte das Nachführinstrument.

geeignete Wahl der Sekundärspiegel hätte man 6 parallele Lichtbündel erzeugen und diese dann wiederum parallel und einander fast berührend in die Achse des MMT leiten können. Mit einem zusätzlichen kleineren Cassegrain-Teleskop von rund 75 cm Durchmesser wäre es dann möglich, alle Strahlen in einem Punkt zu vereinigen mit einer eindeutigen Bildebene. Da dies aber zwei zusätzliche Reflexionen bedingte, hat man diese Lösung verworfen.

In der Mitte des MMT sitzt noch ein siebentes Fernrohr mit 76 cm Durchmesser in Ritchey-Chrétien-Ausführung, das unter anderem für die automatische Nachführung des MMT dient.

5. Das Reguliersystem

Auf der Erde wird das Auflösungsvermögen aller Fernrohre durch die Luftunruhe begrenzt, der erzeugte Lichtfleck ist rund 1 Winkelsekunde gross. Das theoretische Auflösungs-

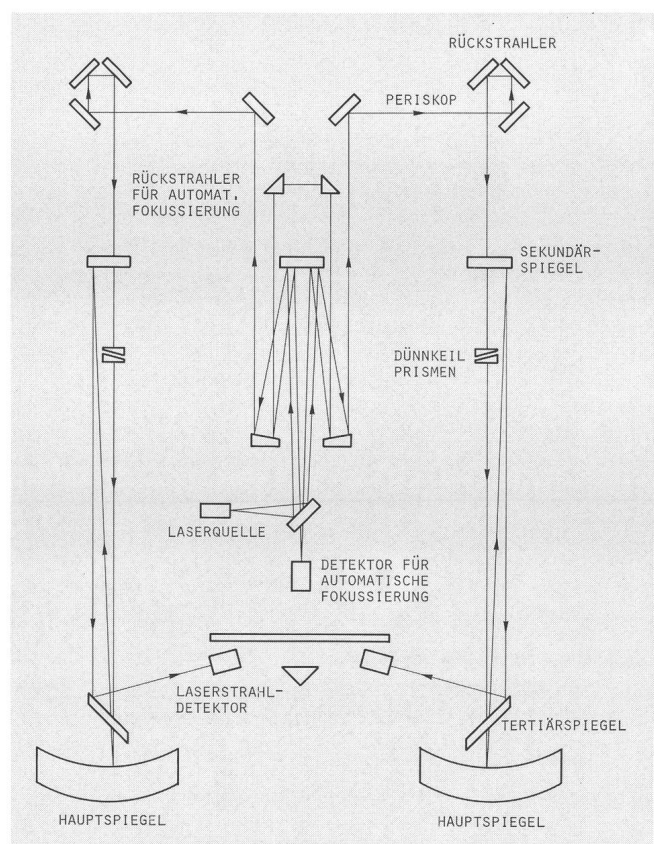


Abb. 4: Die Laserstrahlen in zwei von den Teleskopen. Vom das Nachführfernrohr vorne verlassenden parallelen Laser-Strahlenbündel werden einzelne Teile abgezweigt und über Periskop und Rückstrahler auf den Rand der Hauptspiegel geleitet. Die ferngesteuerten Dünneil-Prismen gestatten es, durch gegenseitiges Verdrehen derselben jeden Laserstrahl in die gewünschte Richtung zu bringen. Anschliessend werden die Strahlen durch Silizium-Detektoren empfangen.

vermögen im visuellen Bereich der bestehenden Grossfernrohre ist aber viel besser und erreicht beim 5-m-Spiegel 0,025 Winkelsekunden.

Beim MMT wird diesem Umstand insofern Rechnung getragen, als die 6 Fernrohre vorerst nur mit einer Genauigkeit von 0,2 Winkelsekunden ausgerichtet werden sollen mit

dem Gedanken, dies später zu verbessern, wenn es die Erfahrung erlaubt. Bereits so aber dürfen sich die Abstände der Haupt- und Sekundärspiegel nicht um mehr als 0,7 mm verändern und sich die Hauptspiegel um nicht mehr als 2,5 Winkelminuten zur Achse neigen. Eine ausgedehnte Computerberechnung hat gezeigt, dass diese Bedingungen wegen der unterschiedlichen Durchbiegungen der Fernrohrstruktur bei verschiedenen Lagen wie Längenänderungen durch verschiedene Temperaturen und Temperaturdifferenzen nicht länger als ungefähr eine Minute eingehalten werden können. Man musste deshalb eine aktive Regulierung der wichtigsten Teile einführen.

Dies wird mittels Laser-Strahlen durchgeführt, wobei das Nachführteleskop in der Mitte des MMT als Kollimator verwendet wird, siehe Bild 4. Über einen teildurchlässigen Planspiegel wird eine Laser-Strahlenquelle am umgespiegelten Brennpunkt angekopfelt. Das Fernrohr arbeitet nun

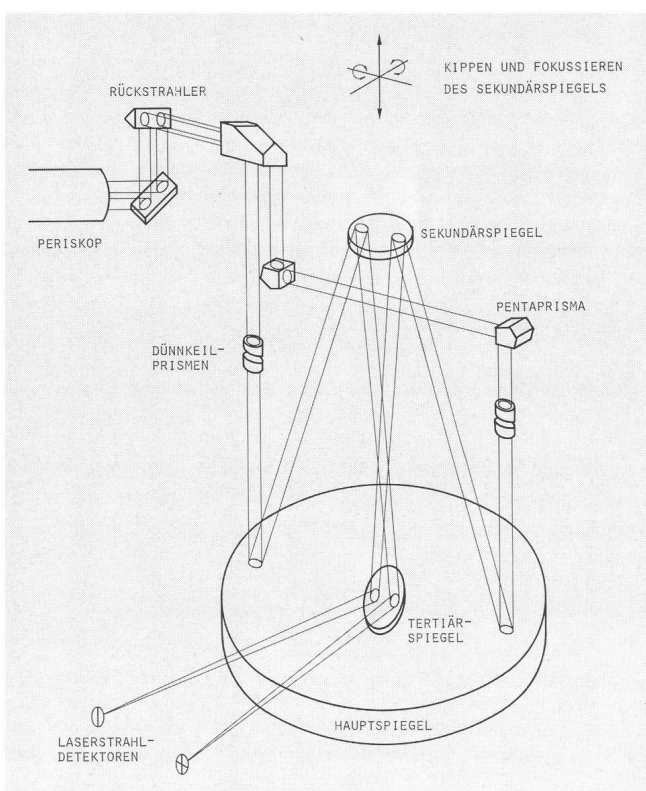


Abb. 5: Laser-Strahlengang in einem der sechs Teleskope im Detail. Der linke, direkt auf den Hauptspiegel treffende Strahl bestimmt die Kippbewegung des Sekundärspiegels um seine tangentielle Achse. Er bestimmt aber auch zusammen mit dem über Pentaprismen den Hauptspiegel rechts treffenden Strahl die Scharfeinstellung und das Kippen des Sekundärspiegels um seine radiale Achse. Das Verdrehen der Dünneil-Prismen lenkt den Strahl ab und provoziert so eine Verstellung des Sekundärspiegels.

wie ein Scheinwerfer, aus dem vorne ein paralleles Strahlenbündel herauskommt. Ein Teil dieser Strahlen wird über Rückstrahler dazu verwendet, das eigene Fernrohr automatisch scharf einzustellen, indem der Sekundärspiegel in achsialer Richtung motorisch verschoben wird.

An drei um 120° versetzten Stellen werden nun dem Bündel Laser-Strahlen durch Periskope entnommen und den 6 Fernrohren über Rückstrahler zugeführt. Sowohl Periskope

wie Rückstrahler haben die Eigenschaft, dass parallel einfallende Strahlenbündel diese auch wieder parallel verlassen mit einer Genauigkeit von 0,05 Winkelsekunden. Jedes Fernrohr erhält über Pentaprismen zwei Strahlenbündel, die durch Dünneil-Prismen über Hauptspiegel, Sekundär- und Tertiärspiegel je einen Silikon-Detektor erreichen. Einer davon besteht aus 2 Segmenten, der andere aus 4 Quadranten, siehe Bild 5. Die Signale dieser beiden Detektoren werden elektronisch verarbeitet, Abweichungen führen in einem geschlossenen Regelkreis zu Korrekturen, die den richtigen Zustand wieder herstellen. Verstellt wird dabei der Sekundärspiegel mittels Elektromotoren in 3 Achsen: er wird in Achsrichtung verschoben für die Fokussierung und um 2 rechtwinklig zueinander stehende Achsen gekippt, siehe Bild 5 oben. Selbstverständlich muss dieses ganze Laser-Strahlensystem ausserhalb des Gesichtsfeldes sein, um die Beobachtung nicht zu stören. Dies ist auch der Grund, warum sich die beiden Bündel zwischen Sekundär- und Tertiärspiegel kreuzen. Die Leistung in jedem Laserbündel beträgt nur 10^{-9} W, so dass auch an den Spiegeln gestreutes Licht nicht stört.

Mit den beiden Dünneilprismen kann ferngesteuert das entsprechende Strahlenbündel abgelenkt werden, indem man sie gegeneinander verdreht, und da das Regelsystem sofort korrigiert, können damit die Brennpunkte aller 6 Fernrohre zusammengebracht oder, wie dies beim Spektroskopieren von Vorteil sein wird, längs des Spektrografen-schlitzes aneinandergereiht werden.

Die automatische Nachführeinrichtung sitzt am Fokus des Nachführinstrumentes und teilt das einkommende Licht



Abb. 6: Blick von einem Hauptspiegel nach vorn. Man erkennt den Sekundärspiegel mit seiner Halterung sowie links oben den Ausgang des Periskopes. Die SAG-Reisegruppe folgt mit äusserster Aufmerksamkeit den Ausführungen und stellt knifflige Fragen . . .

über einen Strahlenteiler mit dem Lasersystem. Sie hat eine genaue Fernsteuerung in Azimutwinkel und Radius, um einen beliebigen Stern im Gesichtsfeld zum Nachführen verwenden zu können und um das Bild enddrehen zu können (nötig wegen der terrestrischen Montierung). Es können Sterne bis 14. Grösse nachgeführt werden; die Wahrscheinlichkeit, solche Sterne im Gesichtsfeld von 1° zu finden ist 99%.

Das Ganze Bildreguliersystem hat 21 dauernd arbeitende Servomotoren und 51 sich gegenseitig beeinflussende Parameter, die für die entsprechende Beobachtung eingestellt

werden müssen. Das ganze wird von einem Kleinrechner geleitet, der von dem die Nachführung besorgenden Mini-computer beeinflusst werden kann.

6. Die Montierung

Wie heute für Grossinstrumente schon fast üblich, wurde eine terrestrische Montierung gewählt, d.h. eine Drehachse ist vertikal, die andere horizontal. Dadurch und auch durch das niedrige Gewicht der Fernrohrstruktur mitsamt allen optischen Geräten von nur 45 Tonnen konnte die horizontale Kippachse in zwei gewöhnlichen vorgespannten Rollenlagergruppen gelagert werden. Das Gesamtgewicht des Fernrohrs und der Gabel wird in der vertikalen Achse von einem Schrägkugellager von 2,5 m Durchmesser aufgenommen, in dem 130 Kugeln von 50 mm Durchmesser laufen. Auch dies ist wesentlich billiger als ein hydrostatisches Lager. Die gesamte drehbare Masse beträgt 120 Tonnen, verglichen mit 500 Tonnen von Mount Palomar. Die 75 Tonnen schwere Gabel wurde in Lecco (Italien) durch die Firma Bartolomei hergestellt.

Beide Achsen werden durch Gleichstrommotoren über Stirnräder mittlerer Qualität angetrieben, Tachogeneratoren überwachen deren Drehzahl. Je ein zweiter, gegenläufig arbeitender Satz von Motor und Getriebe heben das Zahnspiel während des Nachführens auf. Die Stellung jeder Achse wird durch Inductosyn-Drehgeber gegeben, die elektrische Impulse in Schritten von 0,08 Winkelsekunden liefern. Der Minicomputer seinerseits liefert mit entsprechenden Impulsen die Sollstellung des Fernrohrs. Beide Signale kommen in ein elektronisches Zählwerk, und bei einer bestehenden Differenz wird der entsprechende Motor sofort so betätigt, dass die Differenz Null wird. So führt das Fernrohr genau das aus, was ihm der Minicomputer befiehlt. Man kann auf diese Weise nicht mehr von einer Nachführungsgeschwindigkeit sprechen, denn es werden beide Achsen schrittweise verstellt, wie dies bei den modernen Werkzeugmaschinen heute üblich ist.

Der Betrieb des Fernrohrs wird vollständig vom Minicomputer gesteuert. Man gibt die Koordinaten eines Objektes und deren Äquinoktium ein. Der Minicomputer korrigiert für die Präzession, die Refraktion und die Aberration des Lichtes, fährt das Fernrohr in die gerechnete Position und führt dann automatisch nach. Nahe am Zenit kann die Nachführungsgeschwindigkeit in Azimut den maximalen Wert von 90° pro Minute erreichen, so dass auch Objekte nachgeführt werden, die bis an 0,14° an den Zenit herankommen.

Die gewählte terrestrische Montierung vereinfacht auch die Hauptspiegelzelle, denn der Spiegel wird dadurch in nur einer Ebene gekippt, die Kräfteverhältnisse sind viel einfacher zu beherrschen. Jeder Spiegel liegt hinten auf drei festen Punkten, die seine Lage bestimmen. Sein Gewicht wird zum grössten Teil durch ein in drei Segmente aufgeteiltes Luftkissen aufgenommen, das das Gewicht des Spiegels gleichmässig aufnimmt. Radial wird der Spiegel durch eine Gall'sche Kette gehalten; die je nach Kipplage wechselnden Kräfte werden durch zwei Ausgleichsgewichte an Hebeln kompensiert.

7. Das Gebäude

Die terrestrische Montierung des Fernrohres bringt gewaltige Vorteile für das Schutzgebäude, und auch hier wurden neue Wege gegangen. An Stelle einer Kuppel wurde ein

rechteckiges Gebäude gebaut, das das Fernrohr eng umschliesst, ungefähr 18 m lang, 12 m breit und 16 m hoch.

Ein rechteckiges Gebäude kann mit geringeren Kosten gebaut werden und hat zudem eine bessere Raumausnutzung. Es wiegt 450 Tonnen (die Kuppel allein von Mount Palomar 900 Tonnen . . .) und dreht auf nur vier Rädern von 91 cm Durchmesser und 13 cm Breite auf einer metallischen Fahrbahn, die ihrerseits auf einem von der Fernrohrsäule unabhängigen Fundament ruht. Zwei gegenüberliegende Räder werden mit je einem Gleichstrommotor von 11 kW Leistung angetrieben, wobei die volle Leistung nur bei sehr starkem Wind benötigt wird (das Gebäude ist für Windstärken von 225 km/h berechnet, bis 72 km/h kann beobachtet werden). Üblicherweise genügen 2 kW. Im Notfall kann das Gebäude über ein stark untersetztes Getriebe von Hand gedreht werden. Vier weitere Räder besorgen die radiale Führung des Gebäudes und nehmen die Windkräfte auf; sie laufen auf einer zylindrischen Bahn, die an der Innenwand des Fundamentes angebracht ist. Die Drehung des Gebäudes wird nun einfach vom Fernrohr selber automatisch gesteuert, so dass die gegenseitige Lage konstant bleibt, wobei es aber möglich ist, die beiden bis zu $\pm 7,5^\circ$ gegeneinander zu verdrehen. Die grösstmögliche Drehgeschwindigkeit ist wie beim Fernrohr 90°/Minute; sie ist so ruhig, dass man davon praktisch nichts spürt.



Abb. 7: Blick auf das Vorderende des MMT mit den 3 Periskopen und 5 der 6 Sekundärspiegelhalter. In der Mitte unten ist teilweise der Hauptspiegel des Nachführinstruments zu sehen, oben der dazugehörige Sekundärspiegelhalter.

Das Gebäude besteht grundsätzlich aus einer stark verrippen Plattform, durch die die Gabelmontierung des Fernrohrs dringt. Auf der Plattform sind beidseits der Montierung zwei dreistöckige Türme aufgebaut, die die Büros, Laboratorien, Dunkelkammern, Elektronik- und Kommandoräume enthalten. Über diese gleitet der zweiteilige Verschluss der Sternwarte. In den Räumen unterhalb der Plattform sind noch Aufenthaltsräume und eine Werkstatt untergebracht. Da sich das ganze Gebäude dreht, müssen Telefon und elektrische Energie über Kabel (zwei getrennte Systeme für gewöhnliche und für stöempfindliche Apparate), Wasser und Kühlmittel durch Schläuche zugeführt werden. Diese lassen eine Drehung von je 270° in beide Richtungen zu, nachher muss das Gebäude mit Fernrohr wieder zurückgedreht werden.

Die kompakte Bauweise erlaubt es, dass die benötigten Apparate sehr nahe beim Fernrohr zu stehen kommen, denn

es ist vorgesehen, dass die Astronomen von geheizten Räumen aus das Fernrohr fernbedienen. Dies bedingt aber seinerseits eine besonders gute Isolation sowohl nach aussen wie auch gegen innen in Richtung Fernrohr. Der Fernrohrraum selber muss tagsüber auf die für die folgende Nacht erwartete Temperatur gekühlt werden, da die grossen Massen sonst viel zu langsam die Lufttemperatur erreichen würden. Dazu ist im Boden der Plattform ein Kühlrohrsystem eingebaut, und Kühlaggregate halten die Raumluft niedrig. Aber auch das Fernrohr selber mit seinen vielen Motoren ist eine Wärmequelle. Auch hier wird aktiv gekühlt. Mit all diesen Massnahmen wird verhindert, dass warme Luft durch den Strahlengang des Fernrohrs streicht und die Bildschärfe vermindert.

In den geheizten Büreoräumen muss die Luft erneuert werden, ohne den Betrieb des Fernrohres zu stören. Die Abluft wird in den Keller geleitet und von dort mit Ventilatoren durch ein 60 m langes, im Boden verlegtes Rohr zu einem Berghang geführt, wo üblicherweise Fallwinde herrschen.

8. Schlussbemerkungen

Das MMT wurde in Zusammenarbeit des Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, Mass., und der



Abb. 8: Blick am MMT vorbei nach aussen.

Universität von Arizona in Tucson entwickelt. Die Gesamtkosten (jedoch ohne die Spiegel), beliefen sich auf US-\$ 7.5 Millionen (umgerechnet auf Basis 1975). Es wurde berechnet, dass eine Sternwarte mit einem Fernrohr von 4,5 m Durchmesser konventioneller Bauart gut das Dreifache kosten würde!

Der Beschluss, das MMT zu bauen, wurde im Dezember 1971 gefasst, die Einweihung erfolgte am 9. Mai 1979. Unsere SAG war wohl die erste europäische Reisegruppe, die das MMT besichtigt hat. Noch ist nicht alles fertig, und einiges, das vorhin beschrieben wurde, ist noch Ziel und nicht Tatsache. Es wird noch einige Zeit dauern, bis alle sechs Teleskope einwandfrei und zuverlässig auf den gleichen Brennpunkt arbeiten. Doch ist das Projektteam sehr zuversichtlich.

Das MMT als neuartiges Instrument wird mit der Zeit auch neue Zusatzgeräte nach sich ziehen, die seiner Eigenart besser angepasst sind und auch neue Beobachtungsgebiete erschliessen. Eines davon ist die Infrarot-Fotometrie im Wellenlängenbereich von über 2,5 Mikron. Hier sind die zu messenden Intensitäten so schwach, dass sie in der Strahlung des Himmels und des Fernrohres selber untergehen, wobei sich diese noch selber laufend ändern. Man behilft sich so, dass man das Fernrohr periodisch zum zu messenden Objekt und zum daneben liegenden Himmelshintergrund richtet. Das MMT ist für diese Beobachtungsart sehr gut geeignet, denn man muss nicht das ganze Fernrohr mit seiner grossen Masse verstellen, sondern kann einfach die Sekundärspiegel über den bereits vorhandenen Mechanismus mit einer Frequenz von 10 bis 20 Hertz hin und her kippen, wie dies auch bei den Radioteleskopen üblich ist.

Für diese Beobachtungen werden kleinere Sekundärspiegel eingesetzt, die die eigentliche Öffnung des Fernrohres begrenzen. Vom mit flüssigem Helium so nahe wie möglich an den absoluten Nullpunkt gekühlten Infrarot-Detektor aus darf über den Sekundärspiegel nur Himmel gesehen werden und keine Fernrohrteile (z.B. Spiegelfassungen), da sonst die Temperatur dieser gemessen würde!

Eine der ersten Forschungsarbeiten, die mit dem MMT unternommen wurde, war die Bestimmung der Rotverschiebung der beiden Komponenten des Quasars 0957 + 561, die für beide zu $z = 1,4136 \pm 0,0015$ gefunden wurde, woraus die Hypothese entstand, dass es sich möglicherweise um ein und dieselbe Quelle handle, die durch den Effekt der gravitationellen Linse durch eine in der Sichtlinie gelegene grosse Masse (z.B. eine Galaxie) scheinbar in zwei Teile aufgeteilt werde.

Literaturhinweise:

- 1) Physics today, September 1978.
- 2) Sky and Telescope, September 1972, Seite 159.
- 3) Sky and Telescope, November 1973, Seite 280.
- 4) Sky and Telescope, Juli 1976, Seite 14.
- 5) Sky and Telescope, Februar 1978, Seite 100.

Adresse des Autors:

Andreas Tarnutzer, Hirtenhofstrasse 9, CH-6005 Luzern.